ESCOLA POLITÉCNICA - UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE TRANSPORTES

ENGENHARIA DE TRÁFEGO

2. INTRODUÇÃO À TEORIA DO FLUXO DE TRÁFEGO

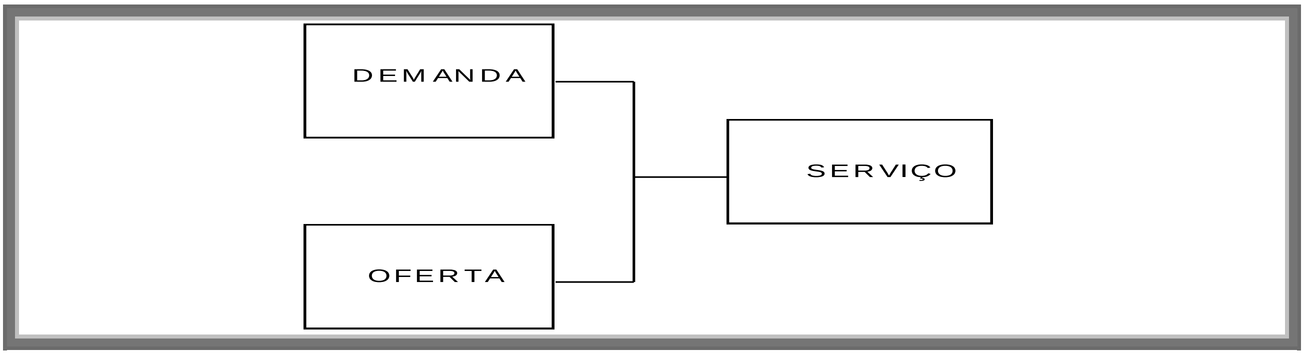
Eng.Hugo Pietrantonio, D.Sc.
Professor, Departamento de Engenharia de Transportes-EPUSP

TEORIA DO FLUXO DE TRÁFEGO 1

VARIÁVEIS DE DEMANDA 1
DEMANDA POR DESLOCAMENTO 1
OUTRAS DEMANDAS 2
VARIÁVEIS DE SERVIÇO 3
VELOCIDADE 3
ATRASO (DEMORA) 3
OUTRAS VARIÁVEIS 4
IMPEDÂNCIA DE VIAGEM (CUSTO GENERALIZADO) 4
VARIÁVEIS DE OFERTA 5
CONDIÇÕES DE OFERTA 5
CAPACIDADE DE TRÁFEGO 6
OUTRAS CAPACIDADES 6
VELOCIDADE DE FLUXO LIVRE (VFL) 8
OUTRAS VARIÁVEIS DE OFERTA 8
CARACTERIZAÇÃO DAS VARIÁVEIS 9
FLUTUAÇÃO DA DEMANDA (OU FLUXO, CAPACIDADE ...): 9
"DISTRIBUIÇÃO" DA DEMANDA (OU CAPACIDADE, ...): 11
VER EXERCÍCIO VOLUME DE PROJETO 11
COMPOSIÇÃO DA DEMANDA: 12
VER EXERCÍCIO EQUIVALENTE/COMPOSIÇÃO 13
VER EXERCÍCIO CAPACIDADE COMPARTILHADA 14
CARÁTER ALEATÓRIO DO TRÁFEGO 15
VER EXERCÍCIO BRECHA ALEATÓRIA 17
VER EXERCÍCIO TIPOS DE CHEGADAS 17
VER EXERCÍCIO PELOTÕES EM SEMÁFOROS 18
RELAÇÕES BÁSICAS GERAIS 21
VELOCIDADE DE TRÁFEGO 21
VER EXERCÍCIO CIRCUITO 21
EQUAÇÃO DE CONTINUIDADE DE TRÁFEGO 22
VER EXERCÍCIO OBSERVADOR EM MOVIMENTO * 25
EQUAÇÃO FUNDAMENTAL: RELAÇÃO COMPORTAMENTAL. 30
VER EXERCÍCIO CARRO-SEGUIDOR 30
VER EXERCÍCIO ESTIMATIVA DE CAPACIDADE 32
FUNÇÃO DE DESEMPENHO: 33
VER EXERCÍCIO ONDAS DE CONGESTIONAMENTO * 33
ATRASO PARADO E FILAS 34
VER EXERCÍCIO ONDAS INTERMITENTES * 29
VER EXERCÍCIO ATRASOS DE MARCHA 37
COMPONENTES DE ATRASOS/FILAS 30
VER EXERCÍCIO ROTATÓRIA 34
VER EXERCÍCIO FILAS E ATRASOS * 36
FUNÇÃO DE DESEMPENHO 37
NÍVEL DE SERVIÇO 41
INTERAÇÃO DEMANDA X OFERTA (EQUILÍBRIO) 43
VER EXERCÍCIO PEDÁGIOS 44
VER EXERCÍCIO ANÁLISE OPERACIONAL * 44

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

2 TEORIA DO FLUXO DE TRÁFEGO



VARIÁVEIS DE DEMANDA

demanda pode ser medida em tráfego (veículos) transporte (bens ou pessoas), atividades (residentes, empregos), ...

Demanda por deslocamento

⇨ **volume de tráfego:** nº. veículos contados (N_T) em uma seção (período T).

Volume Horário: VH (veículos/hora).
intervalo médio entre passagens de veículos no período ($\bar{h}$):

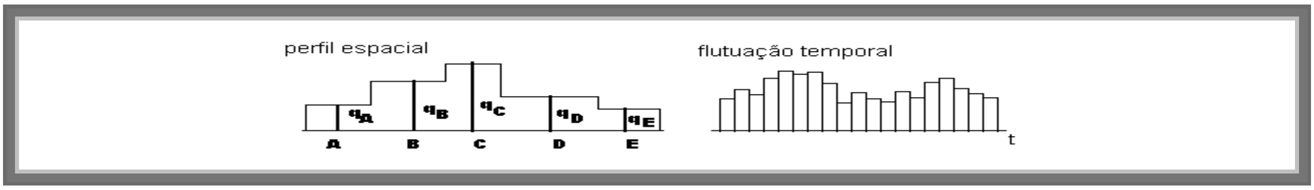
$$\bar{h} = \frac{3600}{VH} \text{(seg)}$$

⇨ **fluxo de tráfego:** taxa de passagem de veículos (q) em uma seção (e período).

$$q_T \text{ (veículos/hora ou veículos/segundo)} = \frac{\text{nº de veículos}}{\text{duração do sub-período}} = \frac{N_T}{T}.$$

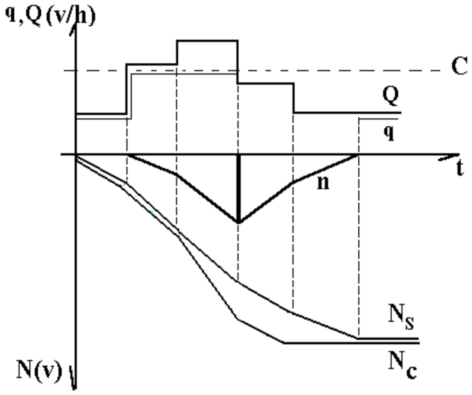
cada sub-período de medição tem um fluxo próprio (diferente de VH).
intervalo médio entre passagens de veículos no sub-período ($\bar{\bar{h}}$):

$$\bar{\bar{h}} = \frac{1}{q} \text{ (seg)}$$



⇨ **demanda:** volume, fluxo ⇒ veículos que passam;
demanda ⇒ veículos que desejam passar;
demanda em volume (DH) ou fluxo (Q).

limitação de capacidade ⇒ formação de filas: $n_t = n_0 + (Q - q).t$, $q \leq C$



onde: Q: fluxo de demanda
C: capacidade
q: fluxo observado
N_C:número de chegadas
N_S:número de saídas
n_t: veículos em fila em t

demanda = volume + Δfilas

(DH) (VH) (Δn)

fila = demanda reprimida acumulada

período de congestionamento = $T_{sobredemanda}$ + $T_{recuperação}$

recuperação: dissipação das filas acumuladas na sobre-demanda
(o sistema viário ainda opera com utilização intensa).

exemplo: sobre-demanda $Q_P = 2200$ v/h, $T_P = ½$ hora, $C_P = 2000$ v/h

$\therefore n_T = n_0 + (Q_P - C_P).T_P = 200.0,5 = 100$ veículos ($n_0 = 0$), $q_P = 2000$ v/h

dissipação da sobre-demanda ($n_{Tf} = 0$): $Q_F = 1700$ v/h, $C_F = 2100$ v/h

$\therefore T_F = n_T / (C_F - Q_F) = 100/400 = 0,25$ hora, $q_F = 2100$ v/h, pico: 0,75 hora

para medir a demanda é preciso observar a evolução das filas: $Q = q + \Delta n / T$

Outras demandas

volume de tráfego é medida relacionada à demanda por deslocamento.

medidas de demanda relacionadas com outras funções da via:

circulação, acesso, ambiente urbano,...

movimentos de estacionamento, acesso/egresso;

paradas de estacionamento junto à via;

paradas em pontos de ônibus, embarque/desembarque;

travessias de pedestres, limites de emissões e ruídos.

VARIÁVEIS DE SERVIÇO

Velocidade

global = $\dfrac{\text{distância total O/D}}{\text{tempo total de viagem O/D}}$; O/D = deslocamento origem/destino

de percurso = $\dfrac{\text{distância total O/D}}{\text{tempo de viagem em movimento}}$;

direta = $\dfrac{\text{distância reta O/D}}{\text{tempo total de viagem O/D}}$ (direta global).

⇨ **velocidade de percurso(V):** descreve melhor as condições de operação nos elementos do sistema viário (velocidade em movimento, incorporando restrições da via e do tráfego).

Portanto, $T = \dfrac{L}{V} + d$

$L = L_{DIRETO} + L_{CIRCULA}$

onde: L = distância total O/D;
V = velocidade de percurso
d = atraso total ou em parada

velocidade global: relacionada com qualidade de serviço obtida no sistema viário, que também poderia ser medida pelo tempo total de viagem (T).

velocidade direta: exclui o efeito da circuitação na distância total O/D, aprimorando a medida de qualidade de serviço.

Atraso (demora)

⇨ **atraso parado (**d_P**, em segundos)** = tempo perdido em fila; medida usual.

atraso em marcha: desacelerando e acelerando;
com velocidade restringida;
em desvio em relação à rota direta, ...

atraso total (d**, em segundos)** = tempo real – tempo ideal
inclui aceleração/desaceleração e desvio em relação ao trajeto normal.

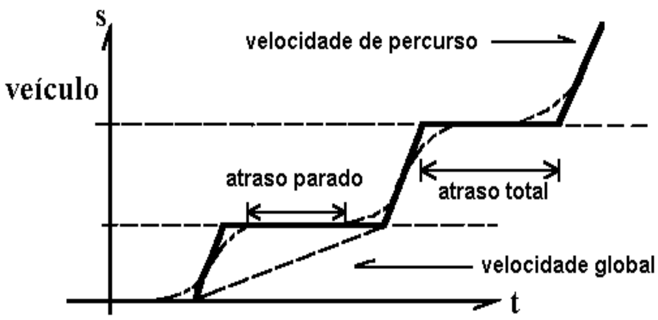
atraso regular X sobre-atraso (d_r **e** d_s**):** separa efeito da demanda regular em cada tipo de controle e da aleatoriedade e sobre-demanda.

atraso fixo, ou mínimo, X variável, ou de fluxo, (d_m**e** d_q**):** separa atraso mínimo, que é função da geometria e tipo de controle apenas, do efeito da interação do tráfego (tipo de controle, aleatoriedade, sobre-demanda).

diversos outros conceitos:

. atraso parado de controle (d_{Pc} ...) ou de congestionamento (d_{Pm} X d_{Pq}).
atraso em marcha geométrico (d_{Mg} ...) ou de interação (d_{Mm} X d_{Mq}).

diagrama espaço-tempo: movimento de um veículo



Outras variáveis

acidentes, conflitos de tráfego, poluição do ar, ruídos;
fluxo de acesso/egresso (atrasos);
movimentos de estacionamento (tempos de busca);
paradas em pontos de ônibus (atrasos);
fluxos de travessia (tempos de travessia);
tarifas (pedágios, estacionamento, ...), custo de viagem (combustível, ...).

Impedância de viagem (custo generalizado)

medida sintética (por viagem): pondera tempo (no veículo, andando, esperando, circulando), e outros atributos como custo, segurança ....

$Cg = C + \nu.T + ...$ equivalente, em geral em unidade monetária ($)
ν: "valor" relativo do tempo ($/h por componente)

(também chamado de custo percebido ou desutilidade da viagem).

considera os diferentes aspectos (pode ponderar diversas parcelas de tempo e custo de forma distinta ou ser expresso em tempo generalizado).

exemplo: tempo de viagem 1,0 h (0,5 h parado), desvio padrão de 20%
combustível $ 1,80, estacionamento $ 5,00, outros $ 1,00
valor do tempo: 2,00 $/h $\therefore$ custo generalizado: 7,80 +.2,00.1h =$ 9,80.

crítica: custo do usuário para uma viagem, não pondera custos externos do transporte (ruído, poluição, ...) e não mede custo econômico ou valor global do serviço obtido (ponderando o número de usuários atendidos).

exemplo: custo social $Cs = Cg + \text{custo não percebido} + \text{custo não usuários}$.

VARIÁVEIS DE OFERTA

Condições de Oferta

⇨ **fluxo contínuo (ou ininterrupto):** condições de operação determinadas por fatores "internos" à corrente de tráfego.

condições de operação resultam somente da interação entre veículos na corrente de tráfego;

corrente de tráfego com prioridade, sem interrupções “externas”.

⇨ **fluxo descontínuo (ou interrompido):** condições de operação determinadas por fatores “externos” à corrente de tráfego.

interrupções periódicas do fluxo causadas por semáforos ou outras correntes de tráfego prioritárias;

condições de operação influenciadas pelo ritmo das interrupções;

interrupções: usualmente ocorrem nas interseções (em nível).

⇨ **regimes de operação:** níveis de interação entre oferta e demanda.

fluxo livre (demanda $Q \ll C$);
congestionamento (demanda $Q \approx C$);
saturação (filas, demanda $Q > C$);
super-saturação (demanda $Q \gg C$) (interferência das filas).

Capacidade de tráfego

⇨ **capacidade:** máximo fluxo que pode normalmente atravessar uma seção em condições existentes de tráfego, geometria e controle, num dado período.

$C = q_{max} \Rightarrow C = \dfrac{1}{h_{min}}$ onde $h_{min} = \bar{\tau}$ é o intervalo mínimo

(média para os diferentes tipos de veículos).

