

ESCOLA POLITÉCNICA - UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE TRANSPORTES



ENGENHARIA DE TRÁFEGO

4. OPERAÇÃO DO TRÁFEGO EM FLUXO DESCONTÍNUO

Eng.Hugo Pietrantonio, D.Sc.
Professor, Departamento de Engenharia de Transportes

FLUXO DESCONTÍNUO (OU INTERROMPIDO)	1
VIAS ARTERIAIS URBANAS E SUBURBANAS	1
OUTROS CASOS	1
FLUXO DESCONTÍNUO: INTERRUPÇÕES DE TRÁFEGO	2
VER EXERCÍCIO medida de FLUXO DE SATURAÇÃO *	3
FILAS E ATRASOS GERADOS PELAS INTERRUPÇÕES	5
FUNÇÕES DE DESEMPENHO SIMPLIFICADAS:	6
VER EXERCÍCIO SOBRE-DEMANDA	6
INTERSEÇÕES: DEFINIÇÕES BÁSICAS	7
TIPOS DE CONTROLE DE TRÁFEGO EM INTERSEÇÕES	8
OPERAÇÃO COM FLUXOS CONFLITANTES	12
SINALIZAÇÃO DE PRIORIDADE: CARACTERÍSTICAS DE OPERAÇÃO	12
VER EXERCÍCIO MEDIDA DE BRECHA CRÍTICA *	12
CASOS ESPECIAIS	16
VER EXERCÍCIO REPARTIÇÃO DE CAPACIDADE *	17
COMENTÁRIOS SOBRE OS PROCEDIMENTOS EXISTENTES	18
VER INTERSEÇÕES NÃO SEMAFORIZADAS	18
OPERAÇÃO COM CONTROLE SEMAFÓRICO	19
SEMÁFOROS: DEFINIÇÕES BÁSICAS	19
VER EXERCÍCIO REPARTIÇÃO DE CAPACIDADE *	33
CASOS ESPECIAIS	34
VER EXERCÍCIO MINIMIZAÇÃO DE ATRASOS	36
COMENTÁRIOS SOBRE OS PROCEDIMENTOS EXISTENTES	37
VER INTERSEÇÕES SEMAFORIZADAS	37
ANÁLISE DE CORREDORES URBANOS	38
COMENTÁRIOS SOBRE OS PROCEDIMENTOS	39
VER EXERCÍCIO BALANCEAMENTO III *	39

* identifica os exercícios incluídos nesta apostila (os demais são da apostila Exercícios Complementares)

4

FLUXO DESCONTÍNUO (OU INTERROMPIDO)

fatores "externos" causam interrupções periódicas do fluxo (semáforos, outras correntes de tráfego prioritárias) que determinam as condições de operação \Rightarrow afetam grandes extensões da via.

VIAS ARTERIAIS URBANAS E SUBURBANAS

Fluxo interrompido: $T = \frac{L}{V} + d = \frac{L}{V} + n_d \cdot \bar{d}_T \Rightarrow \frac{1}{V} = \frac{1}{V} + \frac{n_d}{L} \cdot \bar{d}_T$
(n_d : no. de pontos de atraso ou demora no trajeto L)

V: velocidade de percurso média (diferente de \bar{V} média global)

função das características da via arterial
(pouco afetada pelo fluxo de tráfego)

\bar{d}_T : atraso médio por veículo (global: $D_T = q \cdot \bar{d}_T$ em veículos-hora)

função das condições de demanda e oferta,
do tipo de interseção e de controle de tráfego

tipos: • regular: fixo ou variável, de controle/fluxo, geométrico ...
• sobre-atraso: aleatoriedade e sobre-demanda.

número médio de paradas por veículo: desaceleração/aceleração
afeta consumo de combustível, emissão de poluentes

$$\bar{d}_T = \sum_k p_k \cdot \bar{d}_{Tk} \quad (p_k \text{ probabilidade de parar } k \text{ vezes})$$

$$\bar{h} = \sum_k p_k \cdot k \quad (\text{taxa de paradas global: } H = q \cdot \bar{h})$$

atraso parado (\bar{d}_p): apenas o tempo despendido em filas ($< \bar{d}_T$)

Interrupções: \Rightarrow interseções: dominam as condições de tráfego à montante \Rightarrow atrasos.

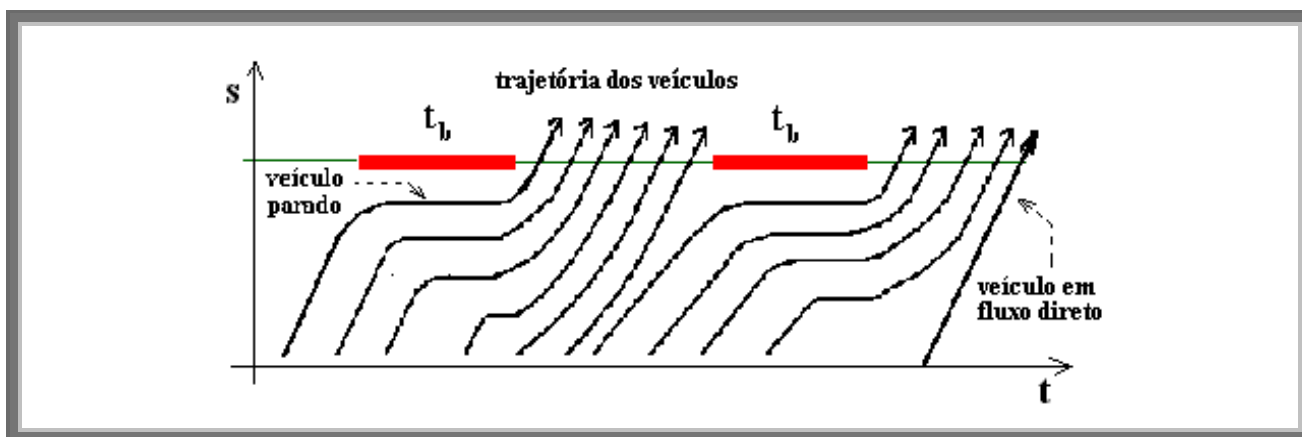
segundo o U.S.HCM, dominam a operação para espaçamentos até 3,6 km

OUTROS CASOS

ROTATÓRIAS DE PEQUENO DIÂMETRO
TRAVESSIAS DE PEDESTRES

FLUXO DESCONTÍNUO: INTERRUPTÕES DE TRÁFEGO

- ⇒ tempo bloqueado (t_b): ⇒ formação de filas ($q = 0$)
- ⇒ tempo disponível (t_d): ⇒ escoamento em filas ($q = S$)
- ⇒ escoamento normal ($q = \bar{Q}$)



Fluxo de saturação (S):

fluxo que ocorrerá com fila contínua e 100% do tempo disponível para o movimento; é capacidade potencial (inatingível com interrupções) a partir de fila contínua!

$$\therefore S = \frac{1}{h_s} = q_{\text{máx, fila}} \cdot \text{onde } h_s \text{ é o intervalo de saturação}$$

Capacidade para fluxo interrompido: $C_d = \phi \cdot S$

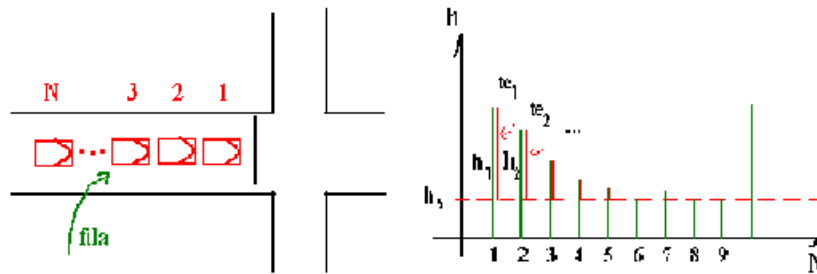
normalmente $S < C_i$ (C_i : capacidade em fluxo contínuo é o fluxo máximo possível)

com interrupções freqüentes $\phi < 1$ então C_d (interrompido) $\ll C_i$ (contínuo)!

⇒ representam gargalos operacionais (atrasos, filas)

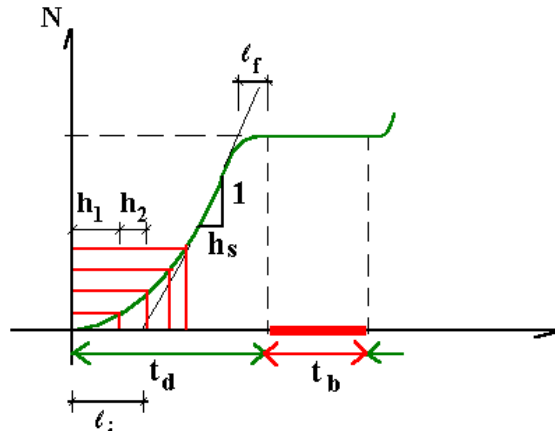
Escoamento das filas:

($h=h_s$ a partir do 4º a 6º veículo)



onde: t_e = tempo excedente (tempo morto \equiv perda de eficiência na operação)

Curva acumulada: passagens de veículos pela "linha de retenção"



- \Rightarrow perda de eficiência do movimento:
 - início do movimento: $l_0 = \sum_{k=1}^s te_k$
 - fim do movimento: $l = l_0 + l_f$

\Rightarrow tempo disponível efetivo: $t_{ef} = t_d - l \leq t_d \therefore N_{max} = S \cdot t_{ef}$ (menor que $S \cdot t_d$)

\Rightarrow tempo bloqueado \Rightarrow formação de filas (não disponível efetivo: $t_{nef} = t_b + l$)

portanto, o efeito global das interrupções seria avaliado por:

$$C_d = \varphi \cdot S, \text{ onde } \varphi = \frac{T_d - L}{T} \text{ com tempo total } T = T_d + T_b \text{ (sempre } \varphi < 1)$$

$$\text{tempo disponível } T_d = \sum t_d; \text{ bloqueado } T_b = \sum t_b; \text{ morto } L = \sum l$$

exemplo: semáforo - tempo disponível 33 s (verde mais amarelo)/ciclo (50 s)
intervalo de saturação de 2 s; volume máximo por ciclo de 15 veículos

$$\text{tem-se } S = \frac{1}{h_s} = 1800v / h, \quad t_{ef} = \frac{N_{max}}{S} = 30s, \quad l = t_d - t_{ef} = 3s, \quad \varphi = \frac{t_{ef}}{t_c} = 0,60,$$

e, portanto, a capacidade seria de $C = \varphi \cdot S = 1080v / h$

VER EXERCÍCIO MEDIDA DE FLUXO DE SATURAÇÃO *

Duração da saturação (t_s):

