

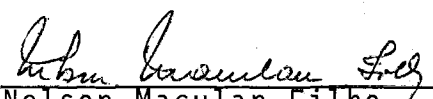
CONTRÔLE SEMI-AUTOMÁTICO DE TRÁFEGO E
SEGURANÇA EM TÚNEIS E VIAS EXPRESSAS

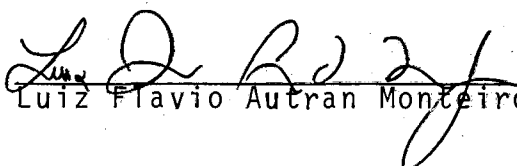
Ranulpho Lins Costa Junior

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS PROGRAMAS DE
PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE
JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO
GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS (M.Sc.).

Aprovada por:


Shankar P. Bhattacharyya


Nelson Maculan Filho


Luiz Flavio Autran Monteiro Gomes

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

Agosto de 1980

COSTA JUNIOR, RANULPHO LINS

Contrôle semi-automático de tráfego e segurança em túneis e vias expressas |Rio de Janeiro| 1980.

X, 202 p. 29,7 cm (COPPE-UFRJ, M.Sc., Engenharia de Sistemas e Computação, 1980).

Tese - Univ.Fed.Rio de Janeiro. Fac. Engenharia.

1. Contrôle de tráfego I. COPPE-UFRJ II. Título (Série).

AGRADECIMENTOS

Ao orientador desta tese, Ph.D., Shankar P. Bhattacharyya, pelo permanente apoio e incentivo.

À minha esposa e filhos, pelos muitos momentos de sacrifício e renúncia.

A todos aqueles que, direta ou indiretamente, ajudaram na realização deste trabalho.

PREFÁCIO

O presente trabalho é o resultado da aplicação, explícita ou implícita, das teorias de sistemas de controle¹⁹ associadas a uma experiência de nove anos na operação e manutenção dos maiores túneis do Brasil (Rebouças, Dois Irmãos, Noel Rosa e Santa Barbãra).

Não se deve portanto buscar, neste trabalho, desenvolvimentos analíticos, mas sim uma estratégia de controle, formulada sôbre condições altamente realistas, observadas rotineiramente na participação direta dos trabalhos nas pistas desses túneis e suas vias elevadas.

Ao conduzir vítimas de acidentes automobilísticos a hospitais, muitas vezes ouvimos a frase "se chegasse minutos mais tarde, nada poderíamos fazer!". Obviamente estes minutos estão nas mãos das equipes que operam as rodovias.

Por mais que treinemos e aparelhemos essas equipes, sempre carecerão das necessárias sincronização, sequenciação e quase simultaneidade nas várias condições que se devem estabelecer ao longo de toda a via, em casos de acidentes ou incêndios; principalmente quando ocorrem no interior das galerias dos túneis. Este resultado já nos recompensaria.

Assim, procuramos de forma simples, transferir para um sistema semi-automatizado as tarefas que são precariamente feitas, e as impossíveis de serem feitas, pelas equipes de operação, visando fluidez do tráfego *subordinada* às condições da segurança e rápida assistência a vítimas.

Com esse trabalho estamos também fornecendo a nossa experiência, como contribuição para futuros trabalhos nessa área.

RESUMO

Nesta tese, fazemos uso da teoria do fluxo de tráfego e da teoria de sistemas de controle, integradas às técnicas de operação de vias expressas e túneis, para estabelecer um sistema de controle de tráfego que maximize a transferência de veículos, em um determinado intervalo de tempo, levando em consideração as condições de segurança.

ABSTRACT

In this thesis, traffic flow theory and control theory are integrated with operational considerations in expressways and tunnels to design a traffic control system that maximizes the number of vehicles transferred, in a given time interval, taking into account security considerations.