⇨ **variações:**

geometria da via: nº de faixas, largura, rampa, curvatura;
condições locais: tipo de motorista, interferências (pedestres, estacionamento);
composição de tráfego: tipo de veículo, movimentos;
controle de tráfego: sinalizações (prioridade, semáforos), fluxos conflitantes;
outros: acidentes e outros eventos, fatores climáticos como chuva, neblina,...

capacidade real = f(capacidade ideal, correção para fatores intervenientes)
⇑ condições ideais ⇑ condições locais

⇨ **capacidade viária:** máximo atendimento à função deslocamento.
∴ menor ou igual à capacidade de tráfego da via
(restrições econômicas, ambientais, urbanísticas...)

Outras capacidades

capacidade para estacionamento (vagas em lotes privados, estacionamentos privados e públicos, em faixas da via);
capacidade para armazenamento de filas de veículos no tráfego;
capacidade para abrigar veículos parados (acostamentos, baias);
capacidade para paradas junto às vias (servir passageiros);
capacidade das paradas de coletivos (servir passageiros);
capacidade para travessias de pedestres, ...

⇒ fatores interferentes na capacidade viária (para deslocamento).

⇨ **capacidade para fluxo contínuo (C_n):** é a capacidade máxima da via, dada a sua característica física e o tipo de tráfego que utiliza a via.

a capacidade para fluxo contínuo não corresponde à saturação !
$\therefore$ saturação: qualidade de operação ruim perda do potencial de capacidade de tráfego da via.

não há recuperação imediata no tráfego após ocorrência de interrupções...

⇨ **capacidade para fluxo descontínuo (C_d):** é a capacidade máxima da via considerando a influência de fatores externos que interrompem sua operação.

a capacidade para fluxo descontínuo corresponde à saturação !
(mas não à super-saturação !)

interrupções: tempo bloqueado $t_b \Rightarrow$ formação de filas

tempo disponível $t_d \Rightarrow$ dissipação das filas t_s
$\Rightarrow$ operação normal t_n

⇨ **fluxo de saturação:** fluxo que escoa livremente a partir de uma fila contínua com <u>100%</u> do tempo disponível para o movimento.

$$S = \frac{1}{h_s} \neq C$$, onde h_s é o intervalo de saturação

C = capacidade ou fluxo contínuo ($S \leq C$)

(Fluxo de Saturação: Veículos/Horas de Movimento)

$\therefore$ saturação: qualidade de operação ruim (mas fluxo igual à capacidade)
capacidade função dos tempos disponível e perdido $C_d = \alpha.S$ (<<C_n).

super-saturação: filas em um elemento bloqueiam a operação de outros (perda de capacidade em função do bloqueio).

Velocidade de fluxo livre (VFL)

⇨ **VFL:** velocidade média de operação dos veículos de uma via, num dado período, ao utilizar a via sem tráfego na via própria, nas condições existentes de <u>geometria</u> e de <u>controle de tráfego</u>.

$V_f = f[V_L, \text{controle}]$, onde V_L é a <u>velocidade livre de percurso</u> da via;

$V_L = f[V^*, \text{via}]$, onde V^* é a velocidade de operação desejada do tráfego;

$V^* = f[\text{veículos}, \text{hábito e humor dos condutores}, \text{restrições de tempo}]$.

⇨ **efeito da geometria da via:**

largura das faixas, presença de obstruções laterais;
n^0.de faixas (no mesmo sentido, no sentido oposto);
extensão de declive ou aclive (local e trecho anterior);
raio de curvatura, presença de super elevação e sobre-largura;
visibilidade disponível em trechos de via ou interseções.

⇨ **efeito do controle de tráfego:**

densidade de cruzamentos semaforizados (taxa de verde);
densidade de conversões permitidas em semáforos;
densidade de cruzamentos não semaforizados (prioridade ou não);
densidade de conversões à esquerda permitidas não semaforizadas;
densidade de veículos estacionados (e manobras de estacionamento);
densidade de paradas de coletivos (e manobras de paradas);
densidade e freqüência de travessias de pedestres e outros usos locais;
densidade de redutores de velocidade com obstáculos;
limites de velocidade regulamentadas (fiscalização, educação).

cada tipo de veículo tem velocidades de fluxo livre específicas, função de suas características operacionais.

elementos que reduzem capacidade podem também reduzir velocidade de fluxo livre (por exemplo, semáforos) mas não há relação direta entre os efeitos.

Outras variáveis de oferta

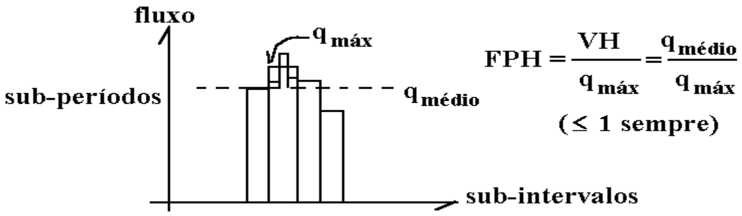
liberdade de acesso dos lotes às vias (restringido, só à direita, total);
liberdade de circulação (retornos, conversões, mãos de direção), ...

CARACTERIZAÇÃO DAS VARIÁVEIS

Variação no espaço, Flutuação no tempo, Composição (classes, tipos, ...)

Flutuação da demanda (ou fluxo, capacidade ...):

⇨ **flutuação nos sub-períodos:** aleatória ⇒ volume e fator de pico–hora (FPH).



quanto menor a duração do intervalo, maior $q_{máx}$ e menor FPH.

usual: FPH para 15 minutos (5minutos, eventualmente)
função do tipo de elemento da infra-estrutura viária.

exemplo:

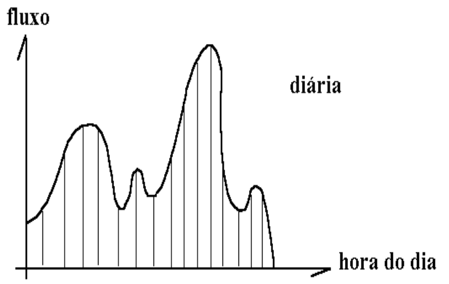
duração do período	volume 5 minutos	volume 15 minutos	volume horário
07:00/05	100		
07:05/10	120		
07:10/15	110	330	
07:15/30		280	
07:30/45		300	
07:45/00		310	1220

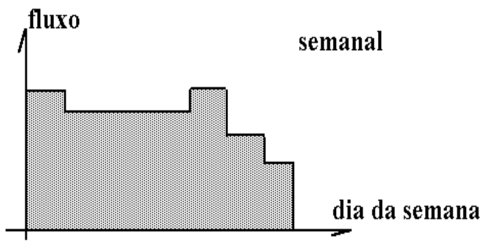
$$q_{5,max} = \frac{120}{5/60} = 1440 \text{ v/h e } FPH_5 = \frac{1220}{1440} = 0{,}8472$$

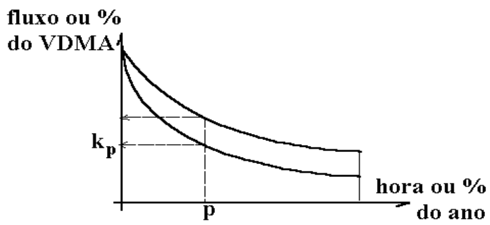
$$q_{15,max} = \frac{330}{15/60} = 1320 \text{ v/h e } FPH_{15} = \frac{1220}{1320} = 0{,}9242$$

$$q_{1h,max} = \frac{1220}{1} = 1220 \text{ v/h } (= VH = \bar{q}_{15} = \bar{q}_5)$$

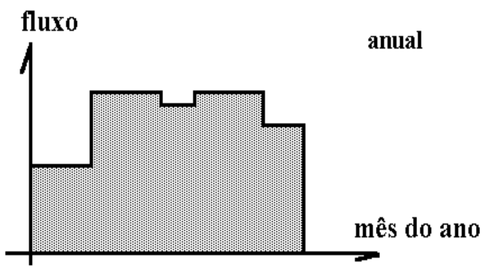
⇨ **flutuação entre períodos:** sistemática ⇒ VDMA e curva de utilização
(VDMA é o Volume Diário Médio Anual)







curva de utilização: ordenação das horas de maior utilização num ano.



volume de projeto: $VP_p = K_p \cdot VDMA$ e fluxo de projeto: $q_p = \dfrac{VP_p}{FPH}$

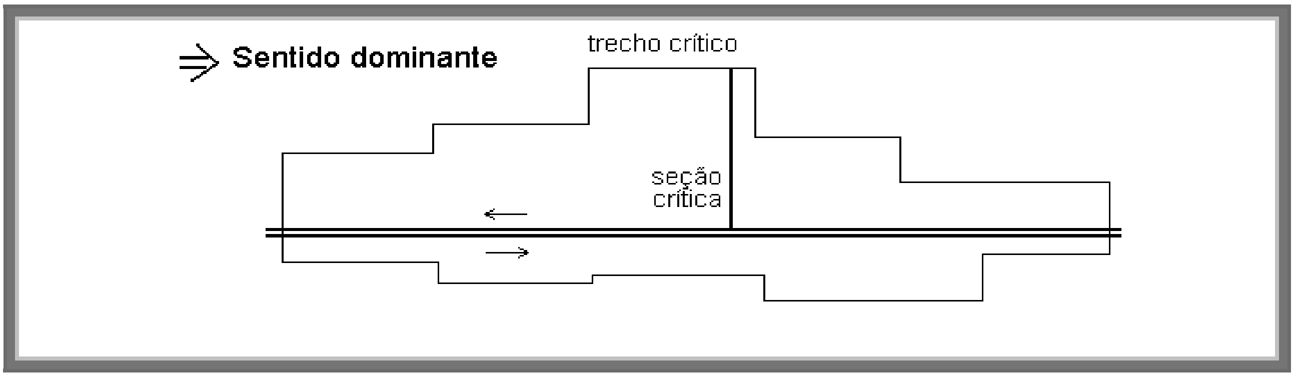
(não são superados mais que p horas ou p% do ano)

em vias tipicamente urbanas VP_p pode ser o volume da hora pico em dia útil.

maior volume de projeto: melhor operação no pico e menor pico;
maior ociosidade fora do pico.

“Variação” da demanda (ou capacidade, ...):

⇨ **perfil da demanda** (ao longo da via)



direcional (ψ): volume direcional de projeto: $VP_{dp} = \psi . VP_p$

$$q_{dp} = VP_{dp} / FPH_d$$

(quando o VDMA inclui os 2 sentidos ⇒ sentido dominante).

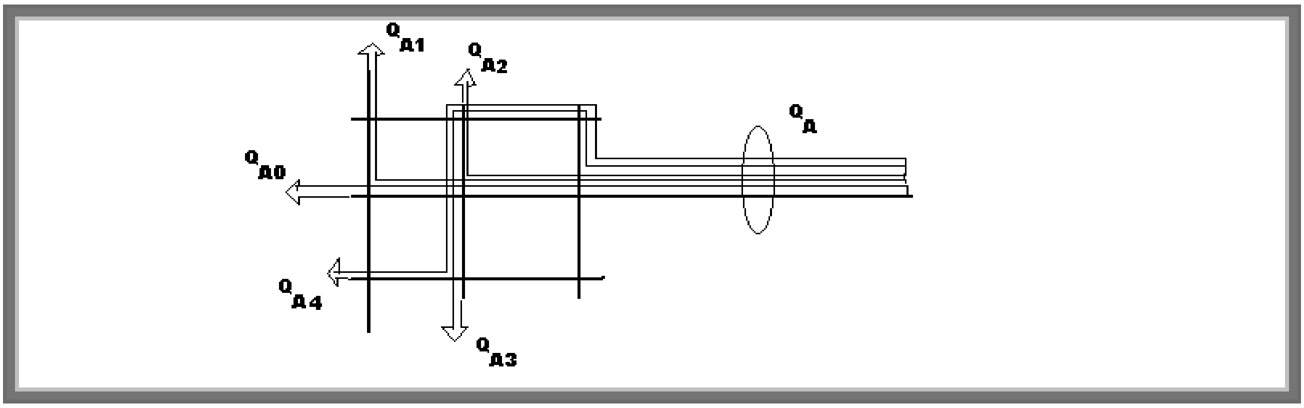
por faixa (ν_i): volume direcional de projeto por faixa: $VP_{dp,i} = \nu_i . VP_{dp}$

(volume ou fluxo na faixa i ⇒ na faixa mais utilizada).

VER EXERCÍCIO VOLUME DE PROJETO

⇨ **desejos (intercâmbios) de viagem:** matriz O/D (origem/destino das viagens)

é uma representação da demanda independente da escolha de rotas !
na maioria dos casos, pode ser admitida fixa (ao contrário das rotas) !



permite examinar mudanças de circulação, efeitos de equilíbrio, ...

Composição da demanda:

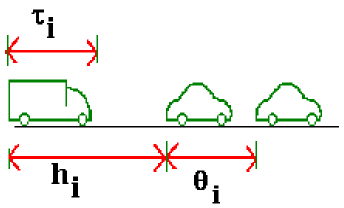
por tipo de veículo e por tipo de movimento (proporção p_r): $q_r = p_r.q_{dp}$

cada tipo de veículo ou movimento "ocupa" a via por um intervalo de tempo diferente (τ_i).

demanda observada ⇔ demanda equivalente

$q\,(v/h)$ $\tilde{q}\,(v_{eq}/h)$

⇨ fatores de equivalência por tipo de veículo ou movimento



i=0 veículo padrão

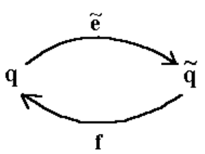
$$\left.\begin{aligned} q &= \textstyle\sum_i q_i \\ \Theta &= \textstyle\sum_i q_i.\theta_i \end{aligned}\right\} \Rightarrow \tilde{q} = \frac{\Theta}{\theta_0} = \sum_i q_i.\frac{\theta_i}{\theta_0} = q.\sum_i P_i.e_i$$

$$\therefore \tilde{q} = q.\tilde{e},\ q = \tilde{q}.f,\ f = 1/\tilde{e}$$

fatores de equivalência específicos: $e_i = \frac{\theta_i}{\theta_0}$ (tipo i)

fator de equivalência médio global: $\tilde{e} = \frac{\tilde{q}}{q} = \sum_{i=1}^{k} P_i\,e_i = 1 + \sum_{i=1}^{k} P_i(e_i - 1)$

⇨ fator de composição de tráfego: $f = \frac{1}{e} = \frac{1}{P_0 + \sum_{i=1}^{k} P_i\,e_i} = \frac{1}{1 + \sum_{i=1}^{k} P_i(e_i - 1)}$



ambos caracterizam composição de tráfego da corrente como um todo.

ambos são fatores de conversão de unidade (entre v/h e veq/h).

exemplo: $q = 1000$ v/h (900 autos e 100 veículos pesados)
se $e_{VP} = 3$ autos/pesado em dadas condições, tem-se
$\tilde{q} = 900.1 + 100.3 = 1200$ veq/h
isto é, nestas condições, 1000 v/h equivale a 1200 veq/h
(naturalmente, $\tilde{e} = 1{,}2$ veq/v e $f = 0{,}8333$ v/veq)

VER EXERCÍCIO EQUIVALENTE/COMPOSIÇÃO

esse é um fator equivalente em termos de uso de capacidade viária (não reflete outros efeitos como efeito sobre a velocidade de tráfego, ...).

o equivalente tem um componente estático e um dinâmico: $e_i = \dfrac{\tau_i}{\tau_0} = \dfrac{\ell_i + \delta_i}{\ell_0 + \delta_0} \cdot \dfrac{V_0}{V_i}$.

com interferência entre correntes de tráfego $h_o \neq \tilde{h}_o$ sem interferência.

a definição do fator equivalente deve, então, incorporar o efeito de cada tipo de veículo na operação dos demais (exemplo: caminhão detém automóveis).