⇒ **tempos bloqueados (t_b)**

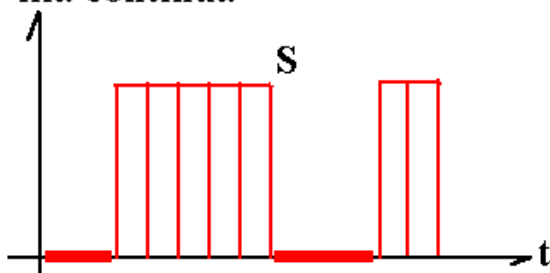
filas e atrasos localizados
 fila inicial: $Q \cdot t_b$ (Q uniforme)
 tempo de dissipação da fila:

$$t_s = \frac{Q \cdot t_b}{S - Q}$$

⇒ **tempos disponíveis (t_d)**

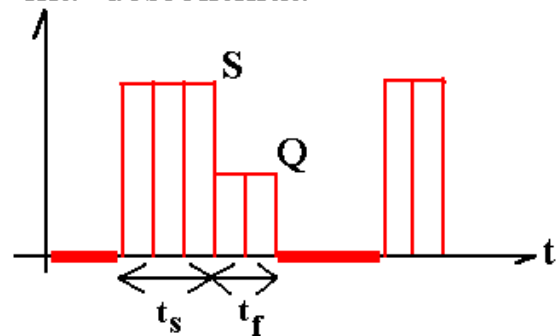
c/semáforos: verde na programação semafórica
 s/semáforos: brechas nos fluxos prioritários

fila contínua



saturado: $t_d < \frac{Q \cdot t_b}{S - Q} \Rightarrow t_s = t_d$

fila descontínua



não saturado: $t_s = \frac{Q \cdot t_b}{S - Q} < t_d$

ociosidade: sobra tempo disponível após dissipar fila ($t_s < t_d \Leftrightarrow Q < C$)

necessidade de tempo disponível: $y = \frac{Q}{S} = \frac{t_s}{t_b + t_s}$

saturação: sobra fila no final do tempo disponível ($t_d < t_s \Leftrightarrow Q > C$)

(passam N_d veículos e a fila cresce Δn)

necessidade de tempo disponível: $y = \frac{Q}{S} = \frac{t_d}{t_b + t_d} \cdot \left(1 + \frac{\Delta n}{N_d} \right)$

Dispersão dos pelotões:

pelotões formados na dissipação das filas dispersam-se ao longo do percurso

(tende a homogeneizar o fluxo ao longo do trecho adiante !)

FILAS E ATRASOS GERADOS PELAS INTERRUPÇÕES

função de desempenho: calculada diretamente a partir das estimativas de atrasos nos trechos de cada segmento como

$$T = \sum \left(\frac{L_i}{V_i} + \bar{d}_i \right) \text{ considerando todos os trechos !}$$

fórmulas de atraso generalizadas: baseadas nas formulações dinâmicas (solução aproximada por transformação de coordenadas, também $x > 1$)

$$\bar{d}_i = \bar{d}_r + \bar{d}_s$$

sendo \bar{d}_r o termo de atraso regular (usualmente atraso de controle) calculado assumindo chegadas regulares e $q < C$

pode ser calculado com n_r (fila regular) como $d_r = \frac{n_r}{q}$

\bar{d}_s o termo de sobre-atraso (aleatoriedade e sobre-demanda) calculado com chegadas aleatórias e a demanda Q

pode ser calculado com n_s como $d_s = \frac{n_s}{q}$ com $X < 1$

ou $d_s = \frac{n_s}{C}$ com $X \geq 1$ (utilizando fórmulas dinâmicas)

operação depende fundamentalmente dos fatores que causam interrupções (t_b, t_d) e da eficiência do movimento a partir de filas (S, ℓ)

os fatores manifestam-se basicamente nas interseções e normalmente tem de considerar aspectos práticos relevantes (como a ocorrência de chegadas em pelotão, de bloqueios de movimentos distintos ...)

exemplo: sem semáforo - demanda 400v/h, capacidade 600 v/h ($\kappa = 1, T_p = 0,5h$)

$d_r \cong \frac{1}{C} = 6s$ (no caso admitido função do controle de tráfego apenas),

fórmula estacionária $d_s = \frac{\kappa}{C} \cdot \frac{X}{1-X} = 12s$ (admite $n_{si} = n_{sf}$) $\therefore d = 18s$ e $\bar{n} = 2v$

fórmula dinâmica $d_s = \frac{T_p}{4} \cdot \left[(X-1) + \sqrt{(X-1)^2 + \frac{8 \cdot \kappa \cdot X}{C \cdot T_p}} \right] = 5,9s$ (admite $n_{si} = 0$)
 $\therefore d = 11,9s$ e $\bar{n} = 1,32v$ ($n_r \cong 2v$)

funções de desempenho simplificadas:

⇒ função genérica (estacionária):

$$T = T_0 + \gamma \frac{X}{1-X} \text{ para } X < X_c$$

$$T_c + \eta \cdot (X - 1) \text{ para } X > X_c$$

onde $X_c \approx 0,90$ e $T_c = T_0 + \gamma \frac{X_c}{1-X_c}$ e

$$\gamma \cong \sum \delta_i \text{ ou } \gamma \cong \delta \cdot d$$

incorporando a contribuição de cada interseção individual no trecho

$\delta_i \cong 0,6$ para semáforo isolado

0,3 para semáforo coordenado

1,0 para aproximação secundária

ou considerando o espaçamento e tipo de interseções característicos

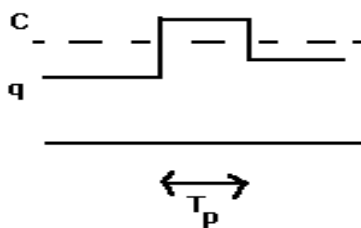
$\delta \cong 0,40$ a $0,80$ / km para vias arterias

0,80 a 1,60 / km para vias coletoras

T_0 deve incluir todos os termos de atraso, exceto o de congestionamento

⇒ com formulação dinâmica (estendida para $X > 1$):

$$T = T_0 + \frac{T_p}{4} \left[(X - 1) + \sqrt{(X - 1)^2 + \frac{8 \cdot \gamma}{C \cdot T_p} (X - X_0)} \right] \text{ para } n_0 = 0 \text{ e } X > X_0$$



T_p : duração do período de sobre-demanda ou pico (usual 15 minutos);

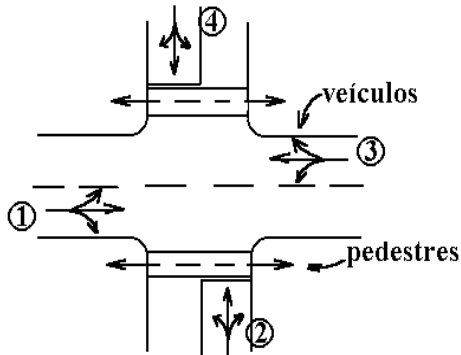
C: capacidade ($N_{max} = C \cdot T_p$)

(para $X \leq X_0$, admite-se $T = T_0$, sendo em geral, $X_0 = 0,5$ a $0,7$ ou nulo)

T_0 é o tempo básico (exclui somente o atraso de congestionamento)

[**VER EXERCÍCIO SOBRE-DEMANDA**](#)

INTERSEÇÕES: DEFINIÇÕES BÁSICAS

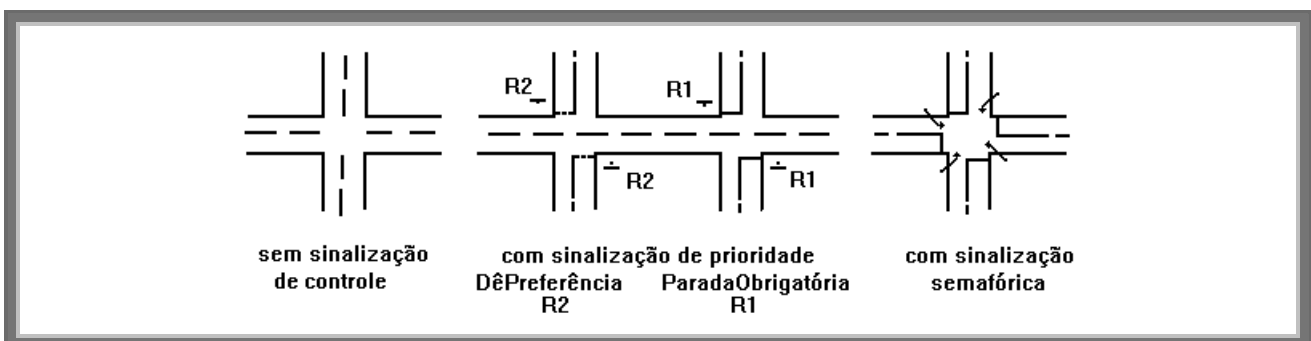


- **aproximação:** cada trecho de via que chega à interseção;
- **afastamento:** cada trecho de via que sai da interseção;
- **movimento:** cada origem/destino de veículos ou pedestres.
- **corrente de tráfego:** conjunto de movimentos de uma aproximação.

Conflitos em interseções: há conflito quando dois ou mais veículos procuram ocupar o mesmo espaço da via num mesmo instante.

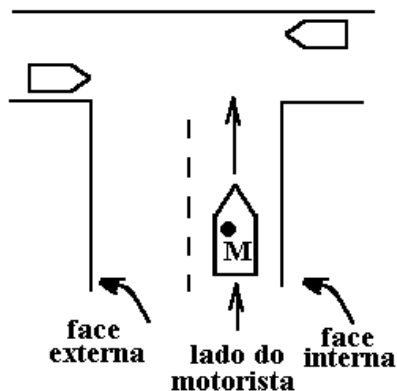
- ⇒ relevância dos conflitos é função dos volumes de tráfego nos movimentos conflitantes (capacidade e desempenho dependem de brechas adequadas no fluxo conflitante)
- ⇒ outros fatores relevantes são n.º. ligações, n.º. de faixas, n.º. de mãos de direção, tipo de interseção e de controle de tráfego
- ⇒ periculosidade do conflito é função da intervisibilidade entre os movimentos conflitantes e da velocidade relativa de impacto (VRI).

Tipos de Controle de Tráfego:



Tipos de Controle de Tráfego em Interseções

Regras gerais de prioridade: se não houver sinalização regulamentadora



-cruzamento: têm prioridade os fluxos que vêm da direita.

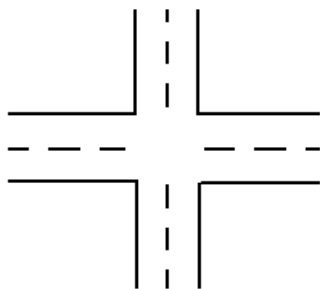
- **Brasil, EUA:** prioridade ao fluxo vindo da face interna (lado oposto à posição do motorista no veículo).
- **UK, Austrália:** prioridade ao fluxo vindo da face externa (lado do motorista).

-quem muda para via deve dar prioridade ao tráfego na via.

- quem entra em rodovias ou rotatórias deve dar prioridade.