ÍNDICE

	<u>Pág.</u>
<u>CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO</u>	1
<u>CAPÍTULO II - MÉTODOS DETERMINÍSTICOS DA TEORIA DO FLUXO DE TRÁFEGO (ABORDAGEM MACROSCÓPICA)</u>	9
II.1 - O Modelo de Lighthill e Whitham ³ Simplificado.....	9
II.1.1 - Caso de Concentrações Quase Iguais.....	17
II.1.2 - Ondas de Parada.....	18
II.1.3 - Ondas de Partida.....	20
II.1.4 - A Curva de Fluxo-Concentração.....	22
II.2 - O Modelo de Paul I. Richards ⁴	24
II.3 - O Modelo de Richard Haberman ⁵	46
II.3.1 - Tráfego Quase Uniforme.....	49
II.3.2 - Tráfego Não Uniforme.....	62
II.3.3 - Método das Características Aplicado.....	72
II.3.3.1 - Quando um Semáforo Abre.....	72
II.3.3.2 - Quando há um Congestionamento à Frente.....	90
II.3.3.3 - Descontinuidades no Tráfego.....	94
<u>CAPÍTULO III - CONTRÔLE DE TRÁFEGO E SEGURANÇA</u>	104
III.1 - Considerações Iniciais.....	104
III.2 - Objetivo e Justificativa.....	105
III.3 - Estratégia de Contrôles.....	123

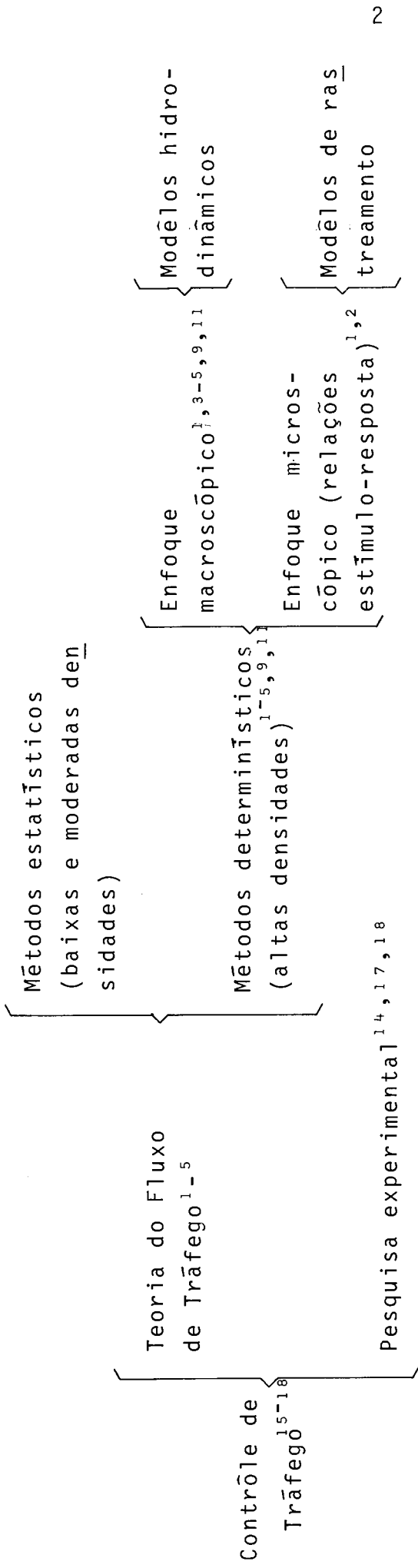
	<u>Pág.</u>
III.3.1 - Detecção da Anormalidade e Identificação da Faixa.....	127
III.3.2 - Qualificação da Anormalidade.....	135
III.3.3 - Seleção e Aplicação das Leis de Controle.....	138
III.3.4 - Fluxograma Simplificado para Via com Três Faixas.....	166
III.4 - Conclusão e Comentário.....	171
<u>CAPÍTULO IV - CONSIDERAÇÕES PARA IMPLEMENTAÇÃO E PERSPECTIVAS PARA TRABALHOS FUTUROS.....</u>	<u>174</u>
<u>APÊNDICE A</u>	190
<u>BIBLIOGRAFIA</u>	200

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

Os estudos de métodos e sistemas de controle de tráfego baseiam-se fundamentalmente na teoria do fluxo de tráfego e nos experimentos realizados em diversas rodovias.

Em linhas gerais, poderíamos traçar o esboço da página seguinte.