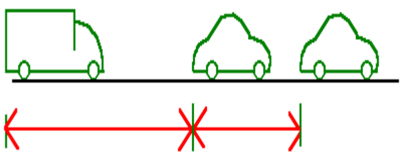
afetando n outros veículos: $e_i = \dfrac{\tau_i + n.(\tau_0 - \tilde{\tau}_0)}{\tilde{\tau}_0} = \dfrac{(\ell_i + \delta_i)}{\ell_0 + \tilde{\delta}_0} \cdot \dfrac{\tilde{V}_0}{V_i} + \dfrac{n.(\delta_0 - \tilde{\delta}_0.)}{\ell_0 + \tilde{\delta}_0} \cdot \dfrac{\tilde{V}_0}{V_0}$

variação dos fatores equivalentes com nível de fluxo $h_o \neq \tilde{h}_o$ com fluxo livre.

a unidade do fator equivalente, então, refere-se ao tipo de veículo e movimento padrão nas condições básicas de operação (ou de fluxo máximo).
exemplo: veq = (auto adiante em fluxo livre em nível).

⇨ **capacidade específica:** capacidade em v/h com 100% de veículos do tipo i (com suas características de operação)

cada tipo de veículo "ocupa" a seção por um tempo diferente (h_i)



$$\Rightarrow C_i = \frac{1}{h_{min}} \therefore e_i = \frac{\bar{h}_i}{\bar{h}_0} \cong \frac{h_{min,i}}{h_{min.0}} = \frac{C_0}{C_i}$$

é uma forma alternativa de expressar o fator equivalente nas condições de operação que correspondem à capacidade dos diferentes tipos de veículos/manobras.

⇨ **faixas de uso compartilhado:** (correntes de tráfego heterogêneas)

$$\left.\begin{array}{l}\bar{C}=\dfrac{1}{\bar{h}_{min}}\\[2ex] \bar{h}_{min}=\sum_{i=0}^{k} p_i.\bar{h}^i_{min}\end{array}\right\} \therefore\ \bar{h}_{min}=\sum_{i=0}^{k}\frac{p_i}{C_i}\ ,\ \text{pois } C_i=\frac{1}{h^i_{min}}\ \text{(capacidade específica)}$$

$$\therefore \bar{C}=\frac{1}{\sum_{i=0}^{k}\frac{p_i}{C_i}}\ \text{(média harmônica das capacidades específicas !)}$$

formas equivalentes: $\bar{C}=\dfrac{Q}{\sum_{i=0}^{k}\frac{Q_i}{C_i}}=\dfrac{Q}{\sum X_i}$ $(\Rightarrow X=\dfrac{Q}{\bar{C}}=\sum X_i)$ ou $\bar{C}=\dfrac{\prod_m C_m}{\sum_{i=0}^{k}\frac{\prod_m C_m}{C_i}p_i}$

<u>alternativa</u> ao fator de composição de tráfego (admite $e_i=\dfrac{\bar{h}_i}{\bar{h}_0}\cong\dfrac{h_{min,n}}{h_{min,0}}=\dfrac{C_0}{C_i}$) !

exemplo: faixa única com 20% de conversões à esquerda (restante à direita)
capacidades específicas $C_E=150$ ve/h e $C_D=750$ vd/h ($e_E=5$ vd/ve)
capacidade com uso compartilhado $C=\left(0{,}2/150+0{,}8/750\right)^{-1}=500$ v/h

VER EXERCÍCIO CAPACIDADE COMPARTILHADA

se o efeito das interrupções de tráfego é homogêneo entre os grupos, então
o mesmo raciocínio pode ser feito com $\bar{S}=\dfrac{1}{\bar{h}_s}$ e $y_i=\dfrac{Q_i}{S_i}$, tendo-se:

$$\bar{S}=\frac{1}{\sum_{i=0}^{k}\frac{p_i}{S_i}}=\frac{Q}{\sum y_i}\ ,\ y=\frac{Q}{\bar{S}}=\sum y_i\ \text{ e }\ \bar{S}=\frac{\prod_m S_m}{\sum_{i=0}^{k}\frac{\prod_m S_m}{S_i}.p_i}\ \ \left(\text{admite: } e_i=\frac{h^i_s}{h^0_s}=\frac{S_0}{S_i}\right)$$

razão demanda-capacidade (X): medida de utilização da capacidade

$$X=\frac{Q}{C}\ \text{ e }\ \tilde{X}=\frac{\tilde{Q}}{\tilde{C}}=\frac{Q\cdot\tilde{e}}{C/f}=\frac{Q}{C}=X\ !\ \ \text{(como fluxo } X_q=\frac{q}{C}\text{ ou } X_H=\frac{VH}{CH}\text{)}$$

se e_i não depende das condições de tráfego e $f=\dfrac{1}{\tilde{e}}=\dfrac{1}{p_0+\sum_{i=1}^{k}p_i\cdot e_i}$ é constante

Caráter aleatório do tráfego

⇨ distribuição dos intervalos entre chegadas

intervalo médio: $\bar{h} = \frac{1}{q}$, onde q é a taxa média de chegadas;

mas entre os intervalos há intervalos (H) maiores e menores que $\bar{h}$;

nº de chegadas (intervalos) num período de duração T: $m = q.T$.

distribuição exponencial dos intervalos entre chegadas:

distribuição de Poisson das chegadas com $\mu_k = m$, $\sigma_k^2 = m$, $\lambda = q$

$$P_T(k \text{ chegadas no período } T) = \frac{m^k \cdot e^{-m}}{k!} = (k = 0,1,...) \text{,onde } m = \lambda \cdot T$$

probabilidade de nenhuma chegada: $P_T(0) = e^{-\lambda.T} \Leftrightarrow \Pr(H > h) = e^{-\lambda.h}$

$\Rightarrow \Pr(H \leq h) = 1 - e^{-\lambda.h} \therefore f \Pr(H = h) = \frac{d}{dh} P_T(H \leq h) = \lambda.e^{-\lambda h}$

portanto, distribuição exponencial dos intervalos, com $\mu_H = \frac{1}{\lambda}$, $\sigma_H^2 = \frac{1}{\lambda^2}$

Hipóteses implícitas:

fluxo médio constante(q);
chegadas independentes;
Pr(de 1 chegada em δt) $\cong q.\delta t$;
Pr(mais de 1 chegada em δt) $\cong 0$.

$P_T(k)$: probabilidade de se ter k chegadas até o instante T; $P_{T+\delta t}(k)$: até $T + \delta t$

$$P_{T+\delta t}(k) = P_T(k-1).\lambda.\delta T + P_t(k).(1 - \lambda.\delta T) \Rightarrow P_{T+\delta t}(k) - P_t(k) = \lambda.[P_T(k-1) - P_t(k)].\delta T$$

que resulta em um sistema de equações diferenciais $\frac{dP_T(k)}{dT} = \lambda[P_T(k-1) - P_T(k)]$

cuja solução é $P_T(k) = \frac{\lambda.T}{k}.P_T(k-1)$ ou $P_T(k) = \frac{m^k}{k!}.P_T(0)$ onde $m = \lambda.T$

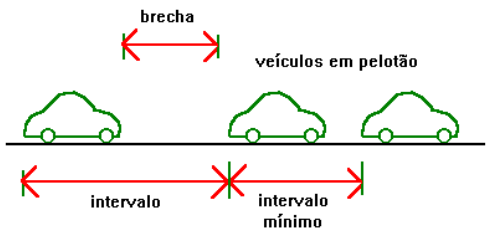
impondo a restrição $\sum_{k=1}^{\infty} P_T(k) = 1$ tem-se $P_{T(0)} = e^{-m}$, portanto, $P_T(k) = \frac{m^k \cdot e^{-m}}{k!}$

críticas: período longo $\Rightarrow$ q pode não ser constante;
existência de pelotões na corrente de tráfego;
separação mínima (τ) $\Rightarrow$ não há nova chegada se $\delta t < \tau$;
múltiplas faixas $\Rightarrow$ pode haver chegadas simultâneas.

distribuição de Cowan para os intervalos entre chegadas

efeito de pelotões próximo a semáforos ou quando o tráfego é pesado;

efeito da separação mínima com uma única faixa e tráfego pesado.



⇨ proporção θ_L dos veículos tem brecha (H-τ) com distribuição exponencial

⇨ proporção (1- θ_L) restante: pelotão com H uniforme= τ

portanto, H tem distribuição mista $\Rightarrow$ H= θ_L.(E+τ) + (1- θ_L).D, onde:

D tem distribuição determinística P [D=τ]= 1 e P[D$\neq\tau$]= 0
$(\mu_D = \tau \ , \ \sigma_D^2 = 0)$

E tem distribuição exponencial fP[E=t]= $\lambda.e^{-\lambda.t}$
$(\mu_E = \frac{1}{\lambda} \ , \ \sigma_E^2 = \frac{1}{\lambda^2})$

para F= (E+τ) temos $\mu_F = \mu_E + \tau = \frac{1}{\lambda} + \tau$ e $\sigma_F^2 = \sigma_E^2 = \frac{1}{\lambda^2}$; então:

$$\mu_H = (1-\theta_L).\mu_D + \theta_L.\mu_F = (1-\theta_L).\tau + \theta_L.(\frac{1}{\lambda} + \tau) = \tau + \frac{\theta_L}{\lambda}$$

$$\sigma_H^2 = (1-\theta_L)^2.\sigma_D^2 + \theta_L{}^2.\sigma_F^2 = \theta_L{}^2.\frac{1}{\lambda^2} = (\frac{\theta_L}{\lambda})^2$$

a distribuição de Cowan dos intervalos é $F_T[h] = P_T[H \leq h] = 1-\theta_L.e^{-\lambda.(h-\tau)}$

$\Rightarrow$P[H=τ]= 1- θ_L = θ_P , veículos em pelotão, $fP[H=\tau] = 1-\theta_L$
$\Rightarrow$P[H>h>τ]= $\theta_L.e^{-\lambda.(h-\tau)}$, veículos livres, $fP[H=h] = \theta_L.\left[\lambda.e^{-\lambda(h-\tau)}\right]$

como $\mu_H = \bar{h} = \frac{1}{q} \ \Rightarrow \ \frac{1}{q} = \tau + \frac{\theta_L}{\lambda} \ \ \therefore \lambda = \frac{\theta_L.q}{1-\tau.q}$

com fração em pelotão $\theta_p = 1-\theta_L$ (tráfego, semáforos, ...)

exemplo: fluxo de 900 v/h=0,25 v/s, brecha maior que 6 segundos
com distribuição de chegadas de Poisson $\lambda = q = 0{,}25$ v/s
$\therefore \Pr[H > 6] = e^{-0{,}25.6} = 0{,}2231$ (22,31% ou ~1 brecha em 5)
(no caso de Poisson, brecha e intervalo são iguais)

VER EXERCÍCIO BRECHA ALEATÓRIA

distribuição para os espaçamentos entre chegadas

formulações equivalentes podem ser utilizadas para variáveis de separação espacial (ao invés de temporal), sendo neste caso mais usual a análise por faixa !

$\bar{s}$: espaçamento médio entre veículos (por faixa)
($\bar{d} = \bar{s} - \delta$: distância média entre veículos,
sendo δ o espaço mínimo ocupado por veículo)

$K_\ell = \frac{1}{\bar{s}_\ell}$: densidade de veículos na faixa ℓ
($K = \sum_\ell K_\ell$ é a densidade tráfego total na via)

distribuição exponencial de espaçamentos: $P[S > s] = e^{-\lambda.s}$ ou
outras das formulações discutidas (como $P[S > s] = \theta_L.e^{-\lambda.(s-\delta)}$)

são hipóteses alternativas, não equivalentes, em relação às distribuições de intervalos correspondentes !

outros aspectos

distribuição de tipos de veículos no tráfego ou em filas;

distribuição do número de veículos nos pelotões e dos intervalos ou

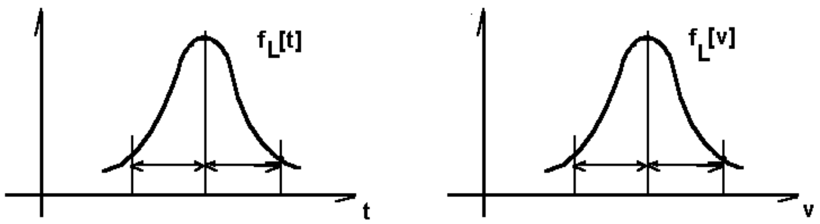
espaçamentos entre pelotões;

distribuição de acidentes de trânsito, ...

VER EXERCÍCIO TIPOS DE CHEGADAS

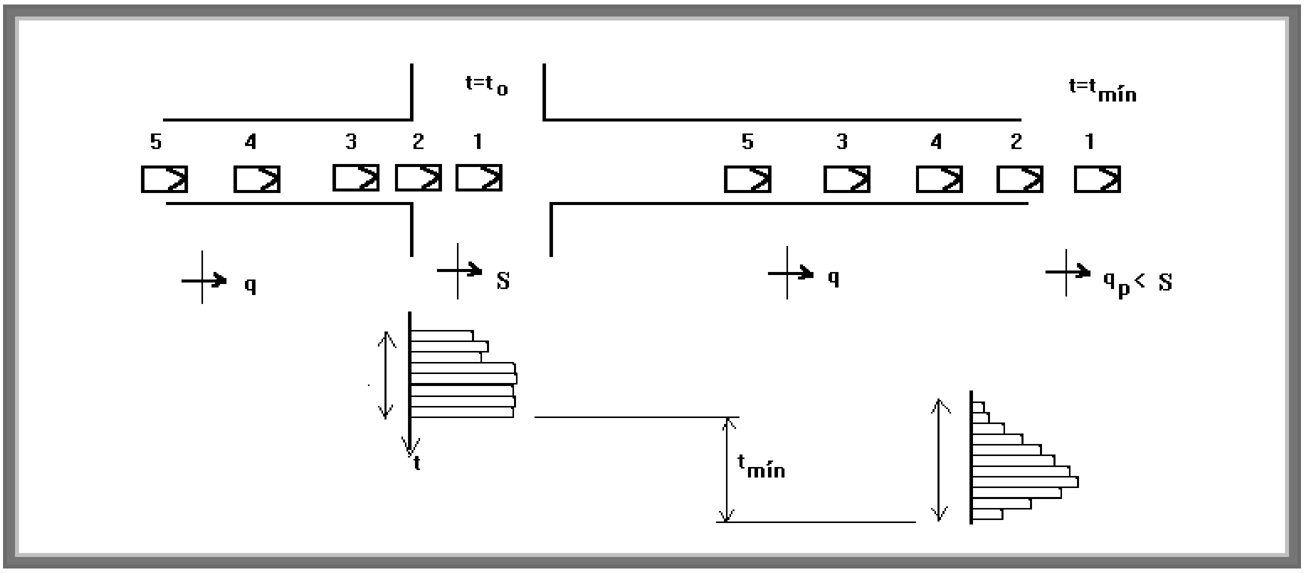
distribuição de tempos de viagem (e velocidades):

função de diferenças entre motoristas (velocidade desejada) e veículos.



dispersão de pelotões: também função da variação nos tempos de viagem.

ocorre quando o tráfego é inicialmente escoado da interseção em um pelotão (pequeno espaçamento entre veículos, usualmente a partir de uma fila).



dispersão do pelotão: densidade de veículos reduzida adiante,
maior velocidade dos líderes do pelotão;
produzem: distanciamento entre os veículos,
equalização das condições de tráfego ($q_p \rightarrow q$).