Interseções sem sinalização de controle:

todas as correntes de tráfego são interrompidas (para qualquer fluxo há sempre uma outra corrente cruzando que vêm da direita).



tipos de movimento:

- permitidos: podem ser realizados quando não houver outro veículo com preferência (prioritário).
- proibidos: não podem ser realizados.

regulamentação de circulação: positiva - sinais R25a, b, c, d
negativa - sinais R3, R4a,b, R5

⇒ admissível para VDM até 1000 a 1500 (150 v/hora-pico).
menos de 2 colisões angulares/ano
(ou atropelamentos)

⇒ problemas: segurança - acidentes, conflitos
capacidade - veículos/hora
desempenho - atrasos, filas

obrigação



dimensões mínimas
área urbana

diâmetro-0.40m
tarja-0.04m
orla-0.04m
área rural
diâmetro-0.75m
tarja-0.07m
orla-0.07m

proibição



cores

fundo-branca
tarja-vermelha
orla-vermelha
símbolo-preta
letras-preta



R-5a Proibido Estacionar



R-6b Estacionamento Regulamentado



R-24a

Sentido Obrigatório



R-24b

Passagem
Obrigatória



R-6c Proibido Parar e Estacionar



R-25a

Vire à Esquerda



R-25b

Vire à Direita



R-25c

Siga em Frente ou à
Esquerda



R-25d

Siga em Frente ou à
Direita



R-3

Sentido Proibido



R-4a

Proibido Virar à
Esquerda



R-4b

Proibido Virar à
Direita

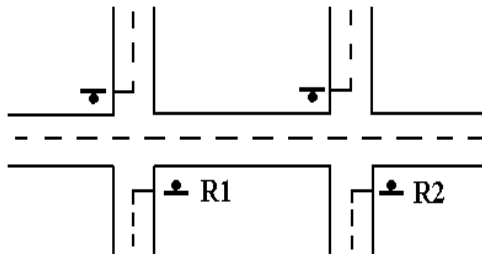


R-5

Proibido Retornar

Interseção com sinalização de prioridade:

somente fluxo secundário é interrompido (fluxo principal é contínuo)



tipos de movimentos:

- principais: têm preferência no uso da via (nessa direção).
- secundários: devem dar preferência ao fluxo principal.
- proibidos: não podem ser realizados.

há uma hierarquia de prioridade entre os fluxos da via principal e secundária

Objetivo da sinalização de prioridade:

- ⇒ definição afirmativa de fluxos prioritários;
- ⇒ reduzir conflitos e acidentes (lateral, atropelamentos);
- ⇒ melhorar tráfego para fluxos prioritários

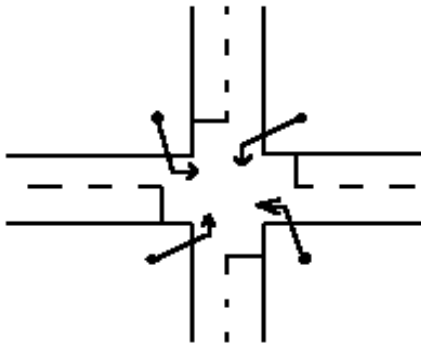
dê preferência: VDM até 3000 (300 v/hora-pico)
VSA maior que 15 à 30 km/hr

pare simples: VDM até 8000 (800 v/hora-pico)
VSA menor que 15 à 30 km/hr
aspectos locais de segurança

cuidados: $\Rightarrow Q_p/Q_s \geq 1,5$ a 2,0;
geometria consistente com prioridade.

Interseção com sinalização semafórica:

programável, quase sempre todos os fluxos são interrompidos.



tipos de movimentos:

- protegidos: movimentos autorizados e prioritários em algum estágio.
- permitidos: movimentos autorizados mas secundários (usando brechas).
- proibidos: movimentos não autorizados em nenhum estágio do semáforo.

Objetivos da instalação de semáforos

reduzir conflitos por divisão no tempo
 reduzir acidentes (lateral, atropelamentos)
 reduzir atrasos para fluxos "secundários"
 economizar policiamento em períodos normais

Justificativas para implantação de semáforos

movimentos conflitantes com volume grande ($VDM > 8000$);
 tráfego principal contínuo (semi-atuado);
 interseções complexas com muitos conflitos;
 movimentos conflitantes com grande volume de pedestres;
 índice de acidentes altos (elimináveis);
 implantação de movimento progressivo;
 controle de áreas congestionadas ($V > C$);
 situações locais (visibilidade, ...).

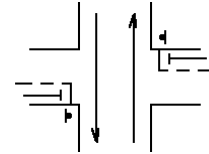
Condições que dispensam implantação de semáforo

semáforos próximos formam pelotões;
 circulação permite eliminar cruzamentos.

OPERAÇÃO COM FLUXOS CONFLITANTES

Sinalização de prioridade: características de operação

⇒ definição do via (fluxo) principal
(operação contínua, não interrompida)



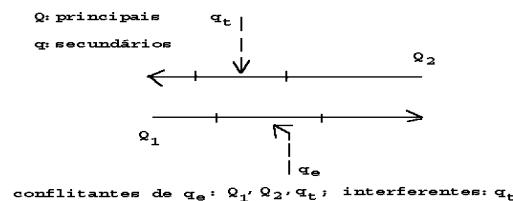
hierarquia de prioridade: 0 - fluxos principais da via principal;
1 - conversões à esquerda da via principal;
2 - conversões à direita da via secundária;
3 - fluxos diretos da via secundária;
4 - conversões à esquerda da via secundária.

⇒ movimentos secundários ocorrem nas brechas entre veículos das correntes de tráfego conflitantes no fluxo prioritário: brecha h no fluxo conflitante (é um movimento prioritário).

- brecha crítica, mínima adequada α : é função do tempo necessário para realizar a manobra (risco).

- havendo fila contínua, os demais veículos seguem-se com um intervalo de seguimento β (saturação).

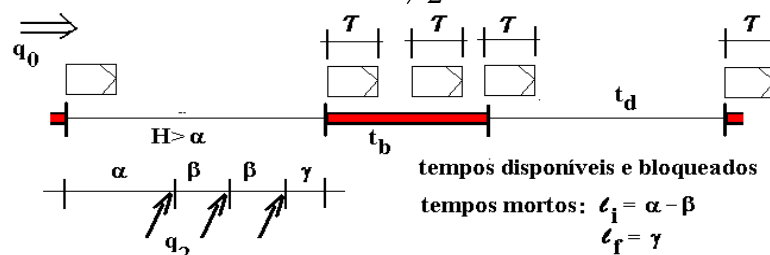
⇒ movimentos secundários competem entre si pelo uso das brechas: fluxo interferente (é outro movimento secundário, prioritário)



VER EXERCÍCIO MEDIDA DE BRECHA CRÍTICA *

⇒ tempo disponível ⇒ brechas $H > \alpha$ (ou $H - \tau$)

⇒ tempo perdido ⇒ $\alpha - \beta$, $\gamma = H - \alpha - (n-1)\beta \cong \beta/2$



Capacidade: tempos disponíveis e bloqueados são variáveis aleatórias !
capacidade depende também da distribuição de intervalos ...

⇒ **Generalização de Troutbeck:** $C_2 = \theta_L \cdot \frac{e^{-\gamma(\alpha-\tau)}}{(1-e^{-\gamma\beta})} \cdot q_1$, com $\gamma = \frac{\theta_L \cdot q_1}{1-\tau \cdot q_1}$

com variação por faixa: $\gamma = \sum_i \frac{(1-\theta_{pi}) \cdot q_i}{1-\tau \cdot q_i}$, $\theta_L = \prod_i (1-\theta_{pi})$

θ_{pi} : proporção do fluxo em pelotões na faixa i ($\theta_{pi} \cong \tau \cdot q_i$)

aproximação contínua $C_2 = \theta_L \cdot \frac{e^{-\gamma_1(\alpha_0-\tau)}}{\beta} \cdot \frac{q_1}{\lambda}$ com $\alpha_0 = \alpha - \frac{\beta}{2}$

⇒ DENATRAN/87: $\beta_1 =$ intervalo mínimo fluxo principal ($q_1^{\max} = \frac{3600}{\tau}$)

$$C_2 = (1 - q_1 \cdot \tau) \cdot \frac{e^{-q_1(\alpha-\tau)}}{1 - e^{-q_1\beta}} \cdot q_1 \text{ (fórmula de Tanner)}$$

corresponde a $\theta_p = \frac{\tau}{h} = q_1 \cdot \tau$, $\theta_L = 1 - \theta_p = 1 - q_1 \cdot \tau \Rightarrow \gamma = q_1$

⇒ melhor valor de $\tau \cong \frac{1}{S_1}$ (S_1 : fluxo de saturação no fluxo oposto) !

⇒ **Fórmula de básica (Poisson):** $C_2 = \frac{e^{-q_1 \cdot \alpha}}{1 - e^{-q_1 \cdot \beta}} \cdot q_1$ (corresponde a $\tau = 0$)

aproximação contínua de Siegloch: $C_2 = \frac{e^{-q_1 \cdot \alpha_0}}{\beta}$ com $\alpha_0 = \alpha - \frac{\beta}{2}$

⇒ método alemão: $C_p = f_c \cdot C_2$, $f_c = 1 - 0,1 \cdot \left(\frac{q_1}{1000}\right)^2$

$\beta = 0,6 \cdot \alpha$, na ausência de dados de campo

versão atual utiliza a aproximação de Siegloch

⇒ método do HCM/85: usa a mesma fórmula com $\beta = \frac{1}{2} \cdot \alpha + \frac{1}{2}$, em segundos

⇒ método do HCM/94 utilizou diretamente a aproximação de Siegloch !

⇒ **Capacidade com uso compartilhado:** $C_s = \frac{1}{\sum \frac{p_i}{C_i}} \Rightarrow X = \sum X_i$

Interferências: fração do tempo em que a posição interferente está ocupada

∴ fator de impedância: $f_3 = 1 - P_{02}(X_2) \cong 1 - X_2$

onde $P_{02}(X_2)$ é a probabilidade de ter a posição interferente vaga !

Atrasos: de controle + de congestionamento

atraso total: $\bar{d}_2 =$ espera pela brecha + espera na fila

⇒ **Fórmulas estacionárias:**

- espera pela brecha (atraso do veículo no topo da fila):

$$d_{\min} = \frac{e^{q_1 \cdot (\alpha - \tau)}}{q_1 \cdot (1 - q_1 \cdot \tau)} - \alpha - \frac{1}{q_1} - \frac{q_1 \cdot \tau^2}{2} \quad (1^\circ \text{veículo, topo da fila})$$

depende de qual é a manobra do veículo no topo da fila

para pedestres, em geral admite-se $\bar{d}_2 = d_{\min} = \frac{e^{q_1 \cdot \alpha}}{q_1} - \alpha - \frac{1}{q_1}$

- espera total (incluindo o tempo para chegar ao topo da fila):

$$\bar{d}_2 = \frac{d_{\min} + \eta \cdot X_2}{1 - X_2}, \quad X_2 = \frac{q_2}{C_2}, \quad \eta = \frac{e^{q_1 \cdot \beta} - q_1 \cdot \beta - 1}{q_1 \cdot (e^{q_1 \cdot \beta} - 1)}$$

$$\bar{d}_2 = d_c + d_q = d_{\min} \left(1 + \frac{\epsilon \cdot X_2}{1 - X_2}\right), \quad d_c : \text{atraso de controle}$$

d_q : atraso de congestionamento

$$\epsilon = \frac{\eta + d_{\min}}{d_{\min}}, \quad d_c = d_{\min} \quad (\text{compatível com Tanner e Troutbeck})$$

depende das características de todas as manobras na faixa !

características médias podem ser calculadas ponderando por X_i

aproximação de Harders: $\bar{d}_2 = \frac{1 - e^{-(q_1 \cdot \alpha + q_2 \cdot \beta)}}{C_2 - q_2}$ (compatível com Siegloch)

⇒ **Fórmulas dinâmicas:**

- fórmula generalizadas (integrais, com período T_p e $n_0 = 0$): $\bar{d}_2 = d_c + d_Q$

$$d_c = d_{\min} \cong \frac{1}{C} \text{ para cada manobra (tempo no topo da fila)}$$

$$d_Q = \frac{T_p}{4} \cdot \left[(X - 1) + \sqrt{(X - 1)^2 + \frac{8 \cdot k \cdot X}{C \cdot T_p}} \right] \text{ (tempo na fila)}$$

$$d_Q \text{ comum a todas as manobras, com } X = \frac{Q}{C} = \sum X_i !$$

Outras Medidas de Desempenho:

⇒ **fila:** $\bar{n}_2 = q_2 \bar{d}_2$ é a fila média (estacionária).

com fórmulas dinâmicas, a fila média usa o fluxo médio incluindo pico e pós-pico e também interessa calcular a fila máxima no período !

em geral, adota-se um fator de segurança igual a 1,5 ou 2,0 para fila máxima (para representar a fila máxima provável, pelo efeito da aleatoriedade).