É fato facilmente constatado que a qualidade do serviço prestado por uma rodovia degradada ã medida que cresce a procura por ele.

Verificaram os pesquisadores que, para um melhor estudo e estabelecimento dos modêlos matemáticos representativos do comportamento da corrente de tráfego, deveriam dividir o espectro de concentrações (número de veículos por km) em três faixas que passaram a ser designadas como "*tráfego leve*", "*tráfego moderado*" e "*tráfego pesado*"; correspondendo a baixas, médias e altas concentrações de veículos na via, respectivamente.

Qualitativamente, essas faixas poderiam ser identificadas pelas suas características peculiares:

Tráfego leve - O motorista tem liberdade de escolher sua velocidade e sua posição ao longo da via. Há pouca ou nenhuma interferência entre os veículos, de modo que raramente o motorista tem necessidade de atuar sobre seu veículo, condicionado pela presença de outro. A concentração de veículos é muito baixa.

Tráfego moderado - Os veículos trafegam em grupos ou pelotões.

Esses pelotões se formam devido às grandes diferenças de velocidades, conjugadas a moderados valores de concentração, criarem condições eventuais, nas quais os veículos mais rápidos são obrigados a reduzir suas velocidades, forçados por um bloqueio parcial temporário do caminho, exercido por veículos lentos.

Essa condição tem curta persistência, e o motorista consegue realizar sua jornada em um tempo muito próximo do desejado.

Tráfego pesado - Com o aumento da concentração de veículos, aumenta a frequência dos bloqueios temporários, levando os motoristas a desistirem de ultrapassá-los, aumentando consequentemente o comprimento dos pelotões, que acabam se fundindo.

Nessas condições, o motorista conduz o seu veículo totalmente condicionado pela situação à sua volta, visto não poder mudar de faixa nem aumentar a velocidade à sua vontade. A liberdade de movimentos é impedida de forma quase permanente e o tempo de duração da jornada é muito maior que o desejado.

Baseados nas faixas de concentração estabelecidas, os pesquisadores escolhem os métodos de abordagem a utilizar.

Os métodos mais utilizados na construção da teoria do fluxo de tráfego são o estatístico e o determinístico.

A escolha do método mais adequado a cada faixa é orientada por uma analogia entre as condições do tráfego e os estados físicos da matéria:

O tráfego leve é análogo ao estado gasoso, onde cada molécula está livre para se unir a outras;

O tráfego moderado é análogo ao estado de vapor, onde algumas moléculas formaram gotículas e outras estão livres;

e o tráfego pesado é análogo ao estado líquido, onde quase todas as moléculas estão em contato com uma ou mais outras.

Uma quarta analogia foi sugerida por GAZIS¹, entre o tráfego compacto (concentração máxima) e o estado sólido.

Para o tráfego leve, a abordagem é feita com o uso das teorias estatísticas.

Para o tráfego moderado, ainda as teorias estatísticas são as preponderantes.

Aqui, chamamos a atenção para um resultado da teoria de PRIGOGINE¹ que, fazendo uso da mecânica estatística, obteve a distribuição de velocidades para todas as faixas de concentração. Para baixas concentrações, obteve a distribuição de velocidade livre; para concentração finita, a distribuição é alterada em direção às baixas velocidades; e para alguma concentração crítica, a distribuição de velocidades muda bruscamente. Estes fatos sugerem que esta variação corresponde à passagem das condições individuais para as condições coletivas do fluxo de tráfego.

Esta mudança brusca da distribuição de velocidades, parece estabelecer uma fronteira de eficiência entre os métodos estatísticos e os métodos determinísticos.

Enquanto os métodos estatísticos fazem uso das distribuições e das médias dos valores das variáveis e parâmetros, os métodos determinísticos fazem uso somente dos valores médios.

Para o tráfego pesado, são usados basicamente duas teorias, constituídas de métodos determinísticos; a "*Teoria macroscópica*" e a "*teoria microscópica*".

A teoria macroscópica estuda o comportamento de consideráveis grupos de veículos, sem se preocupar com o comportamento de cada veículo individualmente.