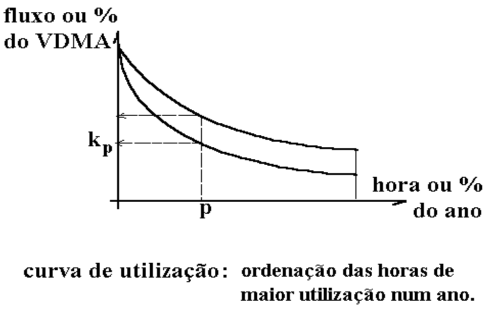
boas condições de dispersão: ausência de interferências, aclive ou pesados,
faixas com 3,60 m ou mais, múltiplas faixas
(fatores que favorecem velocidade e facilitam ultrapassagem)

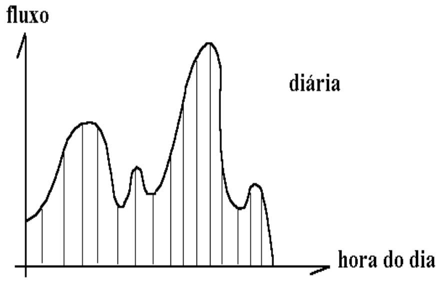
VER EXERCÍCIO PELOTÕES EM SEMÁFOROS

⇨ distribuição da demanda (nas horas do ano, nos sub-períodos ...)

a curva de utilização tem relação direta com a distribuição da demanda

o fator de pico-hora também deveria ter, dada uma probabilidade limite





$$VH_i(v) = FH_i.VDMA \Leftrightarrow \Pr\left[VH \geq VH_i\right] = \frac{i}{365.24}$$, % das horas do ano

decorre diretamente da função de distribuição acumulada ...

nos sub-períodos da hora (15min, 5min, ...), dada a distribuição de fluxos

$$q_p(v/h) = \frac{\bar{q}}{FPH} \Leftrightarrow \Pr\left[VH \geq VH_i\right] = p$$, p=percentil correspondente ...

(portanto, existe um FPH para cada confiabilidade: de 90%, de 95% ...)

portanto, ambos podem ser obtidos da caracterização da distribuição estatística

segmentação por época do ano, dia da semana, ...

modelos explicativos para datas especiais (feriados, ida/volta ...)

⇨ capacidade provável (nas horas do ano, nos sub-períodos ...)

a capacidade varia (embora menos que outras variáveis ...)

conceito estocástico exige definir o nível de confiabilidade

(de forma semelhante à distribuição da demanda ...)

dificuldade: pode não ser diretamente observável ...

observação=fluxo com ou sem congestionamento

estatística de sobrevivência: probabilidade de não superar capacidade

(isto é, admitindo que congestiona quando supera a capacidade)

método de Kaplan-Meier: dados fluxos observados, congestionados ou não

- ordenar fluxos em ordem crescente $q_i\,(v/h), i = 1,2,...n$ no gargalo

  com $\delta_i = 1$ se gerou congestionamento (caso contrário $\delta_i = 0$)

- fórmula do produto-limite para a probabilidade de sobrevivência:

$$\Pr\left[C \geq q_k\right] = \prod_{q_i \leq q_k} \left(\frac{n-i}{n-i+1}\right)^{\delta_i} = \Pr\left[C \geq q_{k-1}\right]\left(\frac{n-k}{n-k+1}\right)^{\delta_{ki}}$$

- estimar a variância $V\left[\Pr\left[C \geq q_k\right]\right] = \left(\Pr\left[C \geq q_k\right]\right)^2 \left(\sum_{q_i \leq q_k} \frac{\delta_i}{(n-i)(n-i+1)}\right)$

critério: fluxo "gerou" congestionamento se velocidade menor que limite (ou densidade limite) e se fluxo não estava congestionado antes ...

VER EXERCÌCIO CAPACIDADE CONFIÁVEL

RELAÇÕES BÁSICAS GERAIS

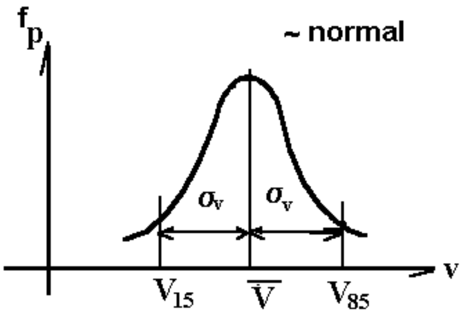
Velocidade de tráfego

⇨ **velocidades pontuais:** de um veículo em uma seção (ou pequeno ΔL antes da seção).

⇒Medida local e específica para um veículo

fontes de variações:
tipo de veículo (tecnologia, relação peso/potência);
tipo de motorista (motivo da viagem, ...);
via e geometria (rampa, curvatura, ...);
volume e composição do tráfego;
clima (controle do veículo, visibilidade).

distribuições das velocidades puntuais no tráfego:



onde:

$\overline{V}$ =velocidade média
V_{15} =velocidade p/ 15% inferior ($V-\sigma_V$)
V_{85} =velocidade p/ 15% superior ($V+\sigma_V$)
σ_V =desvio padrão de V.

⇨ **média temporal:** das velocidades dos veículos que passam por uma seção S ($\overline{V}_T$) em um período de tempo T.

⇨ **média espacial:** das velocidades dos veículos que ocupam um trecho L em um ($\overline{V}_S$) instante t.

a relação entre estas velocidades médias é $\overline{V}_T = \overline{V}_S + \frac{\sigma_S^2}{\overline{V}_S} = \overline{V}_S . \left(1 + \frac{\sigma_S^2}{\overline{V}_S^2}\right)$ ($\geq \overline{V}_S$).

VER EXERCÍCIO CIRCUITO

Equação de Continuidade de Tráfego

relação básica: conservação da quantidade de veículos na corrente de tráfego (relação entre q e V) !

volume ou fluxo $\mathbf{(q)} \Rightarrow$ intervalo=1/q ;
velocidade: média, espacial ou temporal $\mathbf{(V)}$;
densidade $\mathbf{(K)} \Rightarrow$ espaçamento=1/K .

⇨ regime estacionário, seção uniforme, corrente homogênea:

$$\Rightarrow v_i = \bar{v}_s = \bar{v}_t = V$$

intervalo $T = \dfrac{L}{V}$: todos os X veículos (mesmo o mais distante) passarão por A.

$$q = \frac{X}{T} = \frac{X}{L/V} = \frac{X}{L} \cdot V \therefore q = k \cdot V \;\; !!$$

K=X/L: densidade de veículos no trecho considerado (Veículos/km).

⇨ tráfego geral (regime estacionário):

trecho de extensão L, período de observação T;

veículo com velocidade v_i permanece um tempo $t_i = \dfrac{L}{v_i}$ no trecho;

volume: N veículos em proporção p_i na velocidade v_i ;

$$\therefore \hat{V}_t = \frac{1}{N} \cdot \sum (p_i N) v_i = \sum p_i v_i$$

probabilidade de observar um veículo num instante do período T é $\dfrac{t_i}{T}$;

número médio de veículos no trecho:

$$\hat{X} = \sum \left(N_i \cdot p_i \right) \cdot \frac{t_i}{T} = \frac{N}{T} \sum p_i t_i = \hat{Q} \, . \sum p_i t_i \; (= \sum \hat{X}_i , \hat{X}_i = p_i \cdot t_i \cdot \hat{q}_i)$$

número médio de veículos com velocidade v_i é $p_i \cdot t_i \cdot \hat{q}$:

$$\therefore \quad \hat{V}_S = \frac{1}{\hat{X}} \sum (p_i . t_i) . \hat{q} . v_i = \frac{\hat{q}}{\hat{X}} \sum (p_i . t_i . v_i) = \frac{\hat{q}}{\hat{X}} \sum (p_i . L) = \frac{\hat{q} . L}{\hat{X}} = \frac{\hat{q}}{\hat{K}} .$$

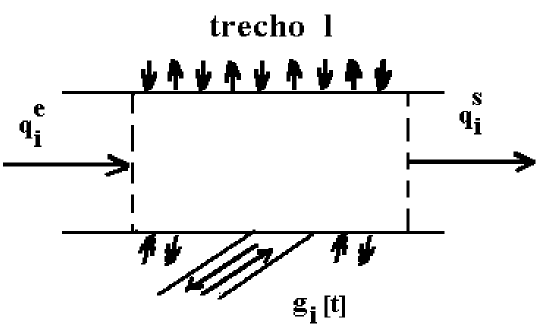
onde: $\hat{K}$ é densidade de veículos no trecho L média no período T.

$\hat{q}$ é o fluxo de veículos no período T, médio no trecho L.

portanto: $\hat{V}_S = \dfrac{\hat{q}}{\hat{K}}$ (com a velocidade média espacial).

porque a velocidade média espacial incorpora o tempo que os veículos permanecem no sistema viário !

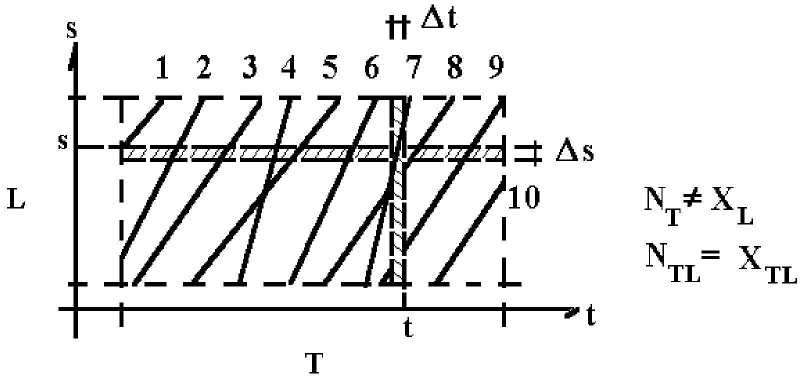
⇨ regime transitório (trecho elementar):



$$\frac{\partial q}{\partial x} + \frac{\partial K}{\partial t} = g[x, t] \text{ ou}$$

$$\frac{q_i^s - q_i^e}{\Delta x_i} + \frac{\Delta K_i}{\Delta t_i} = g_i [t]$$

diagrama espaço-tempo: tráfego geral



onde:

T = duração do período de observação (Δ s)

L = extensão do trecho observado (Δ t)

$N_T(s)$ = nº de veículos que passaram no período T pela seção S

N_{TL} = n° de veículos passando ou que passaram no trecho L em T

$X_L(t)$ = nº de veículos que estão no trecho L no instante t

X_{LT} = n° de veículos que estão ou estiveram no trecho L em T

$$q = \frac{\sum_{\Delta s \in L} q[s]\Delta s}{\sum_{\Delta s \in L} \Delta s} = \frac{\sum_{\Delta s \in L} \frac{N_T[s]}{T}\Delta s}{L} = \frac{\sum_i \frac{s_i}{T}}{L} = \frac{\sum_i \frac{s_i}{L}}{T} = \frac{\sum_i s_i}{L.T}$$

$$K = \frac{\sum_{\Delta t \in T} K[t]\Delta t}{\sum_{\Delta t \in T} \Delta t} = \frac{\sum_{\Delta t \in T} \frac{X_L[t]}{L}.\Delta t}{T} = \frac{\sum_i \frac{t_i}{L}}{T} = \frac{\sum_i \frac{t_i}{T}}{L} = \frac{\sum_i t_i}{L.T}$$

velocidade média temporal (V_t **):**

$$\bar{v}_T[s] = \frac{\sum_{i \in I_s} v_i}{N_T[s]};\ V_T[L] = \frac{\sum_{\Delta s \in L} \bar{v}_T[s].N_T[s].\Delta s}{\sum_{\Delta s \in L} N_T[s].\Delta s} = \frac{\sum_{\Delta s \in L}(\sum_{i \in I_s} v_i).\Delta s}{\sum_i s_i} = \frac{\sum_i v_i.s_i}{\sum_i s_i}$$

pois $\sum \Delta s = s_i \therefore V_T[L] = \frac{1}{N}\sum_i \frac{s_i}{\bar{s}} \cdot v_i$ e, se $s_i = L, \forall i,$ então $V_T[L] = \frac{\sum_i v_i}{N.L} = \frac{\sum_i v_i}{N}$

$\therefore V_T[L]$ é a média aritmética das velocidades individuais.

velocidade média espacial (V_S **):**

$$\bar{v}_S[t] = \frac{\sum_{i \in I_s} v_i}{X_L[t]},\ V_S[T] = \frac{\sum_{\Delta t \in T} \bar{v}_S[t].X_S[t].\Delta t}{\sum_{\Delta t \in T} X_S[t].\Delta t} = \frac{\sum_{\Delta t \in T}(\sum_{i \in I_S} v_i).\Delta t}{\sum_i t_i} = \frac{\sum_{\Delta t \in T}(\sum_{i \in I_S} \Delta s_i)}{\sum_i t_i} = \frac{\sum_i s_i}{\sum_i t_i} = \frac{Q}{K}$$

$V_S[T] = \frac{\bar{s}}{\bar{t}}$ e se $s_i = L, \forall i$ então $V_S[T] = \frac{L.N}{\sum_i t_i} = \frac{N}{\sum_i \frac{t_i}{L}} = \frac{N}{\sum_i \frac{1}{v_i}}$

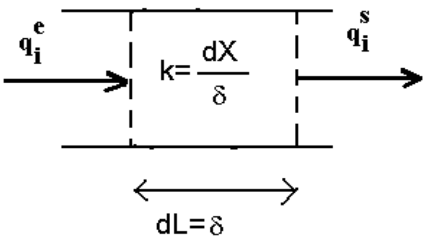
$\therefore V_S[T]$ é a média harmônica das velocidades individuais.