⇒ **medidas secundárias** (Troutbeck):

probabilidade de parar: $P_p = 1 - (1 - X) \cdot (1 - \beta_1 \cdot q_1) \cdot e^{-\gamma(\alpha - \beta_1)}$

número de movimentos/veículo: $\bar{N}_v \cong \frac{\bar{n}_2}{N_m}$

= número de paradas/veículo na fila, onde $N_m = \frac{1}{1 - e^{-\gamma\beta_2}}$ veículos/brecha

estas são fórmulas que admitem condições estacionárias e $q < C$!

exemplo: $q_2 = 180v / h = 0,05v / s$, $\alpha = 6\text{seg}$, $\beta_2 = 3\text{seg}$
 $q_1 = 900v / h = 0,25v / s$, $\theta_p = 0,6$, $\beta_1 = 2\text{seg}$

capacidade - Troutbeck

$$\theta_L = 1 - 0,6 = 0,4, \quad \gamma = \frac{0,4 \cdot 0,25}{1 - 0,25} = 0,20 / \text{seg}$$

$$C_2 = 0,4 \cdot \frac{e^{-0,20 \cdot (6-2)}}{1 - e^{-0,20 \cdot 3}} \cdot 900 = 358,5v / h$$

(os outros métodos forneceriam valores entre 308v/h e 390v/h)

atraso - $X_2 = 180/358,5 = 0,51 < 1$ (fórmula estacionária ou dinâmica)

$$\text{fórmula estacionária: } D_{\min} = \frac{e^{0,25 \cdot (6-2)}}{0,25 \cdot (1 - 0,25 \cdot 2)} - 6 - \frac{1}{0,25} - \frac{0,25 \cdot 2^2}{2} = 11,25\text{seg}$$

$$\eta = \frac{e^{0,25 \cdot 3} - 0,25 \cdot 3 - 1}{0,25 \cdot (e^{0,25 \cdot 3} - 1)} = 1,314 \therefore \bar{d}_2 = \frac{11,25 + 1,314 \cdot 0,51}{1 - 0,51} = 24,3\text{seg}$$

outras medidas: fila $\bar{n}_2 = 0,05 \cdot 24,3 = 1,2v$

probabilidade de parar $P_p = 1 - (1 - 0,51) \cdot (1 - 0,25 \cdot 2) \cdot e^{-0,20 \cdot (6-2)} = 0,89$

e movimentos/veículo $N_m = \frac{1}{1 - e^{-0,20 \cdot 3}} = 2,2 \therefore N_v = \frac{1,2}{2,2} = 0,54$

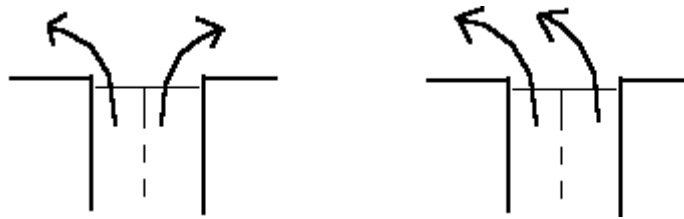
fórmula dinâmica: $d_c = D_{\min} \cong \frac{3600}{358,5} = 10,04\text{seg}$, para $T_p = 0,25h$ e $\kappa = 1$

$$d_q = \frac{900}{4} \cdot \left[(0,51 - 1) + \sqrt{(0,51 - 1)^2 + \frac{8 \cdot 10,51}{358,5 \cdot 0,25}} \right] = 9,99\text{seg} \therefore \bar{d}_2 = 20,03\text{seg}$$

Casos Especiais

Múltiplas faixas na aproximação secundária:

- ⇒ em geral, máximo de 2 faixas adjacentes para fluxos secundários.
- ⇒ os fluxos em cada faixa podem ou não ser interferentes !
- ⇒ restrições de visibilidade (o veículo de uma faixa reduz a visibilidade do fluxo oposto para o veículo de outras faixas);
- ⇒ conflitos entre os movimentos secundários adjacentes (especialmente quando a via receptora tem apenas 1 faixa);



- ⇒ apenas interferência por visibilidade interferência por fluxo oposto
- ⇒ interferência justifica a inclusão do fluxo na faixa com manobra mais fácil como conflitante do fluxo nas demais faixas;
- ⇒ em qualquer caso, impõe-se a observação também do limite de capacidade da via receptora.

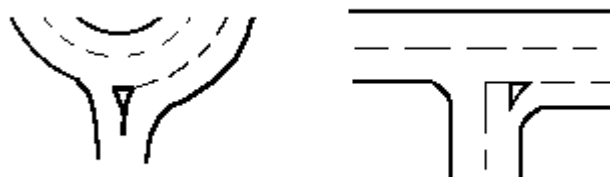
Rotatórias de pequeno diâmetro:

- ⇒ considerada como um conjunto de interseções com sinalização de prioridade
- ⇒ rotatória convencional dá prioridade ao fluxo circulante na rotatória em todas as aproximações (compatível com a regra geral de prioridade inglesa no cruzamento entre veículos; incluída no novo CTB/97);
- ⇒ rotatória não convencional determina a prioridade entre fluxos circulante e entrante em cada aproximação com sinalização específica (maior flexibilidade na definição do controle de tráfego);
- ⇒ análise pode seguir o procedimento geral, mas a proximidade das interseções torna a alocação dos fluxos entre faixas dependente da proporção do fluxo que fica ou sai da rotatória antes de cada aproximação (julgamento do técnico ou observação do local);

(há métodos específicos para rotatórias convencionais, que avaliam a capacidade para o fluxo entrando em cada aproximação; dados obtidos com métodos australianos, alemães e franceses são mais conservativos que os obtidos com métodos ingleses).

Faixas de entrada livre (com ou sem adição de faixa):

- ⇒ os fluxos da via secundária podem receber faixas de entrada livre, permitindo que pelo menos a conversão à direita seja feita sem fluxo oposto.



[VER EXERCÍCIO REPARTIÇÃO DE CAPACIDADE *](#)

Comentários sobre os Procedimentos Existentes

⇒ método do DENATRAN/87 baseado em estudos ingleses e escoceses (Tanner)

não detalha a identificação dos fluxos conflitantes e não trata a interferência;
não considera efeito da composição de tráfego (na via principal ou secundária);
não fornece parâmetros e equações básicas de cálculo (somente gráficos);
não considera a influência de fatores locais nos parâmetros de operação;
não avalia atrasos ou outras medidas de serviço (com exceção da capacidade);
trata uso compartilhado de forma dúbia (análise por manobra ou posição);
não existe estudo empírico conhecido sobre a validação do método no Brasil.

⇒ métodos do HCM/85 e HCM/97 permitem eliminar a maior parte das deficiências

HCM/85-97: baseados no método alemão com a fórmula de Poisson discreta;
(HCM-94 foi baseado no método alemão com a fórmula de Siegloch)
HCM/85-97 detalham identificação de fluxos conflitantes e de interferência;
HCM/85-97 consideram o efeito da composição de tráfego na via secundária;
HCM/85 considera a influência de fatores locais nos parâmetros de operação;
HCM/97 despreza a influência da maioria dos fatores locais sobre a operação;
HCM/85 não avalia atrasos (a reserva de capacidade é a medida de eficácia);
HCM/97 avalia o atraso com fórmula dinâmica (sem distinguir os movimentos);
HCM/97 usa o atraso médio parado como medida de eficácia;
HCM/97 trata da interferência nos fluxos principais (bloqueios de faixas ...).

⇒ não tratam dos efeitos das intervenções sobre a segurança de tráfego e dos efeitos sobre os fluxos de pedestres (incluindo atrasos, acidentes, segregação);

⇒ existe pouca validação dos métodos de análise de interseções sem semáforos no Brasil, reconhecendo o comportamento típico dos motoristas brasileiros;

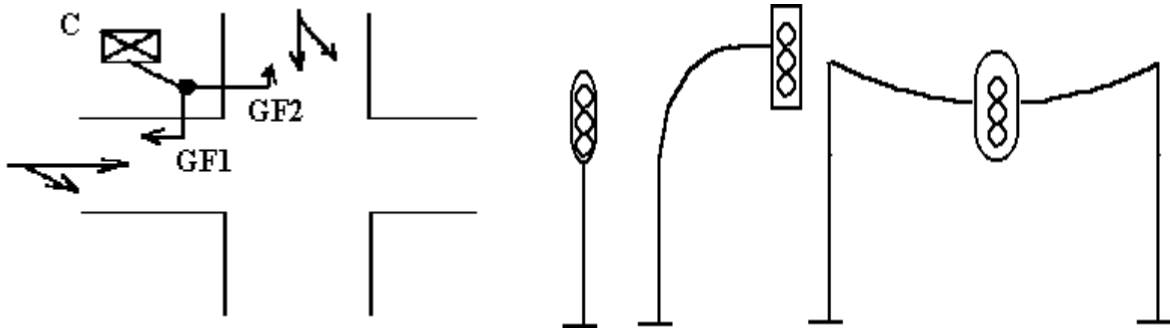
aplicação criteriosa dos métodos existentes é mais recomendável ...

[VER INTERSEÇÕES NÃO SEMAFORIZADAS](#)

OPERAÇÃO COM CONTROLE SEMAFÓRICO

Semáforos: Definições Básicas

Semáforo = controlador (C) + grupos focais (GF)



Modos de operação:

de tempos fixos
semi-atuados pelo tráfego
atuados pelo tráfego (lógica)

Tipos de controladores:

eletromecânicos ou eletrônicos
de 2, 3, 8 ou + fases/estágios
de 1,3 ou + planos de tráfego
pré-programados ou comandados
(comandados por computador).

Modos de coordenação:

semáforos isolados
coordenação arterial
coordenação por área
...dinâmicos

Tipos de detetores:

de passagem, de presença, de fila,
indutivos, óticos, mecânicos, vídeos.

Dados típicos sobre semáforos instalados

total de semáforos em áreas urbanas:

EUA	EUROPA	BRASIL
1/1000 hab	1/2000 hab até 1/7000 hab	SP: 1/3000 hab Interior: <1/5000 hab

Estágio: cada período de tempo em que as indicações luminosas não se alteram na interseção, i.e., não se alteram os movimentos autorizados (protegido ou permitido, e bloqueado)

Entreverde: período de tempo correspondente à mudança de estágio (fim do verde de um grupo de movimentos e o início do verde seguinte de outro grupo de movimentos).

⇒ amarelo: aviso de mudança de estágio (I_a)

I

⇒ vermelho total: limpeza da interseção (I_v)

Ciclo: seqüência completa de estágios na interseção (tempo de ciclo t_c)

Tempos de foco: duração do tempo alocado ao verde (g), amarelo (I_a) e vermelho (r) de cada fase.