Essa teoria é análoga às teorias da dinâmica dos fluídos ou teorias dos meios contínuos.

Uma importante e poderosa característica desta teoria, é a "*conservação dos veículos*". Ela estabelece que, em um processo normal de condução dos veículos, nenhum veículo pode ser criado ou destruído, em um trecho da via sem entradas e sem saídas. É particularmente usada para descrever a propagação de ondas na corrente de tráfego, sua velocidade de propagação e o comportamento dos veículos passando através dessas ondas.

A teoria microscópica estuda o comportamento típico de um veículo seguindo outro (rastreamento).

A abordagem microscópica levou à teoria denominada "*rastreamento*", a qual dá formulação às relações estímulo-

resposta, obtidas quando um veículo procura seguir atrás de outro.

O que o segundo veículo faz, ao rastrear o primeiro, é regular sua aceleração; considerada ser uma resposta às diversas variáveis que compõem um estímulo.

Os estímulos mais importantes são a velocidade relativa e o espaçamento entre veículos, pois determinam o sinal da resposta.

Se o veículo rastreador está muito próximo do veículo rastreado, a resposta será uma desaceleração; se ao contrário, está perdendo terreno, a resposta será uma aceleração.

Da mesma forma, se a velocidade do veículo rastreador é maior que a do veículo rastreado, a resposta será uma desaceleração; se for menor, a resposta será uma aceleração.

Um importante avanço, no desenvolvimento da teoria do fluxo de tráfego, foi feito quando uma consistência entre a abordagem macroscópica e a microscópica foi encontrada. Através de experimentos microscópicos, foi possível prever parâmetros da teoria macroscópica. Isto foi alcançado por GAZIS, HERMAN e POTTS².

Grande parte da teoria do fluxo de tráfego está ligada ao fluxo de tráfego pesado. Nesta faixa de concentração

de veículos, são da maior importância as teorias do "*streamen*
to" (abordagem microscópica) e teoria das ondas cinemáticas
(abordagem macroscópica).

Particularmente, para os sistemas de controle de
tráfego que objetivam melhorar as condições de escoamento em
uma via, a faixa de concentrações de interesse é a de "*tráfego*
pesado". Usaremos no nosso trabalho a abordagem macroscópica.

CAPÍTULO II

MÉTODOS DETERMINÍSTICOS DA TEORIA
DO FLUXO DE TRÁFEGO
(ABORDAGEM MACROSCÓPICA)

II.1 - O MODELO DE LIGHTHILL E WHITHAM³ SIMPLIFICADO

A teoria macroscópica do fluxo de tráfego trata a corrente de tráfego como um fluido contínuo, de densidade variável.

Só importa o comportamento coletivo dos veículos, sendo ignorado o comportamento individual.

Nos trechos de rodovia onde não hajam entradas ou saídas para veículos, poderá ser aplicada a "lei de conservação dos veículos". Esta lei tem a expressão

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = 0 \quad (\text{II.1})$$

onde: $k = k(x, t)$ é a concentração média de veículos;

$q = q(x, t)$ é o fluxo médio de tráfego;

x é a distância medida sobre a via; e

t é o tempo.

A teoria macroscópica não inclui, explicitamente, os parâmetros do motorista, do veículo e da rodovia.

A primeira e mais importante contribuição à teoria macroscópica do fluxo de tráfego foi feita por LIGHTHILL e WHITHAM³, ao inferirem uma analogia entre o fluxo de tráfego e o comportamento do movimento das cheias nos rios e fluxos supersônicos de ar em redor dos projéteis.

A hipótese fundamental é que, em qualquer ponto da via, o fluxo é uma função da concentração; $q = q(k)$.

Esta hipótese implica que uma ligeira variação no fluxo é propagada através da corrente de tráfego com uma onda cinemática, cuja velocidade em relação à via é a inclinação da curva fluxo x concentração; Figura II.2

Foi mostrado, para os fluidos, que ondas cinemáticas podem caminhar juntas e formar ondas de choque, nas quais, reduções razoavelmente grandes de velocidade ocorrem muito rapidamente. Este fenômeno é também conhecido em rodovias, notadamente no final de pelotões movendo-se lentamente ou de filas de veículos atrás de um "estrangulamento" (passagem estreita, curva, aclave, etc.).