VER EXERCÍCIO OBSERVADOR EM MOVIMENTO *

⇨ forma contínua (regime estacionário):

trecho elementar:

$$dNe = dN = dNs$$



para os veículos com velocidade v:

$$k[v] = \frac{dX[v]}{dL}$$

em $dt = \frac{dL}{v}$ tem-se $dN[v] = dX[v]$ e

$$q[v] = \frac{dN[v]}{dt} = \frac{dX[v]}{dL/v}$$

portanto, $q[v] = k[v].v$

distribuição de velocidades no tempo: $f_T[v] = \frac{dN[v]}{dN} = \frac{q[v]}{q}$

distribuição de velocidades no espaço: $f_L[v] = \frac{dX[v]}{dX} = \frac{k[v]}{k}$

relação entre distribuições: $q[v] = f_T[v].q \Rightarrow k[v].v = f_T[v].k.\bar{v} \therefore f_L[v] = \frac{\bar{v}}{v}.f_T[v]$

⇨ conceito de correntes subsidiárias (Wardrop, 1952):

fluxo com correntes de tráfego em velocidade específica v_i : $q_i = k_i.v_i$

similarmente, $f_{Ti} = \frac{q_i}{q}, q = \sum_i q_i$ e $f_{Li} = \frac{k_i}{k}, k = \sum_i k_i$

e, da mesma forma, $f_{Li} = \frac{k_i}{k} = \frac{q_i / v_i}{q/\bar{v}} = \frac{q_i}{q}.\frac{\bar{v}}{v_i} = f_{Ti}.\frac{\bar{v}}{v_i}$

representação discreta é mais fácil de manipular e obtém os mesmos resultados

- exemplo: $\bar{v} = \frac{q}{k} = \frac{\sum_i k_i.v_i}{k} = \sum_i \frac{k_i.v_i}{k} = \sum_i f_{Li}.v_i = \bar{v}_S$ (a média espacial)

$$\bar{v} = \frac{q}{k} = \frac{q}{\sum_i k_i} = \frac{q}{\sum_i q_i / v_i} = \frac{1}{\sum_i f_{Ti} / v_i} = \hat{v}_T$$ (harmônica temporal)

⇨ relações básicas na forma contínua (regime estacionário):

- velocidade média espacial: $\bar{v}_S = \int v.f_L[v].dv = \int v.\frac{\bar{v}}{v}.f_T[v].dv = \bar{v}.\int f_T[v].dv = \bar{v}$

(a velocidade média do tráfego é a velocidade média espacial)

- velocidade média temporal: $\bar{v}_T = \int v.f_T[v].dv = \int v.\frac{v}{\bar{v}}.f_L[v].dv = \frac{1}{\bar{v}}.\int v^e.f_L[v].dv = \frac{E_S[v^2]}{\bar{v}}$

$$V_S[v] = E_s[v^2] - E_s[v]^2 \Rightarrow \sigma_s^2 = \bar{v}_T.\bar{v}_S - \bar{v}_S^{\,2} \;\therefore\; \bar{v}_T = \bar{v}_S + \frac{\sigma_s^2}{\bar{v}_S} = \bar{v}_S.(1 + \nu_s^2)$$

também $\int \frac{1}{v}.f_T[v].dv = \int \frac{1}{v}.\frac{v}{\bar{v}}.f_L[v].dv = \frac{1}{\bar{v}}.\int f_L[v].dv = \frac{1}{\bar{v}} \;\therefore\; \bar{v} = 1 \Big/ \int \frac{1}{v}.f_T[v].dv$

(a velocidade média do tráfego é a velocidade média harmônica temporal)

⇨ demanda potencial de ultrapassagens:

- demanda potencial ("desejada") X efetiva (manifesta): equilíbrio (desejada=manifesta)

  (potencial: com a distribuição de velocidade desejada, não com a de equilíbrio)

- Walker: macroscópica $R_u[v',v]=k_{v'}.(v'-v),v'>v$ em ultrapassagens/hora ...

  ultrapassagens/hora/quilômetro: $R_T[v',v]=k_v.k_{v'}.(v'-v),v'>v$

  microscópica $\bar{e}_v=\dfrac{1}{k_v},\tilde{q}=k_{v'}.\tilde{v}=k_{v'}.(v'-v)\therefore R[v',v]=\dfrac{\tilde{q}}{e_v}=k_{v'}.k_v.(v'-v)$

  ou $q_v,t_v=\dfrac{L}{v}$ com $\tilde{q}=k_{v'}.(v'-v)\therefore R[v',v]=q_v.\dfrac{\tilde{q}.t_v}{L}=k_{v'}.k_v.(v'-v)$

  em toda corrente de tráfego, $R_T=\sum_v\sum_{v'>v}R[v',v]=\sum_v\sum_{v'>v}k_{v'}.k_v.(v'-v)$

  portanto: $R_T=k^2.\sum_v\sum_{v'>v}f_{Lv'}.f_{Lv}.(v'-v)$ ou $R_T=q^2.\sum_v\sum_{v'>v}f_{Tv'}.f_{Tv}.\left(\dfrac{1}{v}-\dfrac{1}{v'}\right)$

  pois $R_T=\sum_v\sum_{v'>v}k_{v'}.k_v.(v'-v)=\sum_v\sum_{v'>v}\dfrac{q_v}{v}.\dfrac{q_{v'}}{v'}.(v'-v)=\sum_v\sum_{v'>v}q_v.q_{v'}.\left(\dfrac{1}{v}-\dfrac{1}{v'}\right)$

- Wardrop: admitindo velocidades com distribuição normal $R_T=\dfrac{q^2}{\sqrt{\pi}}.\dfrac{\sigma_S}{\bar{v}_s^2}=0{,}56.\dfrac{\sigma_S}{\bar{v}_s^2}.q^2$

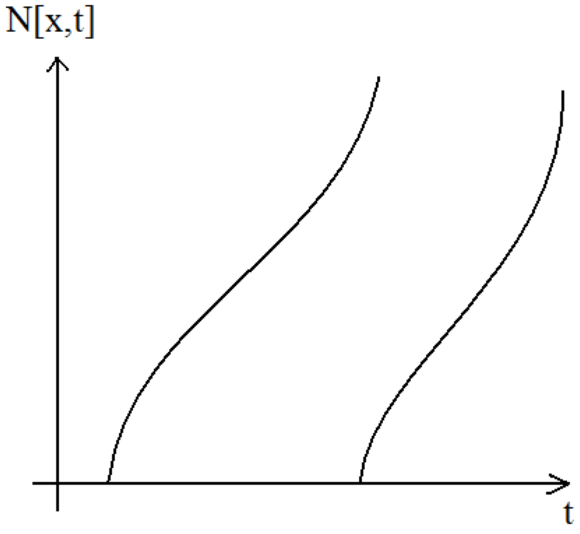
⇨ forma acumulada (curva N):

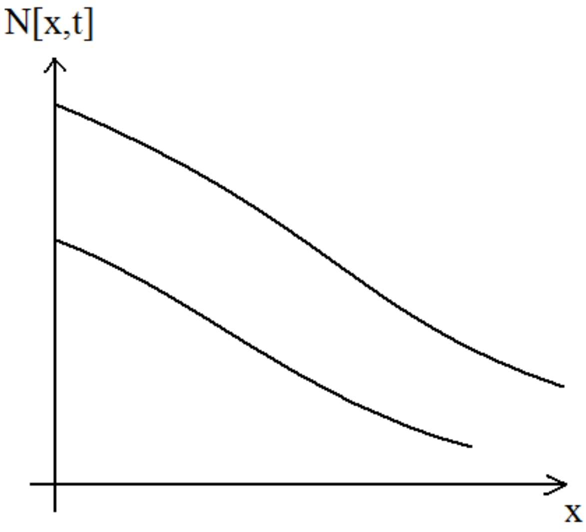
forma tradicional exige identificação e seguimento da trajetória do veículo i

corresponde a analisar o tráfego (estacionário) no diagrama espaço-tempo ...

sensores de tráfego usualmente limitam-se a obter contagens em pontos da via

representação correspondente: diagrama acumulado ou $N[x,t]$ (curva N em x)





Equação fundamental: relação comportamental.

Variáveis: $q = \frac{1}{\bar{h}}$, $K = \frac{1}{\bar{e}}$, $V_S = \frac{q}{K} = \frac{\bar{e}}{\bar{h}}$!

q (fluxo), V_S (velocidade), K (densidade) não são independentes.

nível microscópico: espaçamento observado ⇒ velocidade observada(V_S)

freqüência com que os veículos são encontrados no tráfego;
dificuldade de ultrapassagem dos veículos mais lentos;
possibilidade de escolher a própria velocidade; seguimento;
espaçamento mínimo admitido; percepção de segurança.

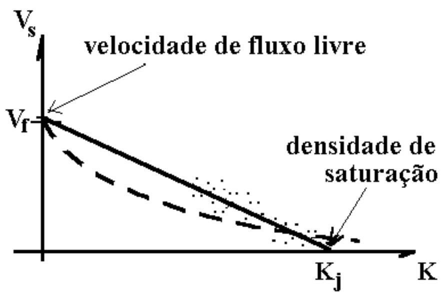
$$V_S = \frac{\bar{e}}{\bar{h}}\ ,\ \bar{e} = f(V_S) \quad \therefore Q = \frac{V_S}{\bar{e}} = \frac{V_S}{f(V_S)}$$

⇨ **nível macroscópico:** densidade observada ⇒ velocidade observada

$$q = V_s \cdot K\ ,\ V_s = f(K)\ \text{ou}\ K = f(V_s)$$

hipótese linear (Greenshields): $V_s = V_f(1 - \frac{K}{K_j})$, $K = K_j(1 - \frac{V_s}{V_f})$

hipóteses mais gerais: $V_s = V_f\left[1 - \left(\frac{K}{K_j}\right)^{\alpha}\right]^{\beta}$ (parâmetros: α, β)



comportamento dinâmico: $V_S[x,t] \neq V^e[K[x,t]]$ (velocidade de equilíbrio)

hipótese dinâmica: $V_S[x, t+\tau] = V^e[K[x+\delta, t]]$

δ: distância de antecipação; τ: tempo de reação/ação

VER EXERCÍCIO CARRO-SEGUIDOR

⇨ Diagrama fundamental:

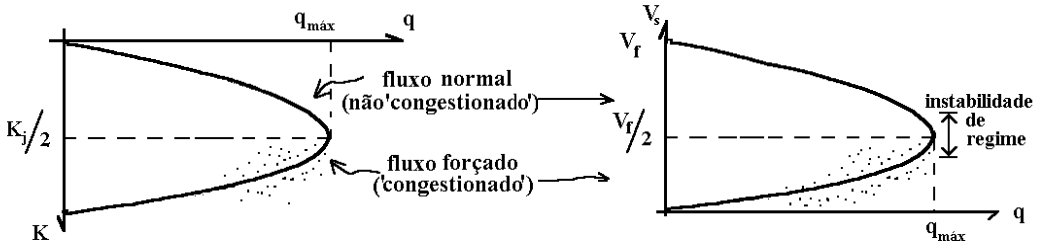
considerando a hipótese linear de Greenshields temos:

$$q = K \cdot V_s = V_f \cdot K - \frac{V_f}{K_j} \cdot K^2 = K_j \cdot V_s - \frac{K_j}{V_f} \cdot V_s^2$$; uma função quadrática !

máx $q \Rightarrow \left.\frac{dq}{dK}\right|_{K^*} = 0 \Rightarrow V_f - 2\frac{V_f}{K_j} \cdot K^* = 0 \Rightarrow K^* = \frac{K_j}{2}$ (com $V_S^* = \frac{V_f}{2}$).

Capacidade(C): fluxo máximo (comportamental) em condições normais

$C = q_{máx} = K^*.V_S^* = \frac{K_j \cdot V_f}{4}$ quando é válida a hipótese linear de Greenshields



⇨ fluxo normal

=operação em condições não saturadas;
=operação sem a formação de filas (q=Q).

⇨ fluxo forçado

=operação com saturação ('Congestionamento')
=operação nas filas geradas pelos gargalos (C<Q).

a operação em fluxo forçado ocorre na formação e na dissipação das 'filas'!

dados empíricos indicam que as curvas de desempenho em condições de fluxo normal e forçado não são da mesma natureza e que a velocidade é mais sensível ao nível de utilização quando em fluxo forçado de forma geral ou próximo à capacidade (a partir de 70-80% da capacidade, em fluxo normal).

hipótese não-linear: $K^* = \left(\frac{1}{1+\alpha.\beta}\right)^{1/\beta}.K_j$ e $V^* = \left(\frac{\alpha.\beta}{1+\alpha\beta}\right)^{\alpha}.V_f$

medição da capacidade:

⇨ observar fluxos máximos medidos
dificuldade: não é fácil saber se um fluxo observado corresponde à situação de capacidade

⇨ calibrar parâmetros da equação fundamental
dificuldade: tem de ser adotada alguma hipótese sobre a forma da relação entre V_S, K ou q.

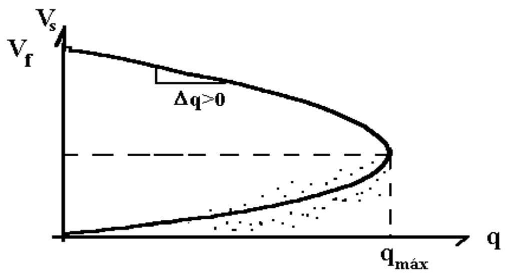
⇨ observar a curva de operação da via ($V \times q$) em campo
dificuldade: a seção não pode ser afetada por gargalos adjacentes.