Diagrama de estágios: mostra os movimentos autorizados ou bloqueados em cada estágio.

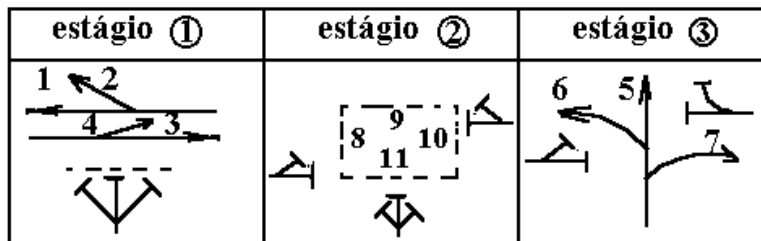
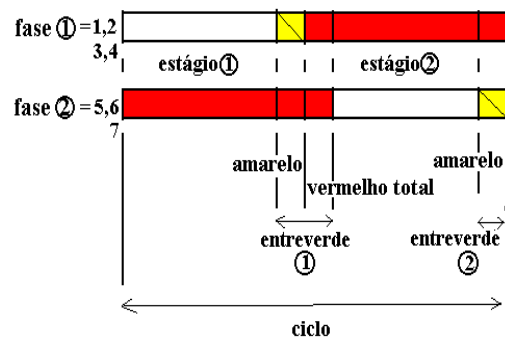
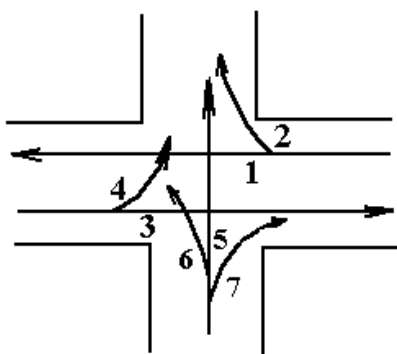


Diagrama de tempos: mostra a alocação do tempo às indicações luminosas de cada fase (ou grupos de tráfego).



Fase Semafórica: é o conjunto de movimentos que recebe a mesma sequência de indicações luminosas (podem, em princípio, ser comandadas conjuntamente pelo controlador semafórico)

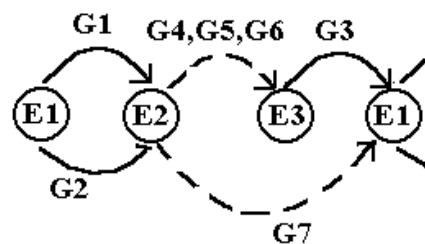
Grupo de Tráfego: é o conjunto de movimentos de uma fase que utilizam uma mesma aproximação (que, em princípio, poderiam ser controlados por um único grupo focal) - unidade básica para análise de tráfego

Tabela de Movimentos/Estágio: mostra os movimentos autorizados em cada estágio, permitindo identificar as fases e os grupos focais (é suficiente representar grupos/estágio).

estágios movimentos	E1	E2	E3	
1, 2	sim	-	-	G1
3, 4	sim	-	-	G2
5, 6, 7	-	-	sim	G3
8, 9, 10	-	sim	-	G4,G5,G6
11	sim	sim	-	G7

Matriz e Diagrama de Fase ou Grupo/Estágio: mostra uso dos estágios pelas fases e grupos de tráfego.

FAS E	Início	Fim	GRUPOS
F1	E1	E2	G1,G2
F2	E3	E1	G3
F3	E2	E3	G4,G5,G6
F4	E1	E3	G7

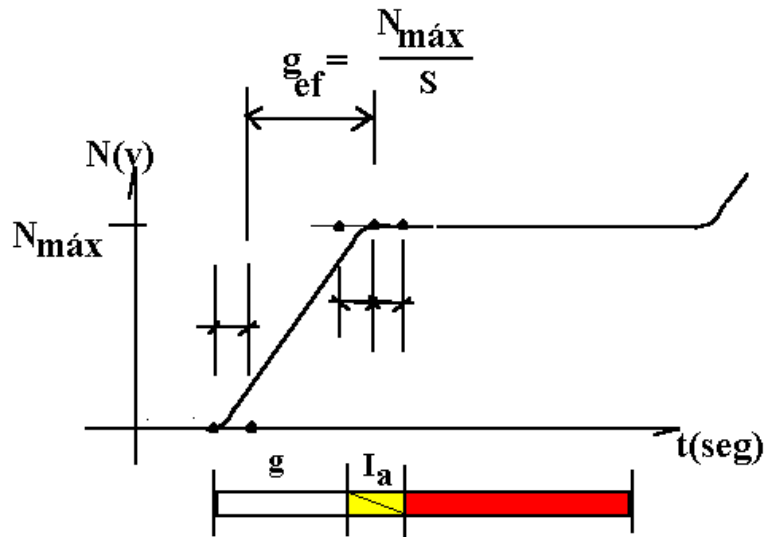


Grupo de Faixas: cada conjunto de faixas de uma aproximação que opera de forma independente (isto é, dando suporte a movimentos de um mesmo grupo de tráfego ou a grupos que interagem utilizando as mesmas faixas).

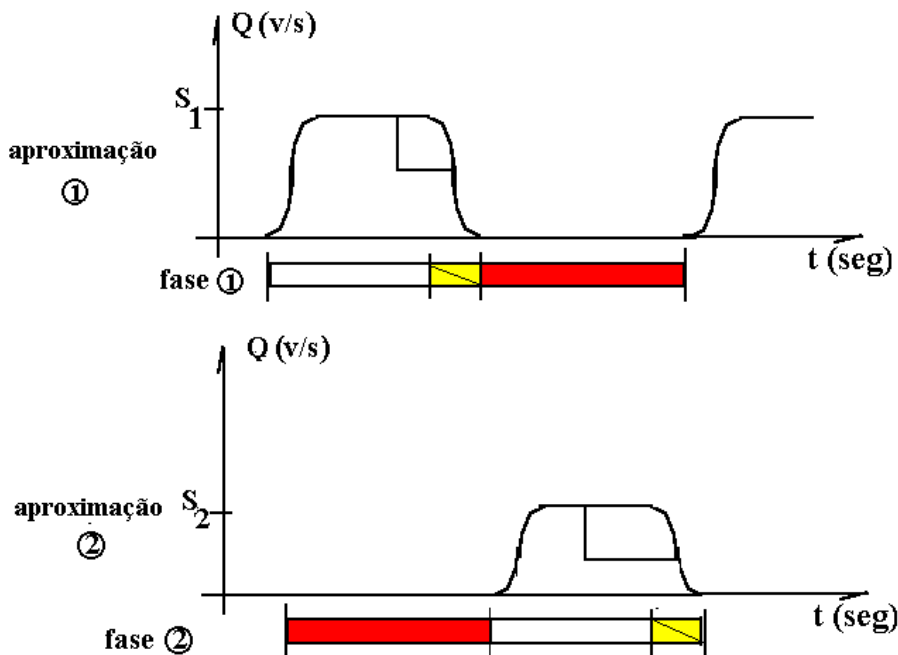
agrega grupos de tráfego que não podem operar independentemente (função do grau de interação entre os movimentos) – unidade básica de operação

Operação em Aproximações SemafORIZADAS

Fluxo de saturação: é o fluxo máximo de veículos possível numa aproximação (para um certo grupo de tráfego), com 100% de tempo de verde, nas condições existentes de via e tráfego, a partir de uma fila contínua.



representação da operação: $g + I_a + r = t_c$



Tempo de verde efetivo: é o tempo de verde equivalente necessário para escoar com o fluxo de saturação o número máximo possível de veículos acumulados por ciclo (observado quando a operação está saturada para um certo grupo de tráfego)

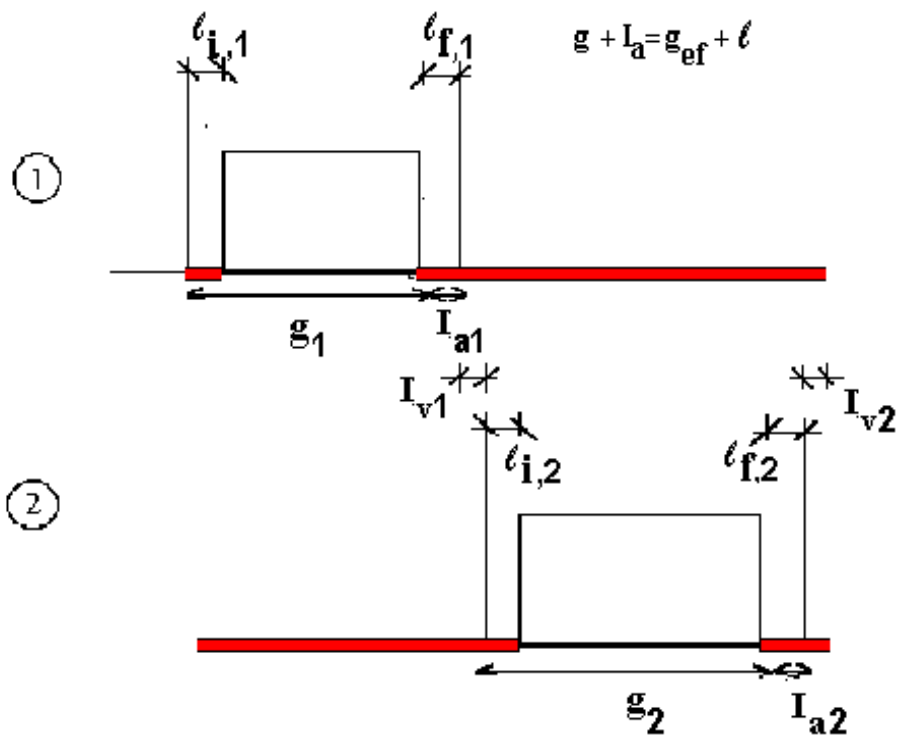
Tempo morto: é o tempo perdido no início e término do movimento

$$l = l_i + l_f = g + I_a - g_{ef}$$

Tempo perdido total: é o tempo morto mais o tempo de vermelho total de limpeza na mudança para o estágio seguinte

$$I_1 = l + I_v$$

representação equivalente: $g_{ef} + r_{ef} = t_c$



Capacidade: é o fluxo máximo possível de veículos numa aproximação, ou grupo de tráfego, nas condições existentes de via, tráfego e sinalização (tempos de semáforo).

$$C = \frac{g_{ef}}{t_c} \cdot s$$

$u = \frac{g_{ef}}{t_c}$ é a taxa de verde

$X = \frac{Q/S}{g_{ef}/t_c}$ é a razão volume / capacidade

Taxa de solicitação de um grupo de tráfego: é a razão entre o fluxo de tráfego observado e o fluxo de saturação no grupo de tráfego.