O fluxo q e a concentração k são têm significado como valores médios. O propósito da teoria é determinar como estes valores médios variam no espaço e no tempo. Procura fazer

esta determinação considerando a velocidade com a qual as variações em q e k são propagadas ao longo da rodovia.

Os resultados de Lighthill e Whitham³ serão aqui mostrados através de um desenvolvimento obtido de um trabalho de L. A. Pipes⁹.

Considere o movimento de duas concentrações distintas de tráfego k_1 e k_2 , ao longo de uma rodovia reta.

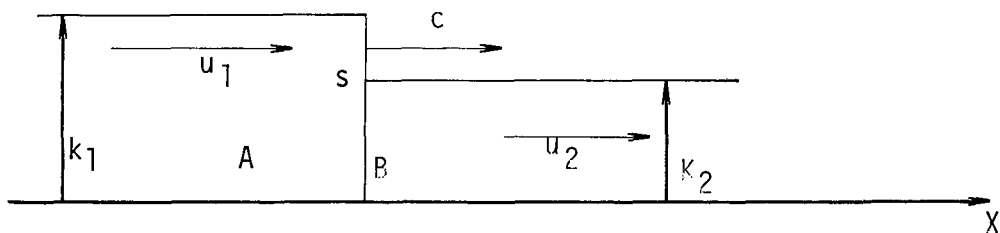


Figura II.1

As duas concentrações k_1 e k_2 são separadas pela linha vertical S , a qual tem uma velocidade c .

Esta velocidade \bar{c} é considerada positiva se a linha S move-se na direção positiva de x , que é também a direção positiva das velocidades u_1 e u_2 dos veículos nas regiões A e B , respectivamente.

Notações:

u_1 = velocidade média dos veículos na região A;

u_2 = velocidade média dos veículos na região B;

$U_{r1} = (u_1 - c)$ = velocidade relativa dos veículos na região A para a linha móvel S; e

$U_{r2} = (u_2 - c)$ = velocidade relativa dos veículos na região B para a linha móvel S.

No tempo t , o número N de veículos cruzando a linha divisória S é

$$N = U_{r1} k_1 t = U_{r2} k_2 t \quad \text{ou}$$

$$(u_1 - c) k_1 = (u_2 - c) k_2$$

Esta equação é um enunciado da lei de conservação da matéria, aplicada aos veículos que cruzam a linha S, e pode ser escrita na forma

$$u_1 k_1 - u_2 k_2 = c(k_1 - k_2)$$

Se o valor médio do fluxo de tráfego na região A é q_1 , e o valor médio do fluxo de tráfego na região B é q_2 , uma *relação empírica fundamental* na teoria do fluxo de tráfego (fluxo = concentração x velocidade) nos permite escrever

$$q = u k \quad (\text{I.2})$$

logo $q_1 = k_1 u_1$ e $q_2 = k_2 u_2$.

Em termos de q_1 e q_2 , a equação fica

$$c = \frac{q_2 - q_1}{k_2 - k_1} \quad (\text{I.3})$$

Se os valores dos fluxos e das concentrações são aproximadamente iguais

$$(q - q_1) = \Delta q \quad \text{e} \quad (k - k_1) = \Delta k$$

então

$$c = \frac{\Delta q}{\Delta k} \quad (\text{II.4})$$

e no limite

$$c = \frac{dq}{dk} \quad (\text{II.5})$$

Esta é a equação da velocidade c , com a qual *pequenas perturbações* na corrente de tráfego são propagadas.

No caso geral, em que as diferenças das concentrações nos dois lados da linha móvel S não são infinitesimais, a

equação a usar deve ser escrita na forma

$$c = \frac{u_1 k_1 - u_2 k_2}{k_1 - k_2} \quad (\text{II.6})$$

Até agora, a análise elementar não considerou qualquer relação entre as velocidades médias u_1 e u_2 e as concentrações k_1 e k_2 .

Por simples observação da corrente de tráfego, em diversas horas do dia, com auxílio de equipamentos simples, verifica-se que o *fluxo é menor nos extremos da faixa de velocidades*; ocorrendo o mesmo com os extremos da faixa de concentrações.