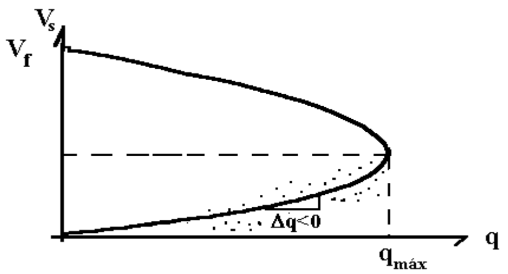
VER EXERCÍCIO ESTIMATIVA DE CAPACIDADE

instabilidade de operação (regime forçado ou "congestionado"):

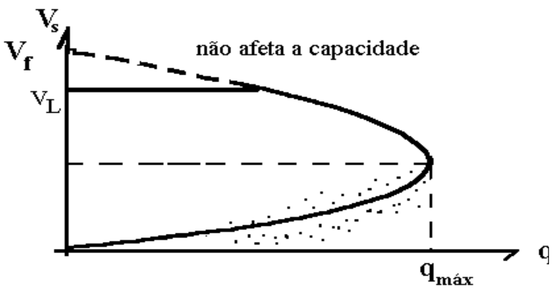
em regime forçado, pequenos incidentes de operação (flutuações de velocidade ou densidade) fazem a operação do tráfego tender a um ritmo intermitente (de pára-e-anda)

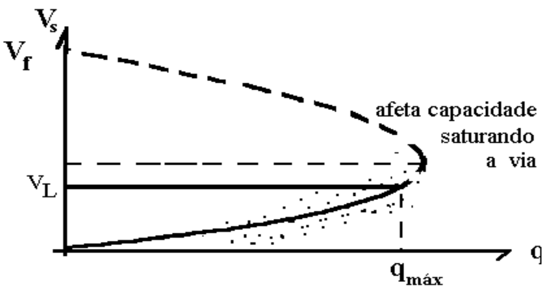
perturbação	operação estável	operação instável
$\Delta V < 0$ (ou $\Delta K > 0$)	$\Delta q > 0$, recuperação	$\Delta q < 0$, pára-e-anda





efeito de limites de velocidade: depende do valor do limite imposto:





efeitos da saturação: perda de capacidade de 10% a 15% com operação saturada
fenômeno das duas capacidades (C fluxo normal > C fluxo forçado)!
recuperação não é imediata (dissipação das filas formadas)

Função de desempenho:

resolvendo a equação fundamental para V_S em função de q obtemos as velocidades ou densidades de tráfego

quando é válida a hipótese linear de Greenshields, há duas soluções:

$$\frac{K_j}{V_f}V_s^2 - K_j V_s + q = 0 \Rightarrow \begin{cases} V_s = \dfrac{V_f}{2}(1+\sqrt{1-q/C}) & \text{estavel ou não-saturado/'congestionado'} \\ V_s = \dfrac{V_f}{2}(1-\sqrt{1-q/C}) & \text{instavel ou saturado/'congestionado'} \end{cases}$$

que são função direta da razão fluxo/capacidade ($X_q = q/C$), que descreve o nível de utilização da via, e do regime de operação (fluxo normal ou forçado).

em geral, função de desempenho relaciona V_S ou T em função de q ou $X_q = q/C$ (expressões diferentes podem ser usadas para cada regime de operação).

exemplo: $Q = 3000$ v/h em via com $V_f = 80$ km/h e $C = 4000$ v/h ($X = Q/C = 0{,}75$)

admitindo a hipótese de Greenshields, haveria duas situações possíveis

em fluxo normal: $V = 80/2.\left(1+\sqrt{1-0{,}75}\right) = 60$ km/h ($K = 3000/60 = 50$ v/km)

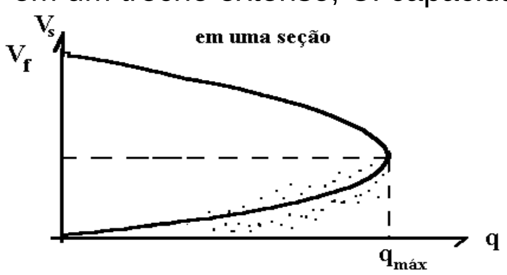
em fluxo forçado: $V = 80/2.\left(1-\sqrt{1-0{,}75}\right) = 20$ km/h ($K = 3000/20 = 150$ v/km)

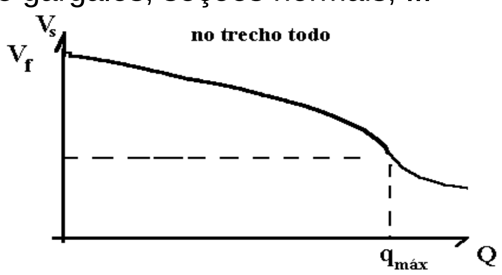
(a operação em fluxo forçado somente ocorre em condição de congestionamento).

VER EXERCÍCIO ONDAS DE CONGESTIONAMENTO *

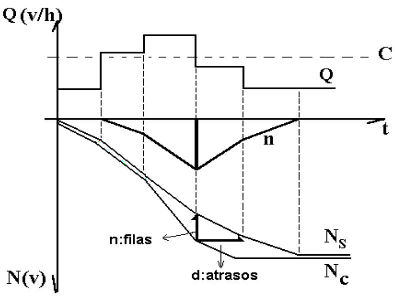
com um pico de duração T_p, $X = \dfrac{Q}{C}$ (pode ser maior que 1, ao contrário de X_q).

em um trecho extenso, C: capacidade de gargalos, seções normais, ...





Atraso parado e filas



⇨ atraso parado total (em veículos-hora):

fila ($n[t]$): "chegadas"- "saídas" $\Rightarrow n[t] = q_C[t] - q_S[t]$.
atraso $d_P[t]$: "$t_{SAÍDA}$"-"$t_{CHEGADA}$" $\Rightarrow d_P[n] = t_S[n] - t_C[n]$.

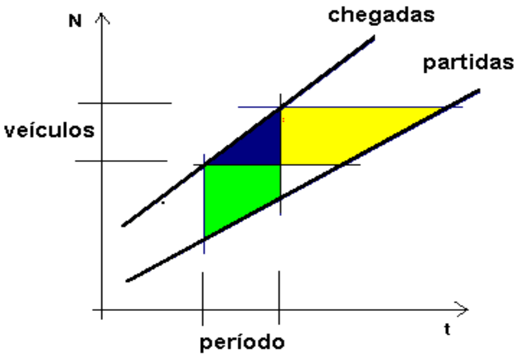
atraso acumulado: $D[t] = \int_{t=0}^{T} n[t].dt = \sum_{n=1}^{N} d_P[n]$ (em veículos.hora).

⇨ relação entre atraso parado e fila (médios):

em regime estacionário: $\bar{d}_P = \frac{1}{N}.D[T]$ e $\bar{n} = \frac{1}{T}.D[T]$

$\therefore \frac{\bar{n}}{\bar{d}_P} = \frac{N}{T} = \bar{q}$ (fluxo médio), ou seja, $\bar{n} = \bar{q} \cdot \bar{d}_P$

em regime transitório:

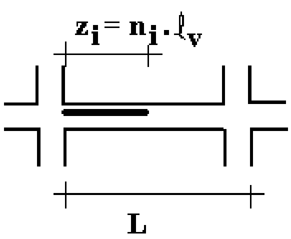


<u>por veículo</u>: $d_i = t_{saida} - t_{chegada}$ de cada veículo i que chegou no período T
($D[T] = \sum d_i$)
<u>por período</u>: $d_k = n_{PARADOS}.\Delta t_k$ de veículos parados no intervalo k do período T
($D[T] = \sum d_k$)

medidas podem ser diferentes!

atraso para um veículo que chega em fila $d_i = \frac{n_i}{C}$ (se C é constante).

⇨ medidas pontuais X medidas por trecho:



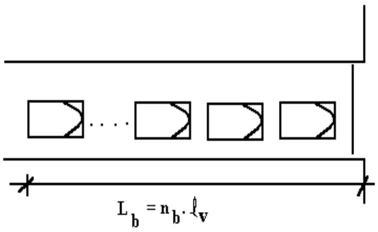
$$\therefore d_i = \frac{L - z_i}{V} + \frac{n_i}{C} - \frac{L}{V} = \left(\frac{1}{C} - \frac{\ell_v}{V}\right).n_i$$

(se C é constante),
ℓ_v é a extensão ocupada por veículo
(z_i é a extensão da fila por faixa) !

Correções para filas e atrasos calculados:

⇨ efeito adicional da dimensão física dos veículos sobre a fila real:

considerando a dimensão da fila L, os veículos chegam à fila ("param") antes da linha de retenção, e a fila máxima seria, portanto:



$$t = \frac{L_b}{V} \Rightarrow t = n_b \cdot \frac{\ell_v}{V}, \quad \Delta n = t.q_m$$

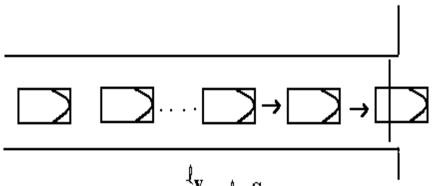
$$\therefore n_b = n + n_b \frac{\ell_v}{V}.q_m \Rightarrow n_b = \frac{n}{1 - \frac{\ell_v}{V} \cdot q_m}.$$

$q_m = \frac{q}{m}$ é o fluxo por faixa (m é o número de faixas), antes do gargalo.

na verdade, $\ell_v = e_S$ (o espaçamento entre veículos com o fluxo de saturação, $e_S = 1/K_S$, com $K^* \leq K_S \leq K_j$, maior que o comprimento dos veículos)!

⇨ efeito adicional do tempo de dissipação sobre a extensão efetada:

considerando que o movimento da fila não é imediato, a extensão máxima atingida ocorre após o início do movimento seria:



$$t = \frac{n_b . \ell_v}{\ell_v . C_s} \Rightarrow t = \frac{n_b}{C_s}, \quad \Delta n = q.t$$

$$\therefore n_m = n_b + \frac{n_b}{C_s}.q \Rightarrow n_m = \frac{n_b}{1 - \frac{q}{C_s}}$$

a extensão máxima atingida pela fila é $L_{max} = n_{max} . \ell_V$

$q_m = \frac{q}{m}$ é o fluxo por faixa (m é o número de faixas), antes da interrupção.

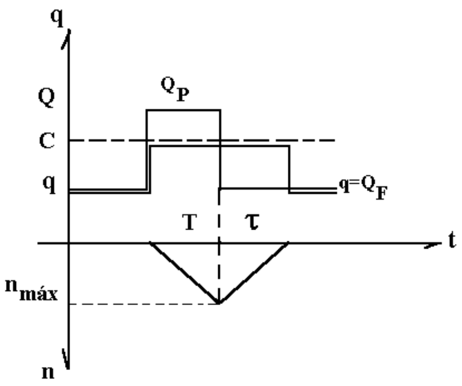
durante o tempo de dissipação, a fila diminui mas propaga-se para trás !

C_s é a capacidade (fluxo) de dissipação das filas.

VER EXERCÍCIO ONDAS INTERMITENTES *

Componentes de atrasos/filas

⇨ **gargalos:** filas/atrasos com chegadas e serviços regulares;
só há fila quando $Q>C$ (o equilíbrio é transitório).



onde:
C= capacidade da via
Q_P= demanda de pico
Q_F= demanda após o pico
q= fluxo observado
n= fila
T= duração de sobre demanda
τ= tempo de recuperação

desprezando o espaço ocupado pelos veículos (extensão da fila), temos:

fila máxima (em $t=T$) é $n_{máx} = (Q_P - C).T$, atraso máximo é $d_{máx} = \frac{Q_P.T}{C} - T$;

tempo de recuperação é $\tau = \frac{(Q_P - C).T}{C - Q_F}$ (a partir de $Q=Q_F<q_F=C$, após o pico);

número de veículos afetados: $N = Q_P.T + Q_F.\tau = C.(T+\tau)$.

⇨ **outros fatores:** aleatoriedade e interrupções (gargalos momentâneos)

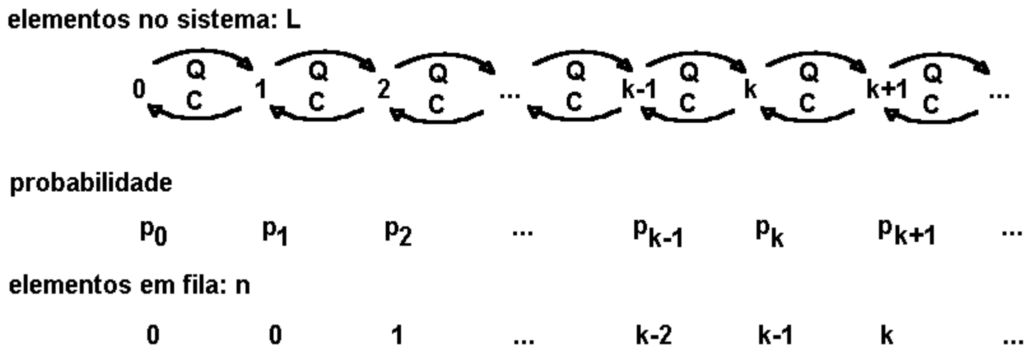
aleatoriedade: devido às flutuações de demanda e capacidade
$Q[t] > C[t]$ em alguns instantes, gerando filas mesmo
com $\overline{Q} < \overline{C}$ e na ausência de interrupções de tráfego.

Interrupções de tráfego (com operação bloqueada para a corrente de tráfego)
correspondem a períodos temporários com $C[t]=0$ e, durante
as interrupções, qualquer demanda transforma-se em fila.

⇨ **efeito de chegadas e partidas aleatórias:** situação estacionária

há fila mesmo quando $\overline{Q} < \overline{C}$, função do índice de utilização $X = Q/C$
e da aleatoriedade das chegadas e atendimentos;
modelos da Teoria de Filas tradicional, em regime estacionário (X<1).

fila simples (apenas uma posição) com chegadas e saídas poissonianas:



estado do sistema: k=número de elementos no sistema (probabilidade p_k)
probabilidade de mudança de estado (a partir do estado k)
com chegadas: $\pi_{k,k+1} = \lambda.\delta t$ com $\lambda = Q$ (para k+1 elementos)
com saídas: $\pi_{k,k-1} = \mu.\delta t$ com $\mu = C$ (para k-1 elementos)

equilíbrio em regime estacionário: média de saídas=média de chegadas
estado k: $p_k.\pi_{k,k+1} = p_{k-1}.\pi_{k-1,k} \Rightarrow Q.p_{k-1} = C.p_k \Rightarrow p_k = \frac{Q}{C}.p_{k-1} = X.p_{k-1}$
$\therefore p_k = X^k.p_0$ e como $\sum_k p_k = 1$, tem-se $p_0 = 1 - X$ e $p_k = X^k.(1-X)$
o que permite obter diversas variáveis médias de interesse a partir
da demanda Q, da capacidade C e da taxa de utilização X !