$$y = \frac{Q}{S} \quad \therefore \quad X = \frac{y}{u} \quad (!)$$

para grupo de tráfego i deve-se ter

$$Q_i \cdot t_c \leq S_i \cdot g_{ef}^i$$

$$\text{ou seja, } g_{ef}^i \geq \frac{Q_i}{S_i} \cdot t_c = y_i \cdot t_c$$

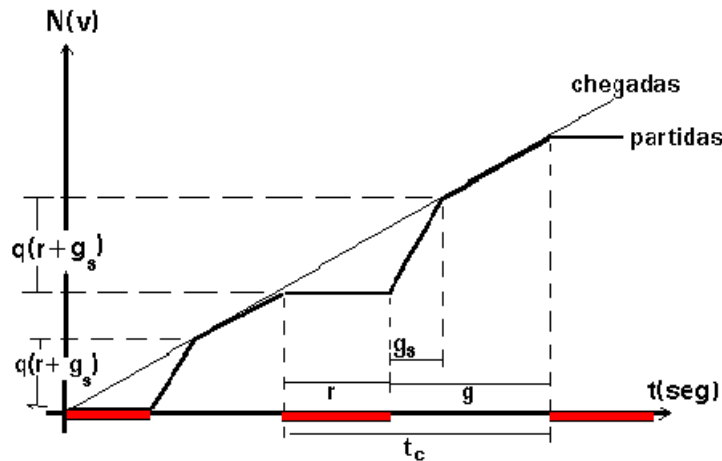
a taxa de solicitação indica a proporção mínima do ciclo que deve ser verde efetivo para o grupo de tráfego ter $Q < C$ (é a medida de necessidade de verde efetivo do grupo)

uma relação entre verde e vermelho efetivos para um dado grupo de tráfego (e, portanto, de um tempo de ciclo) determina o grau de saturação para cada nível de demanda

$$u = \frac{g_{rf}}{t_c} = \frac{g_{rf}}{g_{ef} + r_{ef}} \quad \therefore \quad X = \frac{y}{u} \Rightarrow g_{ef} = \frac{y}{X} \cdot t_c = \frac{y}{X - y} \cdot r_{ef} \quad \text{ou} \quad \frac{g_{ef}}{r_{ef}} = \frac{y}{X - y}$$

Atraso e Fila em aproximações controladas por semáforos:

Chegadas regulares e uniformes: $q = Q \leq C$



g_s é tal que $(r + g_s) \cdot q = g_s \cdot s \Rightarrow g_s = \frac{q/s}{1 - q/s} \cdot r = \frac{y}{1 - y} \cdot r \therefore r + g_s = \frac{r}{1 - y}$

a fila máxima de veículos parados é $n_{\max} = q \cdot r$ e a extensão máxima afetada pela fila (incluindo seu crescimento durante) é $z_m = \frac{n_{\max} \cdot l_v}{1 - y}$

o atraso total por ciclo é $D_c = n_{\max} \cdot \frac{(r + g_s)}{2} = \frac{q \cdot r^2}{2 \cdot (1 - y)} = \frac{q \cdot t_c^2 (1 - u)^2}{2 \cdot (1 - y)}$

o total de veículos por ciclo é $N_c = q \cdot t_c \therefore d_{ru} = \frac{t_c \cdot (1 - u)^2}{2 \cdot (1 - y)}$ ou $\frac{(1 - u)}{2 \cdot (1 - u \cdot X)} \cdot r$

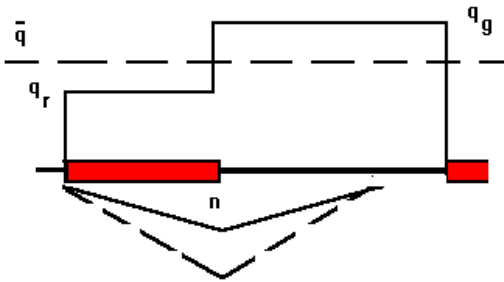
que é chamado de atraso determinístico d_{ru} regular e uniforme, isto é:

$$d_{ru} = \frac{(1 - u)^2}{2 \cdot (1 - y)} \cdot t_c \text{ (dado } u, \text{ cresce com o tempo de ciclo !)}$$

tendo-se $d_{ru} = \frac{(1 - u)}{2} \cdot t_c = \frac{r}{2}$ para $X=1$ (que equivale a $u = y$)

e também para $X > 1$ (sempre passarão apenas $C = u \cdot S < Q$) !

Chegadas regulares, em pelotões: chegadas não são uniformes !



$$q_r \cdot r + q_g \cdot g = \bar{q} \cdot t_c \Rightarrow$$

$$R_q \frac{r}{t_c} + G_q \frac{g}{t_c} = P_r + P_g = 1, \text{ onde}$$

$$\text{razão de fluxo: verde } G_q = \frac{q_g}{q}$$

$$\text{fração de fluxo: verde } P_g = \frac{q_g \cdot g}{q \cdot t_c}$$

$P_g = G_q \cdot u$ e $P_r = R_q \cdot (1-u)$ e com fluxo uniforme $G_q = R_q = 1$, $P_g = u$, $P_r = 1-u$

$$g'_s \text{ é tal que } r \cdot q_r + g'_s \cdot q_g = g'_s \cdot s \Rightarrow g'_s = \frac{q_r / s}{1 - q_g / s} \cdot r \therefore r + g'_s = \frac{1 - (G_q - R_q) \cdot y}{1 - G_q \cdot y} \cdot r$$

$$\text{a fila máxima de veículos parados é } n'_{\max} = q_r \cdot r = (1 - P_g) \cdot q \cdot t_c = \frac{1 - G_q \cdot u}{1 - u} \cdot n_{\max} \text{ e}$$

$$\text{a extensão máxima afetada pela fila } z'_m = \frac{n'_{\max} \cdot l_v}{1 - G_q \cdot y} = \frac{1 - G_q \cdot u}{1 - G_q \cdot y} \cdot \frac{1 - y}{1 - u} \cdot z_m$$

$$\text{o atraso médio é } d = \frac{D_c}{N_c} \text{ com } D_c = n'_{\max} \cdot \frac{(r + g'_s)}{2} = (1 - P_g) \cdot q \cdot t_c \cdot \frac{1 - (G_q - R_q) \cdot y}{2 \cdot (1 - G_q \cdot y)} \cdot r$$

$$\therefore d'_r = \frac{1 - G_q \cdot u}{2} \cdot \frac{1 - (G_q - R_q) \cdot y}{1 - G_q \cdot y} \cdot (1 - u) \cdot t_c = \frac{1 - y}{1 - u} \cdot \frac{1 - G_q \cdot u}{1 - G_q \cdot y} \cdot [1 - (G_q - R_q) \cdot y] \cdot d_{ru}$$

$$\text{tendo-se } d'_r = [1 - (G_q - R_q) \cdot u] \cdot \frac{r}{2} \text{ para } X=1 (u = y) \text{ e também } X > 1 !$$

$$\text{fator de progressão: } d_r = \text{PF} \cdot d_{ru} \therefore \text{PF} = \frac{1 - y}{1 - u} \cdot \frac{1 - G_q \cdot u}{1 - G_q \cdot y} \cdot [1 - (G_q - R_q) \cdot y]$$

$$\text{HCM/97, 2000: } \text{PF} = \frac{1 - G_q \cdot u}{1 - u} \cdot f_p \therefore f_p = \frac{1 - y}{1 - G_q \cdot y} \cdot [1 - (G_q - R_q) \cdot y]$$

onde f_p é um fator de ajuste que também considera particularidades do perfil de chegadas no início ou final do verde e vermelho.

Chegadas aleatórias: flutuações na demanda e também capacidade**fórmulas estacionárias:** somente efeito da aleatoriedade

$$\bar{d}_s = \frac{\kappa}{C} \cdot \frac{X}{1-X}, \text{ onde } \kappa = \frac{1}{2} \cdot (v_h^2 + v_s^2)$$

efeito entre ciclos: fila residual mesmo quando $q < C$!
pouco afetada pela existência de pelotões (ou não) !

fórmulas dinâmicas: (simplificadas para período T_p com $n_i=0$)

inclui termos correspondentes à aleatoriedade e à sobre-demanda

$$\bar{d}_s = \frac{T_p}{4} \cdot X^n \cdot \left[\sqrt{A^2 + B} + A + \delta_0 \right] \text{ para } X > X_0 \text{ (0 caso contrario)}$$

onde $A = (X - 1)$ e $B = \frac{\alpha \cdot (X + \beta)}{N_{\max}}$, com $N_{\max} = u \cdot S \cdot T_p = C \cdot T_p$ ($n_{\max} = S \cdot g$)

	n	δ_0	α	β	X_0	comentário
TRRL	0	$-2 \cdot \frac{\kappa}{N_{\max}}$	$4 \cdot \kappa$	$1 + \frac{\kappa}{N_{\max}}$	0	κ =aleatoriedade
HCM/85	2	0	$16 \cdot T_p$	0	0	$T_p = 0,25$ h (15 min.)
ARRB	0	0	12	$-(0,67 + 6 \cdot n_{\max})$	$0,67 + 6 \cdot n_{\max}$	
HCM/97, 2000	0	0*	$8 \cdot k \cdot I$	0	0	$k \cdot I$ =aleatoriedade, controlador, ...

* Obs.: há também um termo relacionado com a fila inicial, não incluído no sobre-atraso.

em geral, pode-se desprezar a fila aleatória para $X < 0,5$ pelo menos;
o atraso regular deve ser calculado com $X=1$ também para sobre-demanda.

Fórmulas de fila generalizadas: extensão aplicada às filas !

obtenção do atraso $\bar{d} = d_r + d_s$, sendo $d_r = \frac{n_r}{q}$ e

$$d_s = \frac{n_s}{q} \text{ (para } X < 1) \text{ ou } d_s = \frac{n_s}{C} \text{ (para } X > 1, \text{ transitório)}$$

Outras medidas de desempenho:

de forma correspondente, outras medidas de eficiência da operação podem ser calculadas para cada uma das hipóteses ou casos:

⇒ número médio de paradas por veículos:

$$\text{determinístico uniforme: } p_r = \frac{q \cdot (r + g_s)}{q \cdot t_c} = \frac{1 - u}{1 - y} \quad (\text{para } X < 1)$$

$$\text{em pelotão: } p_r = \frac{1 - G_p \cdot u}{1 - G_p \cdot y} \quad (\text{para } X < 1)$$

$$\text{estocástico, generalizado: } p = p_r + p_s = p_r + \frac{d_s}{t_c} \quad (\text{para qualquer } X)$$

calculadas admitindo paradas múltiplas (paradas ≠ veículos parados), sem distinguir paradas totais e paradas parciais (redução de velocidade diante da fila, sem necessidade de parada)

⇒ fila máxima (média) no início do verde:

$$\text{determinístico, uniforme: } n_r^{\max} = q \cdot r \quad (\text{media: } \bar{n}_r = \frac{q \cdot r}{2} \cdot \frac{1 - u}{1 - y}) \quad \text{para } X < 1$$

$$\text{com pelotões: } n_r^{\max} = \frac{1 - G_p \cdot u}{1 - u} \cdot q \cdot r \quad \text{para } X < 1$$

$$\text{estocástico, generalizado: } n_{\max} = n_r^{\max} + n_s = n_r^{\max} + C \cdot d_s$$

Atraso de congestionamento e de controle: $d = d_r + d_s = d_m + d_q$

⇒ atraso mínimo pode ser calculado com a probabilidade de chegar no vermelho e a espera média no vermelho (sem filas):

$$\text{com chegadas regulares: } d_m = \frac{q_r \cdot r}{\bar{q} \cdot t_c} \cdot \frac{r}{2} = \frac{(1 - G_p \cdot u) \cdot (1 - u)}{2} \cdot t_c < d_r$$

⇒ atraso de congestionamento incorpora uma parcela do atraso determinístico

$$d_r - d_m = \frac{y}{2} \cdot \frac{(1 - G_p \cdot u)(1 - u)}{1 - G_p \cdot y} \cdot t_c \quad (\text{efeito das filas, que é função da demanda}) \quad e$$

todo o atraso aleatório ou devido à sobre-demanda: $d_q = (d_r - d_m) + d_s$

⇒ sincronização: afeta tanto o atraso mínimo quanto a parcela determinística do atraso de congestionamento, mas não afeta a capacidade nos semáforos (há uma pequena redução da aleatoriedade mas não da sobre-demanda) e, portanto, só é bastante efetiva em períodos não saturados !

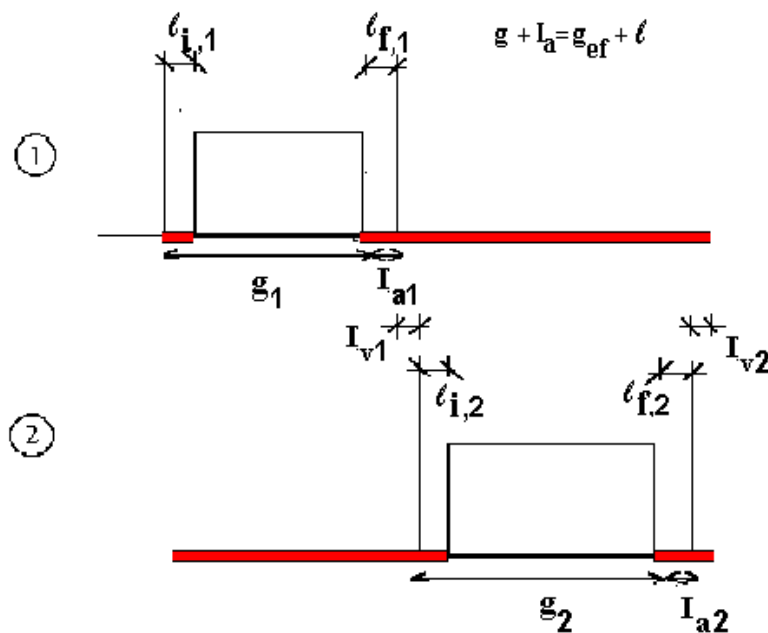
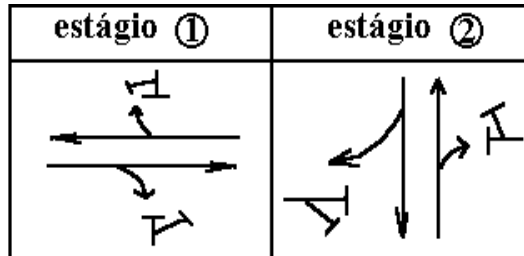
Atraso total e atraso parado: paradas \neq redução de velocidade apenas

fator de correção simplificado: $d_p = 0,77 \cdot d = \frac{d}{1,3}$, foi usado pelo HCM/85

alternativa: $\frac{d_r}{d_{Pr}} = \frac{r^2}{(r - d_{ba})^2}$ para componente determinístico (uniforme, $x < 1$)

e $\frac{d_s}{d_{Ps}} = \frac{y \cdot t_c}{y \cdot t_c - d_{ba} \cdot u}$ para componente de sobre-demanda ($x > 1$, uniforme)

Operação das Interseções Semaforzadas (Ciclo)



no ciclo:
$$\sum_k (g^{ck} + I_a^{ck} + I_v^{ck}) = t_c \Rightarrow \sum_k (g_{ef}^{ck} + l + I_v^{ck}) = t_c \Rightarrow \sum_k (g_{ef}^{ck} + I_\ell^{ck}) = t_c$$

e
$$u = \frac{g_{ef}}{t_c} \Rightarrow \sum_k (u_{ck} \cdot t_c + I_\ell^k) = t_c \therefore t_c = \frac{t_p}{1 - U} \Leftrightarrow G_{ef} = t_c - t_p$$

onde: $t_p = \sum_k I_\ell^{ck}$ é a soma dos tempos perdidos totais nas mudanças de estágio;

$U = \sum_k u_k$ é a taxa de verde total (de toda a seqüência de estágios) no ciclo.

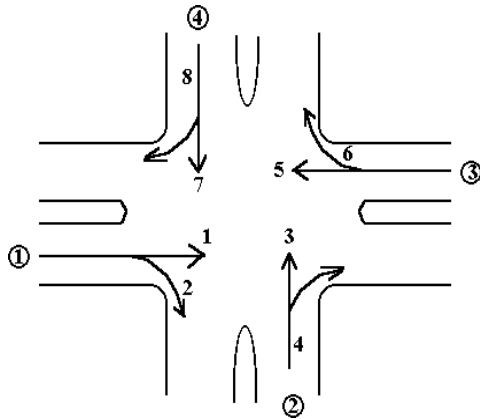
(em certos casos, os entreverdes podem variar para cada grupo de tráfego).

portanto, a taxa de verde efetivo global máxima em uma interseção é $U_{m\acute{a}x} = 1 - \frac{t_p}{t_{c,m\acute{a}x}}$

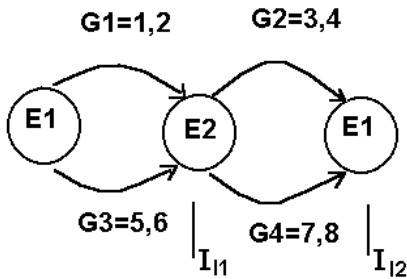
onde $t_{c,m\acute{a}x}$ é definido para acomodar expectativas e restrições diversas.

Restrições Operacionais (demanda e capacidade no Ciclo)

Taxa de ocupação crítica: é a taxa de ocupação do grupo de tráfego mais crítico entre os que operam simultaneamente em um estágio (ou sequência de estágios com superposição de movimentos).



estágio ①	estágio ②



estagio1 : $y_{e1} = \max \{y_{12}, y_{56}\}$

estagio2 : $y_{e2} = \max \{y_{34}, y_{78}\}$

para garantir $Q > C$ para todos os movimentos no semáforo deve-se ter:

$$g_{ef}^i \geq \frac{Q_i}{S_i} \cdot t_c = y_i \cdot t_c$$

Taxa de ocupação da faixa crítica: é a taxa de ocupação da faixa de tráfego com maior taxa de solicitação, considerando a interação entre os grupos de tráfego que a utilizam em um estágio ou sequência de estágios

interação: uso compartilhado, bloqueio de um movimento por outro, ...
depende da distribuição dos fluxos entre faixas (em equilíbrio) !

uso desigual das faixas: estacionamento, pedestres, conversões à direita ou à esquerda (permitida ou protegida), ultrapassagens, ...

Tempo de ciclo mínimo: com $Q=C$ nos movimentos críticos deve-se ter

$$g_{ef}^k = y_{ck} \cdot t_c^{\min}$$

$$\sum_k (g_{ef}^k + I_l^{ck}) = t_c^{\min} \Rightarrow \sum_k (y_{ck} \cdot t_c^{\min} + I_l^k) = t_c^{\min}$$

$$\therefore t_c^{\min} = \frac{t_p}{1 - Y_c}$$

onde: $t_p = \sum_k I_l^{ck}$ é a soma dos tempos perdidos totais dos grupos

de tráfego críticos em cada estágio.

$Y_c = \sum_k y_{ck}$ é a soma das taxas de ocupação em cada estágio (do grupo de tráfego crítico).

se não há superposição da operação entre os estágios, pode-se identificar o grupo de tráfego crítico analisando separadamente os que operam em cada estágio k e, em princípio, o grupo de tráfego mais crítico é o que tem maior a taxa de solicitação:

$$y_{ck} = \max\{y_i\}$$

a taxa de ocupação crítica de um estágio (ou sequência de estágios) traduz a necessidade de verde efetivo dos grupos de tráfego em necessidade de verde efetivo dos estágios.

o tempo de verde efetivo total disponível com um tempo de ciclo t_c é $G = t_c - t_p$;

como t_p é constante, aumentando o tempo de ciclo tem-se uma taxa de verde efetivo global maior ($U = G/t_c$) e uma relação volume/capacidade global menor ($X_c = Y_c/U$)

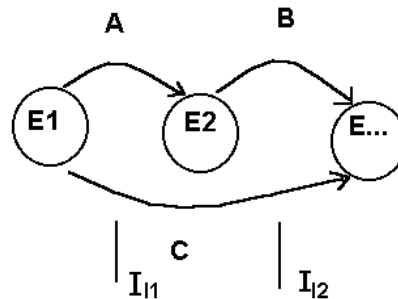
exemplo: $y_{12} = 0,20$, $y_{34} = 0,40$, $y_{56} = 0,30$, $y_{78} = 0,30$, $I_{11} = 4\text{seg}$, $I_{12} = 2\text{seg}$

no estagio1 : $y_{e1} = \max\{y_{12}, y_{56}\} = 0,30$

no estagio2 : $y_{e2} = \max\{y_{34}, y_{78}\} = 0,40$

$$Y_c = y_{e1} + y_{e2} = 0,70 \text{ e } t_p = I_{11} + I_{12} = 6\text{seg} \therefore t_c^{\min} = \frac{t_p}{1 - Y_c} = \frac{6}{1 - 0,70} = 20\text{seg}$$

se há superposição da operação entre os estágios, deve-se identificar o grupo de tráfego crítico analisando seqüências alternativas de movimentos que cobrem o mesmo período quanto às taxas de solicitação e aos tempos perdidos observados por cada seqüência alternativa.



E1 e E2 tem de ser examinados em 2 casos:

⇒ caso em que A e B determinam o dimensionamento:

a taxa de solicitação é $y_A + y_B$
o tempo perdido é $I_1^1 + I_1^2$

⇒ caso em que C determina o dimensionamento:

a taxa de solicitação é y_C
o tempo perdido é I_1^2 apenas

o caso crítico é o que determina o maior tempo de ciclo.

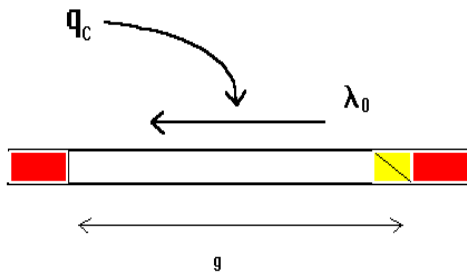
em qualquer situação, as interseções semaforizadas com taxa de solicitação total maior que $1 - \frac{t_p}{t_{c,max}}$ operarão em condições saturadas (o que decorre não apenas da demanda mas também dos fluxos de saturação e do plano de operação adotado).

[VER EXERCÍCIO REPARTIÇÃO DE CAPACIDADE *](#)

Casos especiais

fluxos de saturação podem depender do dimensionamento (tempos) do semáforo !