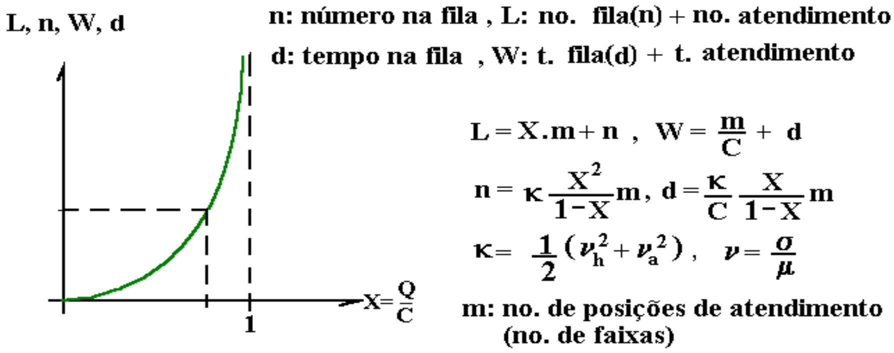
exemplo: $\overline{L} = \sum_{k=0} k.p_k = \frac{X}{1-X}$, $\overline{L}_q = \sum_{k=1} k.p_k = \frac{X^2}{1-X}$ (note que $\overline{L} = \overline{L}_q + X$)

são o número médio de elementos no sistema e o número médio de
elementos em fila no sistema (excluindo o elemento em
atendimento, saindo do sistema), correspondentes a $\overline{n}$!

fila aleatória=reserva de veículos para garantir aproveitamento da capacidade !

a existência da fila é a condição para aproveitar a capacidade
quando não há demanda (necessária quando a demanda e
a capacidade flutuam com alguma aleatoriedade).

generalização (mais de uma posição, chegadas e saídas genéricas):



ν_h : para intervalo entre chegadas ν_a : para tempos de atendimento

exemplo: $C = 3000$ v/h (2 faixas), coef.variação $\nu_h^2 = 2{,}0$ e $\nu_a^2 = 1{,}0 \therefore \kappa = 1{,}5$

para aproveitar 50% da capacidade $\bar{n} = 1{,}5.\frac{0{,}5^2}{1-0{,}5}.2 = 1{,}5$ v (0,75/faixa)

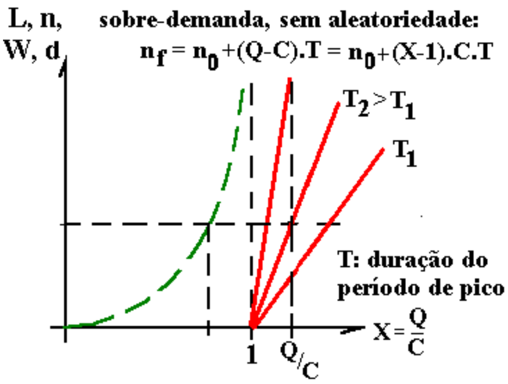
para aproveitar 80% da capacidade $\bar{n} = 1{,}5.\frac{0{,}8^2}{1-0{,}8}.2 = 9{,}6$ v (4,8/faixa)

o atraso pode ser calculado diretamente da relação $\bar{n} = q.\bar{d}$

no primeiro caso $q = Q = 1500$ v/h (0,41 v/s) e $\bar{d} = 1{,}5/0{,}41 = 3{,}6$ seg,

no segundo caso $q = Q = 2400$ v/h (0,66/s) e $\bar{d} = 9{,}6/0{,}66 = 14{,}4$ seg

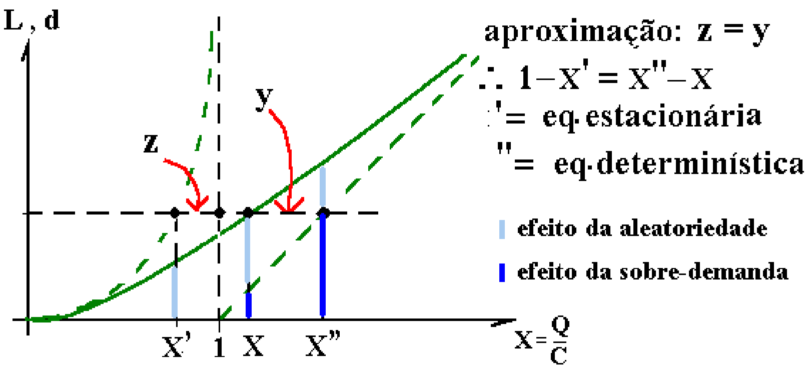
as fórmulas estacionárias dão valores que se desenvolveriam em um período de tempo suficientemente grande para atingir a situação de equilíbrio ($\bar{n} = \text{cte}$).



com sobre-demanda (Q>C), a condição somente pode perdurar por períodos de tempo limitados (caso contrário as filas e os atrasos cresceriam indefinidamente mesmo sem o efeito da aleatoriedade) e não é possível usar fórmulas estacionárias!

⇨ **análise geral em regime transitório:** evolução das sobre-filas no período.

não há solução exata: solução aproximada por transformação de coordenadas ; admite que para a fila ou atraso com a taxa de utilização real X são iguais:
- a "reserva" no regime transitório em relação ao determinístico ($X''-X$) e
- a "reserva" equivalente no regime estacionário com aleatoriedade ($1-X'$).



para fila $\bar{n}_f$ (transiente com aleatoriedade) com utilização X :
com regime transiente determinístico $\bar{n}_f = n_f = n_i + (X''-1).C.T$;
com uma utilização maior X'' em T, desprezando a aleatoriedade;
com regime estacionário e aleatoriedade $\bar{n}_f = \bar{n} = \kappa\dfrac{(X')^2}{1-(X')}.m$;
com uma utilização menor X' e com duração indefinida (infinita).

aproximação por transformação coordenadas: $1-X' = X''-X \Rightarrow X''-1 = X - X'$

$$\Rightarrow X''-1 = \frac{\bar{n}_f - \bar{n}_i}{C.T} \Rightarrow X' = X - \frac{\bar{n}_f - \bar{n}_i}{C.T} \quad (N_{MAX} = C.T,\ \ N_{MED} = Q.T = X.C.T)$$

$$\therefore \bar{n}_f = \kappa.m.\frac{\left(X - \dfrac{\bar{n}_f - \bar{n}_i}{C.T}\right)^2}{1-\left(X - \dfrac{\bar{n}_f - \bar{n}_i}{C.T}\right)} \Rightarrow \bar{n}_f = \frac{C.T}{2}\left[\sqrt{A^2+B}+A\right], \text{ sendo}$$

$$A = \frac{(X-1).C - 2.\kappa/T.m.X + (C - 2.\kappa/T.m).n_i/(C.T)}{C - \kappa/T.m} \cong (X-1) \text{ e}$$

$$B = \frac{4.\kappa/T.m.(n_i/(C.T)+X)^2}{C-\kappa/T.m} \cong \frac{4.\kappa.X^2}{C.T} = \frac{k.X^2}{C.T} \quad (\cong \text{ vale para } \bar{n}_i << C.T)$$

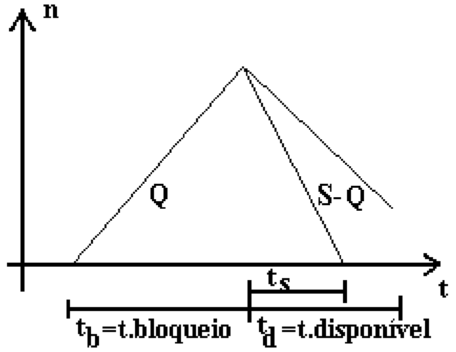
que pode ser aplicada sucessivamente aos sub-períodos ($\bar{n}_{i2} = \bar{n}_{f1}, \ldots$)

fila média: $\bar{\bar{n}} = \dfrac{\bar{n}_i + \bar{n}_f}{2} = \dfrac{C.T}{4}\left[\sqrt{A^2+B}+A+\dfrac{2.\bar{n}_i}{C.T}\right] \cong \dfrac{C.T}{4}\left[\sqrt{A^2+B}+A\right],\ \bar{\bar{d}} = \dfrac{\bar{\bar{n}}}{C}$

que pode ser integrada e ajustada para calcular o atraso/fila médios com um perfil de demanda típico ⇒ fórmulas dinâmicas .
análise mesmo com $Q>C$ para T finito: crescimento e dissipação das filas !

VER EXERCÍCIO ROTATÓRIA

⇨ **interrupções:** efeito de bloqueio temporário (com chegadas regulares/uniformes)
$d_r = d_{rm} + d_{rq}(x) = d_{mc} + d_{qc}(x)$ (função do tipo de controle de tráfego).



com chegadas regulares e uniformes

total de veículos $n = Q.(t_b + t_d) = Q.t$

atraso total $D_b = \dfrac{n_b(t_b + t_s)}{2}$

$$t_s = \frac{Q.t_b}{S - q} \Rightarrow D_b = \frac{Q.t_b}{2}\left(t_b + \frac{Q.t_b}{S - Q}\right)$$

atraso médio $d_p = \dfrac{D_b}{n} = \dfrac{t_b}{2.t}\left(\dfrac{t_b}{1 - Q/S}\right)$

$$\therefore d_p = \frac{(1-u).t_b}{2.(1-y)}, \text{ com } u = 1 - \frac{t_b}{t}, y = \frac{Q}{S}$$

d_{mc}: atraso fixo de controle (q<<C)

$$\left.\begin{array}{l} P[\text{chegar em } t_b] = t_b/t \\ \text{com espera media } t_b/2 \end{array}\right\} \therefore d_{mc} = \frac{t_b^2}{2.t}$$

d_{qc}: atraso variável de controle (q)

$$d_{qc} = \frac{t_b}{2.t}\left[\left(\frac{t_b}{1 - Q/S}\right) - t_b\right] = \frac{t_b}{2.t}\left(\frac{t_b.Q/S}{1 - Q/S}\right)$$

filas e atrasos formados por gargalos momentâneos mesmo quando $\overline{Q} < \overline{C}$

as interrupções de tráfego dividem a operação do tráfego em períodos distintos:

- tempo bloqueado (t_b), com $C[t] = 0$, em que toda a demanda gera filas

- tempo disponível (t_d), que pode ser dividido em dois períodos:
  - dissipação da fila inicial (t_s): ocorre sempre que há fila inicial n_b (a fila acumulada no tempo bloqueado)
  - escoamento da demanda (t_u): ocorre sempre após a dissipação (se o tempo disponível é suficiente)

portanto, além de atrasos, as interrupções de tráfego causam redução de capacidade em relação à capacidade potencial em fluxo contínuo pelo efeito de formação de fila e pelo bloqueio parcial do movimento.

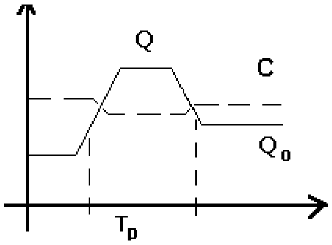
⇨ **estimativa de filas/atrasos totais:** procedimento normal calcula dois termos

- sobre-fila/sobre-atraso: é o efeito da aleatoriedade e sobre-demanda;

- fila/atraso regular: é o efeito das interrupções, com demanda regular (isto é, sem aleatoriedade e sem sobre-demanda).

fila/atraso regular é função do controle de tráfego, do fluxo em pelotões, ...

⇨ **fórmulas generalizadas:** obtidas admitindo um perfil de chegadas típico (em geral, retangular) para o período com duração T_P (que inclui todo o pico).



duração do pico: T_P

demanda antes: Q'_0

demanda depois: Q''_0

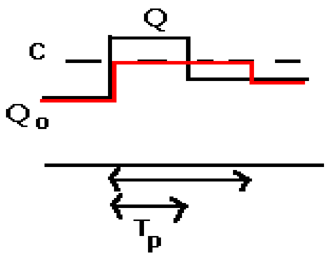
demanda no pico: Q

em geral, avaliam apenas o sobre-atraso (que combina o efeito da aleatoriedade e da sobre-demanda) e incluem no atraso somente o tempo em fila (exceto quando o atendimento é aleatório como em interseções não semaforizadas).

podem utilizar hipóteses simplificadas para avaliar a situação fora pico ($Q'_o = Q''_o$ ou $n'_o = n''_o = 0$ para a sobre-fila) e para estimar os demais componentes (por exemplo: supor chegadas regulares como em interseções semaforizadas).

podem ser admitidos perfis de chegada mais gerais (trapezoidal ou senoidal, ...) mas o problema básico é a caracterização do período de pico !

⇨ **caracterização do período de pico:**



sobre-demanda ≠ saturação

com sobre-demanda:
- atraso médio ≠ máximo
- fila média ≠ máxima

usual: pico = sobre-demanda,
- atraso, fila = médios no pico,
- também fila máxima atingida.

o período de pico pode ser delimitado pela taxa de utilização de sub-períodos sucessivos, incluindo todos os sub-períodos com $X > 80-90\%$ (para o caso em que há sobre-demanda razoável) ou o fluxo do sub-período de pico (em geral com a duração de 15 minutos).

VER EXERCÍCIO FILAS E ATRASOS *

⇨ fila/atraso regular, sobre-fila/sobre-atraso:

sobre-fila (n_s): é o efeito decorrente da sobre-demanda (gargalos) e de flutuações aleatórias na demanda ou capacidade (e da interação entre os componentes) em geral avaliado com fórmulas dinâmicas !

fila regular (n_r): efeito adicional decorrente do efeito dos dispositivos de controle de tráfego, que não está incluído nos termos devidos a gargalos e aleatoriedade (ocorre mesmo com demanda menor que a capacidade, mesmo com ambas regulares e uniformes) !

estimativa usual: $n = n_r + n_s$ e $d = n/q$ (ou $d_P = d_r + d_s$ e $n = q.d_P$)

- fila (atraso) médios quando o efeito varia ao longo do tempo;
- usualmente inclui como componente a fila/atraso de controle;
- pode eventualmente incluir termos de atraso de marcha (sem fila).

⇨ fila/atraso total:

conceito mais genérico: atraso total = tempo real – tempo ideal ...

termos de correção do atraso parado para o atraso total na rota:

atraso em redução de velocidade: $d_V = L/V_r - L/V$ (redução $V \to V_r$)

atraso de desaceleração/aceleração (velocidade $V_o \to V_f \to V_o$)

- tempo de desaceleração: $t_b = \dfrac{V_o - V_f}{b}$, aceleração: $t_a = \dfrac{V_o - V_f}{a}$

- $x_b = \dfrac{V_o^2 - V_f^2}{2.b}$ e $x_a = \dfrac{V_o^2 - V_f^2}{2.a}$ $\Rightarrow$ atraso $d_{ba} = t_b + t_a - \dfrac{x_b + x_a}{V_o}$

$$\therefore t_{ba} = t_b + t_a = \frac{V_o^2 - V_f^2}{2.V_o} \cdot \left(\frac{1}{b} + \frac{1}{a}\right) \text{ ou, se } V_f = 0,\ t_{ba} = \frac{V_o}{2} \cdot \left(\frac{1}{b} + \frac{1}{a}\right)$$

não há fila parada (somente aumento na densidade de tráfego),

medida de atraso depende da definição de velocidade de percurso !

termos de correção do atraso total incluindo circulação (desvio de rota):

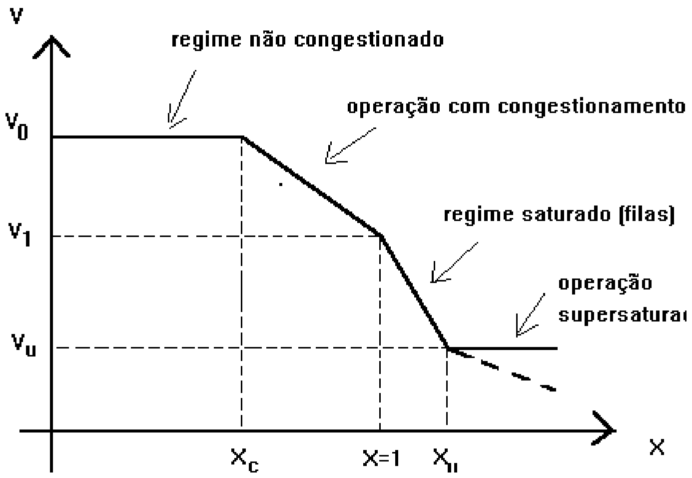
atraso em desvio da rota direta: $d_L = L'/V' - L/V$ (ou $d_L = \Delta L/V$ com V).

VER EXERCÍCIO ATRASOS DE MARCHA

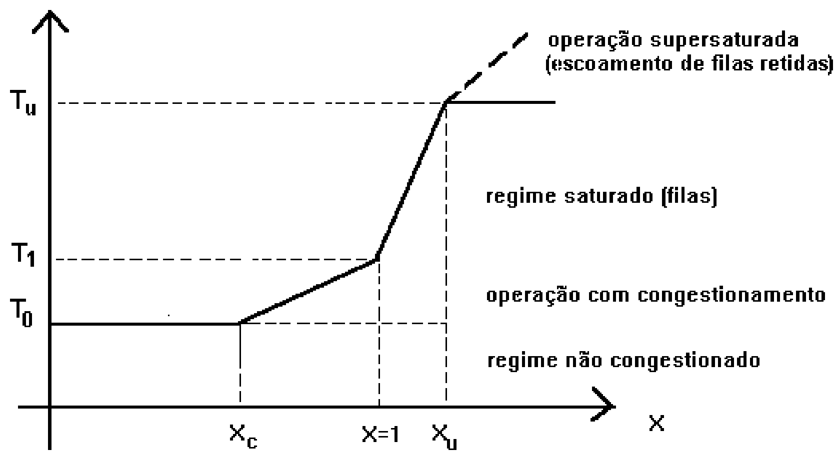
Função de Desempenho

é a síntese das características operacionais dos elementos viários (capacidade de tráfego, velocidade de fluxo livre).

$V = f[V_f, \text{trafego}]$, onde V_f é a velocidade de fluxo livre;



$T = h[T_o, \text{trafego}]$, onde T_o é o tempo de percurso básico;



para x>1, a situação analisada tem de ser transitória e as curvas de desempenho refletem as condições de recuperação após a saturação dos elementos viários.

intervalo entre passagens e tempo de passagem:

tempo de passagem inclui todo o tempo para realizar a manobra no trecho
$\neq$ intervalo entre passagens inclui somente o tempo para liberar a seção.

capacidade maior $\Leftrightarrow$ intervalo mínimo entre passagens menor
$\neq$ tempo de passagem menor.

intervalo entre passagens e tempo de serviço:

tempo de serviço:
= tempo para chegar ao topo da fila (atraso de congestionamento);
+ tempo para realizar a manobra (atraso de controle e tempo de passagem);
+ outros acréscimos de tempo de viagem devidos à interseção (atraso total).

$$T = \frac{L}{V} + d \quad \text{e} \quad d = d_m + d_q[X]$$

- afetam d_m (atraso fixo/geométrico)
  atrasos em semáforos (sem fila) com chegada durante vermelho;
  atrasos esperando brechas (no topo da fila) em vias secundárias;
  geram fila parada (portanto, são atrasos parados).
- afetam d_q (atraso de congestionamento)
  o nível de utilização da via $X = \frac{Q}{C}$ (fluxos em v / h ou em v / s) e
  fatores aleatórios que causam flutuação da demanda e capacidade.
- afetam V (velocidade de percurso:)
  fatores que afetam o tempo para realizar a manobra (diferentes em vias expressas, cruzamentos semaforizados ou não semaforizados) ou introduzem termos adicionais relacionados com atraso em marcha (desaceleração e aceleração; velocidade de percurso restringidas; ou distâncias do trajeto na via ou interseção).

tempo de serviço $\neq$ intervalo entre passagens de veículos.

$\therefore$ capacidade suficiente (passagem) $\neq$ velocidade adequada (serviço) !

(melhoria da capacidade   reduz o atraso de congestionamento local
e aumenta a velocidade de percurso ...).

Nível de serviço

medida qualitativa relativa às condições de operação do tráfego do ponto de vista dos usuários.

influência de outros usuários;
influência das interrupções;
estabilidade da operação.

A fluxo livre, manobra livre;
B restrições iniciais ao usuário;
C vigilância constante;
D importância de acidentes, tempo de recuperação;
E movimento uniforme, limite de fluxo;
F "demanda" > capacidade.

em geral, os níveis de serviço podem ser relacionados com um nível limite dado de utilização da capacidade $(\frac{Q}{C})$.

⇨ **"volume" de serviço:** máximo fluxo que pode ser acomodado dentro de cada nível de serviço (A a E): $VS_n = C \cdot x_n$.

⇨ **medidas de eficácia:** critério (mensurável em condições reais e previsível em condições de projeto) que caracteriza o nível de serviço.

Medidas de Eficácia para Nível de Serviço Definição (Tabela 3-1 do HCM/2000, adaptada)

Tipos de Infra-estrutura	Medidas de Eficácia
Vias Urbanas (Arteriais)	Velocidade Média Global (km/h)
Interseções Semaforizadas	Atraso Médio de Controle (seg/v)
Interseções Não Semaforizadas	Atraso Médio de Controle (seg/v)
Travessia de Pedestres	Atraso Médio de Controle (seg/ped)
Vias de Pista Simples	% de Tempo Seguindo Pelotão Velocidade Média (km/h)
Vias de Múltiplas Faixas	Densidade (veq/km/fx) Velocidade de Fluxo Livre (km/h)
Vias Expressas	
Segmentos Básicos	Densidade (veq/km/fx)
Seções de Entrelaçamento	Densidade (veq/km/fx) Velocidade Média
Ligações Expressas	Densidade (veq/km/fx) Velocidade Média
Vias de Pedestres	Espaço Médio (m^2/ped)
Transporte Coletivo	Fator de Ocupação (m^2/ass, pax/assento)

Caracterização dos Níveis de Serviço (Tabela 2-5 do AASHTO/94-adaptada)

Nível de Serviço	Vias Expressas (com Acesso Controlado)	Vias Rurais de Múltiplas Faixas (sem Acesso Controlado)	Vias de Pista Simples	Vias Arteriais Urbanas e Suburbanas
A	Fluxo livre. Velocidade média $\geq$ 112 km/h em c.i.. Fluxo até 32% da capacidade (ou 700 veq/h/fx em c.i.).	Velocidade média de 96 km/h em c.i.. O fluxo é limitado em 33% da capacidade(ou 720 veq/h /fx em c.i.).	Velocidade média de 93 km/h em c.i.. A maioria das manobras de ultra-passagem pode ser feita com pouco ou nenhum atraso. O fluxo de ser-viço com cerca 15% da capacidade (ou 420 veq/h/fx em c.i.), nos dois sentidos, pode ser atingido.	Velocidade média corresponde a aproximadamente 90% da velocidade de fluxo livre. O atraso parado nas interseções semaforizadas é mínimo.
B	Fluxo razoavelmente livre. Velocidade média $\geq$ 112 km/h em c.i.. Fluxo de serviço até 51% da capacidade (ou $\leq$ 112 veq/h/fx em c.i.)	Fluxo razoavelmente livre. Volume de tráfego no qual as ações do veículo a frente vão ter alguma interferência nos veículos seguintes. O fluxo não vai exceder a 55% da capacidade (ou a 1200 veq/h/fx em c.i.) com velocidade média de 96 km/h em c.i..	Velocidade média de 88 km/h em c.i.. Fluxo tem limite de 27% da capacidade com visibilidade contínua para ultrapassagem. Fluxo de 750 veq/h/fx, nos dois sentidos, deve ser carregada em c.i..	Velocidade média cai devido aos atrasos e aos conflitos entre veículos nas interseções, mas mantêm-se como 70% da velocidade de fluxo livre. Atrasos não são muito significativos.
C	Operação estável mas tornando-se mais crítica. Velocidade média de 110 km/h em c.i.. Fluxo de serviço até 75% da capacidade (ou $\leq$ 1640 veq/h/fx em c.i.).	Fluxo estável não excedendo a 75% da capacidade (ou a 1650 veq/h/fx em c.i.) mantendo a princípio velocidade média de 95 km/h em c.i..	Fluxo ainda estável. Ve-locidade média de 84 km/h em c.i. com fluxo total até 43% da capacidade (ou 1200 veq/h/fx em c.i.) com visibilidade contínua para ultrapassagem nos dois sentidos.	Operação estável. Maio-res filas nos semáforos resultam em velocidades médias de aproximada-mente 50% das velocida-des de fluxo livres. Motoristas vão sofrer incômodos apreciáveis
D	Velocidades menores para fluxo estável. Ope-ração aproxima-se da instabilidade e é susceptível a flutuações de condições. Velocida-de média de aproxima-damente 101 km/h em c.i.. Fluxo de serviço até 92% da capacidade (ou fluxo não pode exceder a 2015 veq/h/fx em c.i.)	Aproximando-se da instabilidade com fluxo de 89% da capacidade (ou 1940 veq/h/fx em c.i.) com velocidade média de 92 km/h em c.i..	Aproximando-se do fluxo instável. Velocidade média de aproximada-mente 80 km/h em c.i.. Fluxo, nos dois sentidos, até 64% da capacidade com visibilidade contínua de ultrapassagem oportuna, (ou 1800veq/h/fx em c.i.).	Aproximando-se do fluxo instável. Velocidade média cai para 40% da velocidade de fluxo livre. Atrasos nas interseções tornam-se grandes.
E	Fluxo instável. Velocida-de média de 96km/h em c.i.. Fluxo na capacidade (ou de 2200 veq/h/fx em c.i.). A corrente de tráfe-go não consegue dissi-par até as menores per-turbações. Qualquer inci-dente pode produzir um sério congestionamento.	Fluxo com 100% da capacidade (ou 2200 veq/h/fx em c.i.). Velocidade média de aproximadamente 88 km/h em c.i..	Velocidade média próxima de 72 km/h em c.i.. Fluxo em c.i., nos dois sentidos, igual a 2800 veq/h/fx. Nível E pode nunca ser alcançado. Operação pode ir diretamente do Nível D para Nível F	Velocidade média de 33% da velocidade de fluxo livre. Fluxo instável. Filas contínuas nas aproximações das interseções
F	Fluxo forçado. Vias funcionam como depósi-to de veículos à montan-te dos gargalos. Veloci-dade média perto de 50 km/h em c.i. com opera-ção em pára-anda.	Fluxo forçado, condição de congestionamento com características de tráfego amplamente variáveis.	Fluxo congestionado forçado com caracterís-ticas imprevisíveis. Operando com velocidade menor que 72km/h em c.i..	Velocidade média entre 25 e 33% da velocidade de fluxo livre. Acúmulo de veículos, grandes atrasos nas aproxima-ções das interseções semaforizadas.

- **Obs: c.i. = condições ideais.**

INTERAÇÃO DEMANDA X OFERTA (EQUILÍBRIO)

⇨ distribuição entre rotas alternativas:

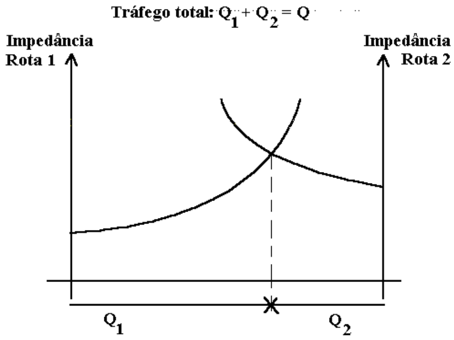
usuários buscam o melhor nível de serviço (menor impedância)
critério de escolha dos usuários: custo generalizado;

percepção do tempo de viagem: em movimento, em filas/congestionamento, em perigo de acidente ,...;

percepção de custos de operação, pagamentos de estacionamento ou pedágio, desgaste do veículo ,...;

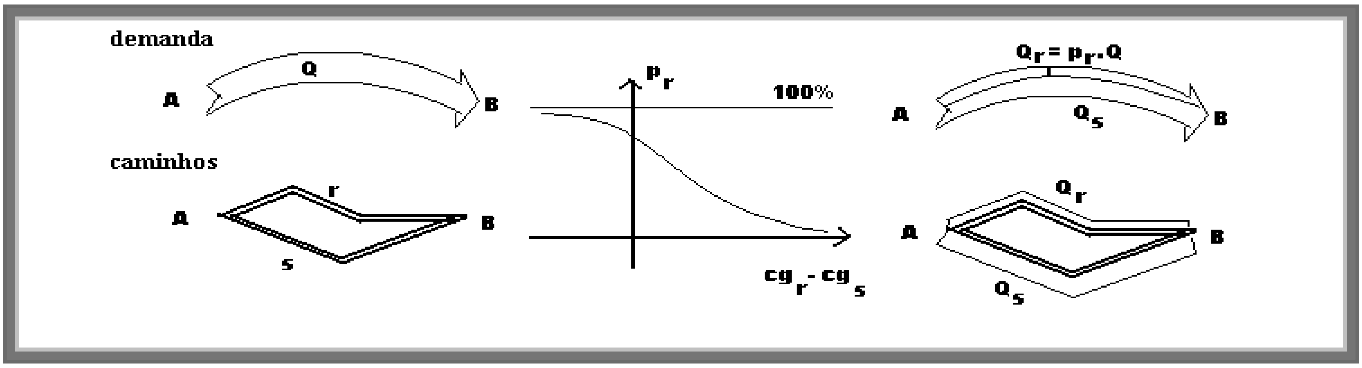
conhecimento do sistema viário e das condições de operação.

interação: escolha dos usuários afeta as condições de operação



parte da demanda reprimida pode estar em rotas alternativas !

a escolha entre rotas pode ser expressa em função da diferença de custo generalizado entre as diferentes opções disponíveis;
determina a alocação do tráfego às rotas (e aos trechos de via);
normalmente as previsões são feitas em termos probabilísticos porque parte relevante das informações não é observada.



⇨ distribuição entre faixas adjacentes:

mesmo princípio pode ser aplicado na operação de um trecho de via mas, opções envolvem alternativas mais simples (como escolha de faixas). equilíbrio pode considerar variáveis de operação de forma direta.

equilíbrio entre faixas (filas) paralelas determina divisão de demanda;

critério de escolha dos usuários entre filas adjacentes:

- tempos de serviço (atrasos) iguais ou filas iguais (observável).

a igualdade pressupõe que as demais parcelas do custo generalizado são similares, caso contrário, pode haver um diferencial dado . (exemplos: faixa lindeira, faixa com conversão à esquerda, ...)

admitir taxas de utilização (X) iguais pode ser um critério aceitável

VER EXERCÍCIO PEDÁGIOS

⇨ alteração da demanda total de viagens:

o custo de viagem, considerando as diferentes alternativas, influencia a realização (viabilidade) das atividades individuais.

embora a maior parte dos efeitos seja de mudança de rota ou modo de realização da viagem (com auto, ônibus, à pé, ...), a supressão de viagens (ou a geração de novas viagens) pode também ocorrer ...

VER EXERCÍCIO ANÁLISE OPERACIONAL *

PRINCÍPIOS DE SEGURANÇA DE TRÁFEGO

PRINCÍPIOS DE SINALIZAÇÃO VIÁRIA

EXERCÍCIOS SELECIONADOS