- movimentos permitidos (não protegidos...)



fluxo oposto saturado: $\lambda_0 = S_0$:

$$g_{s0} = \frac{q_0 r}{S_0 - q_0}, S_p = 0$$

fluxo oposto não-saturado: $\lambda_0 = q_0$

$$S_u = S_p = \frac{1 - \beta_1 \lambda_0}{e^{(\alpha - \beta_1) \lambda_0} (1 - e^{-\beta_2 \lambda_0})} \cdot q_0$$

(Tanner)

veículos no final do verde: n_f

verde efetivo do movimento permitido:

$$g_u = g_p^{ef} = g^{ef} - g_{s0} \quad e \quad \tilde{g}_p^{ef} = g_p^{ef} + \frac{n_f}{S_c}$$

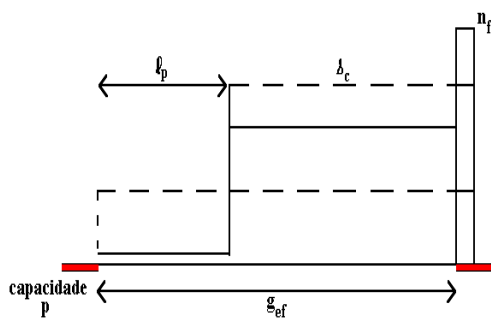
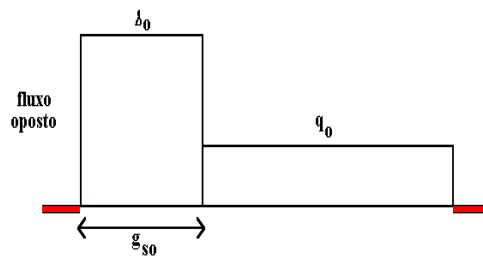
(tempo perdido adicional $\ell_p = g_{s0}$)

veículos por ciclo: $n_p = S_u g_u + n_f$

$$\therefore \bar{S} = \frac{n_p}{g} = \frac{g_u}{g} \cdot S_u + \frac{n_f}{g}$$

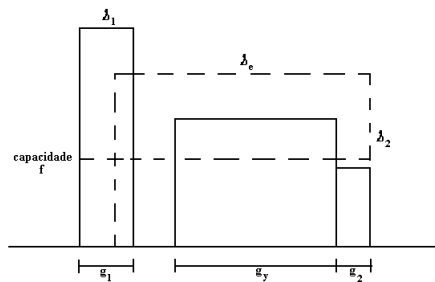
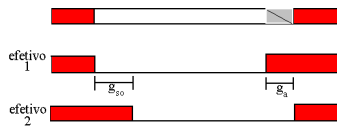
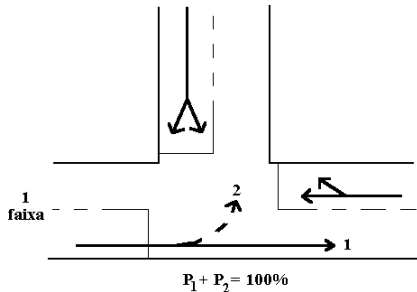
capacidade para movimento permitido:

$$C_p = C_g + C_f = \frac{n_p}{t_c} = \frac{S_u \cdot g_u}{t_c} + \frac{n_f}{t_c}$$



pressupõe: fluxo direto em movimento e fila para conversão à esquerda abrigada

- integração entre grupos (faixas) de tráfego



em g_s , 2 pode bloquear 1, depois de

$$\bar{a}_1 = \frac{P_1}{1 - P_1} (1 - P_1^{m_1}) \text{ veiculos } (m_1 = S_1 \cdot g_{so})$$

em $g_y = g^{ef} - g_{so}$, 1 e 2 estão juntos com

$$s_e = \frac{q_1 + q_2}{Y_1 + Y_2} (\bar{a}_y = S_e \cdot g_y \text{ veiculos})$$

em g_a , 1 pode bloquear 2, depois de

$$\bar{a}_2 = \frac{P_2}{1 - P_2} (1 - P_2^{m_2}) \text{ veiculos } (m_2 = n_f)$$

$$n_f = \frac{I_e}{2,5} \text{ (} I_e \text{ tempo de vermelho total excedente)}$$

portanto, $\bar{S} = \frac{\bar{a}_1 + \bar{a}_y + \bar{a}_2}{g_s + g_y + g_a}$ (médio)

tempos perdidos adicionais:

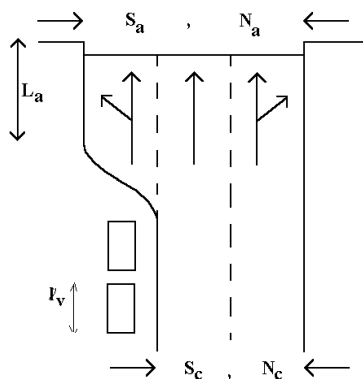
$$l_1 = g_s - g_1, \text{ no começo } (g_1 = \frac{\bar{a}_1}{S_1}), \text{ e}$$

$$l_2 = g_a - g_2, \text{ no final } (g_2 = \frac{\bar{a}_2}{S_2})$$

pressupõe: que o primeiro veículo detido em 1 (ou 2) bloqueia o fluxo 2 (ou 1)

que existe apenas uma faixa na qual todos os grupos interagem

- faixas com comprimento reduzido



no.veículos na faixa reduzida: $N_a = \frac{L_a}{l_v} \cdot \Delta n$
 (Δn : variação no no.de faixas)

S_a =fluxo de saturação com faixa reduzida

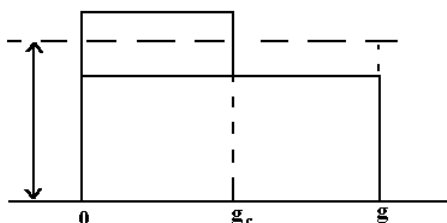
S_c =fluxo de saturação sem faixa reduzida

tempo para escoar fila na faixa reduzida:

$$g_a = \frac{N_a}{\Delta S}, \Delta S = S_a - S_c$$

se $g < g_a$ o fluxo de saturação é S_a ($L_a > L_c$)

senão o fluxo de saturação é $\bar{S} = S_c + \frac{N_a}{g}$



L_c : comprimento da faixa que pode escoar os veículos com aproveitamento total do verde:

$$N_c = \Delta S \cdot g \Rightarrow L_c = \frac{N_c \cdot l_v}{\Delta n}$$

- outros casos:

- fluxo de saturação variável (verde >30seg., restrições à montante/jusante);
- faixa de fuga canalizada ou com movimento permitido no vermelho (RTOR);
- baía de conversão ou canteiro para acomodar fila abrigada (sem bloqueio).
- processo iterativo: sempre que \bar{s} depende dos tempos de semáforo
- fazer distribuição dos fluxos por faixa (igual a x ou d)

VER EXERCÍCIO MINIMIZAÇÃO DE ATRASOS

Comentários sobre os Procedimentos Existentes

⇒ método do DENATRAN/79 baseado em estudos ingleses (Webster&Cobbe/66)

- . estima fluxo de saturação para aproximação (função da largura), não por faixa;
- . tratamento grosseiro de casos especiais (faixa reduzida, conversão permitida);
- . não considera interações entre grupos de tráfego numa mesma aproximação;
- . não considera detalhadamente interferências locais (efeito de -15% a +20%);
- . apesar de largamente utilizado no Brasil, traz resultado ruim em muitos casos;
- . baseado em estudo antigo (já revisado pelo estudo de Kimber&alli/86);
- . Kimber&alli/86 estima fluxo de saturação por faixa, trata melhor conversões permitidas, mas produz valores bastante maiores (necessário validação).

⇒ Webster&Cobbe/66 é compatível com fórmula de dimensionamento de Webster (semi-empírica, baseada em fórmulas de atraso estacionárias)

⇒ métodos do HCM/85 e HCM/97 permitem eliminar a maior parte das deficiências

- . HCM considera detalhadamente interferências locais (pedestres, paradas, ...);
- . HCM/97 fornece parâmetros básicos da avaliação das interferências;
- . HCM tratam interação entre grupos de tráfego e conversões permitidas;
- . HCM trata esquemas complexos com operação protegida e também permitida;
- . HCM/97 utiliza procedimentos mais adequados (correções metodológicas);
- . HCM utiliza fórmulas de atraso dinâmicas (admite período de pico de 15 min);
- . HCM considera o efeito da coordenação semafórica e do tipo de controlador;
- . HCM/97 usa fórmulas/parâmetros mais adequados (correções metodológicas);
- . HCM avalia nível de serviço (medida de eficácia é o atraso médio parado);
- . HCM produz estimativas mais conservativas (menores que valores usuais).

⇒ existem outros métodos (em particular o incorporado ao software SIDRA).

⇒ não tratam dos efeitos das intervenções sobre a segurança de tráfego e dos efeitos sobre os fluxos de pedestres (incluindo atrasos, acidentes, segregação).

⇒ aplicação criteriosa dos métodos existentes é mais recomendável ...

[VER INTERSEÇÕES SEMAFORIZADAS](#)

ANÁLISE DE CORREDORES URBANOS

Análise de Corredores Arteriais

⇒ em geral, baseada apenas no tempo total de viagem: $T = \frac{L}{V} + d_p$ (ou $\bar{V} = \frac{L}{T}$)
variáveis V, d_p determinadas para cada elemento distinto

velocidade de percurso: função da velocidade de fluxo livre, nível de utilização e espaçamento entre interseções

velocidade de fluxo livre: fatores físicos, ambientais e operacionais
⇒ síntese da expectativa do usuário

atrasos: função das características das interseções (análise específica)

em geral, as vias arteriais somente são afetadas por semáforos (as arteriais, em geral, são as vias prioritárias em interseções não semaforizadas)

⇒ existem diversos outros aspectos importantes (como suporte às atividades, liberdade de manobra, segregação, poluição ambiental, segurança, ...)

Análise Integrada de Corredores

⇒ corredor: vias e modos paralelos e competidores entre os mesmos pontos.
análise integrada: repartição dos fluxos entre alternativas (inclusive modos);
alterações nos deslocamentos (ou seus horários);
interação entre trechos, modos, períodos (curto prazo).

⇒ procedimentos similares aos utilizados em modelos de simulação de tráfego ou; de planejamento de transportes (dependendo do refinamento da análise dos elementos da rede viária e da representação espacial em zonas de tráfego).

⇒ medidas de congestionamento e de qualidade de operação.

Comentários sobre os procedimentos

- ⇒ os procedimentos podem permitir a análise consistente de segmentos arteriais;
- ⇒ U.S.HCM é a fonte básica (outras fontes são pouco sistemáticas);
- ⇒ considera apenas efeitos sobre o tempo de viagem (e não acidentes, poluição, ...);
- ⇒ medida de eficácia é a velocidade média global (e não tempo de viagem);
- ⇒ não detalha, exceto em semáforos, contribuição de interferências locais ...
(estacionamento permitido, acessos lindeiros, fluxos de pedestres, ...);
- ⇒ não detalha influência de tratamentos de circulação ...
(canalização dos fluxos de pedestres, utilização de vias de mão-única, retornos e conversões permitidas/proibidas, ...);
- ⇒ não considera efeito do fluxo sobre a velocidade operacional entre interseções;
- ⇒ restrições físicas e proibições não afetam diretamente o nível de serviço.
- ⇒ não há recomendações para operação dos sistemas arteriais:
 - . métodos para projetar sistemas de operação e controle de tráfego;
 - . métodos para coordenação de sistemas de tráfego em área ou corredor;
 - . métodos para planejamento da circulação (sentido, repartição, proibição);
 - . outras formas de otimizar o desempenho de sistemas arteriais.
- ⇒ novos procedimentos para análise integrada de corredores e áreas no HCM2000;

[VER EXERCÍCIO BALANCEAMENTO III *](#)

EXERCÍCIOS SELECIONADOS