Isto sugere a *existência de máximo* nas curvas de comportamento do fluxo em função da velocidade e fluxo em função da concentração. Esse fluxo máximo é a "*capacidade*" da rodovia.

Por outro lado, nota-se que a *concentração de carros na via condiciona suas velocidades*, sugerindo uma *relação entre a velocidade e a concentração*.

Assim sendo, a relação empírica fundamental $q = uk$ poderia assumir a forma $q = u(k) \times K$ ou $q = k(u) \times u$.

Experimentalmente, verificou-se que essas curvas

têm o aspecto abaixo, com um ponto de máximo

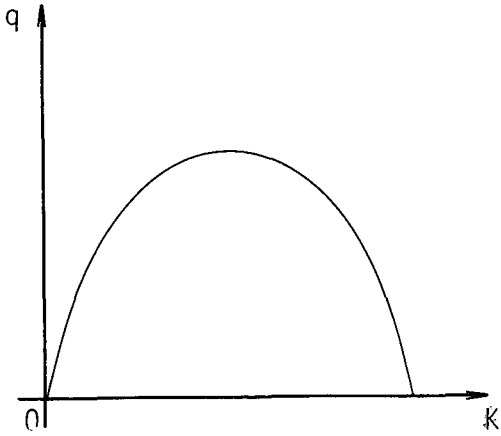


Figura II.2

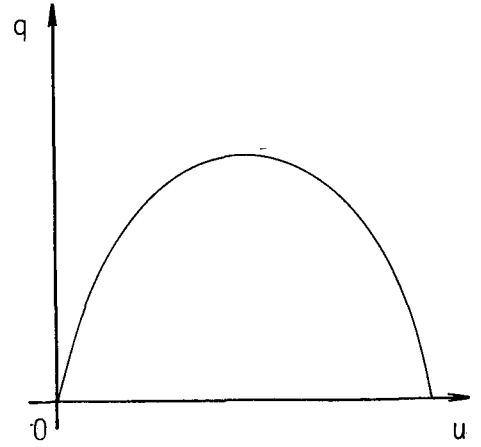


Figura II.3

Vamos agora introduzir uma das várias relações propostas por diversos pesquisadores entre u e k .

GREENSHIELDS¹⁰ obteve em seu estudo de capacidade de tráfego que

$$u = u_f(1 - n) \quad (\text{II.7})$$

onde:

u_f = velocidade média livre da corrente de tráfego em relação ao espaço;

$n = \frac{k}{k_j}$ = concentração normalizada, ou densidade de tráfego; \bar{e} é um valor adimensional que varia entre zero e um ($0 \leq n \leq 1$).

k_j = concentração máxima, com os carros encostados um no outro.

Substituindo esses valores na equação (II.6) obteremos uma velocidade de onda de

$$c = \frac{[k_1 u_f(1-n_1) - k_2 u_f(1-n_2)]}{k_1 - k_2}$$

Eliminando k_1 e k_2 obteremos:

$$\begin{aligned} c &= \frac{u_f [k_1(1-n_1) - k_2(1-n_2)]}{k_1 - k_2} = \frac{u_f [(k_1 - k_2) - (k_1 n_1 - k_2 n_2)]}{k_1 - k_2} = \\ &= \frac{u_f [(k_1 - k_2) - (\frac{k_1^2 - k_2^2}{k_j})]}{k_1 - k_2} = \frac{u_f (k_1 - k_2) [1 - \frac{k_1 + k_2}{k_j}]}{k_1 - k_2} = \\ &= u_f [1 - (\frac{k_1}{k_j} + \frac{k_2}{k_j})] = u_f [1 - (n_1 + n_2)] \end{aligned}$$

$$c = u_f [1 - (n_1 + n_2)] \quad (II.8)$$

Esta equação fornece a velocidade da linha S em termos das concentrações normalizadas, em ambos os lados da des

continuidade móvel.

II.1.1 - Caso de Concentrações Quase Iguais

Se as concentrações em ambos os lados da linha de fronteira S são quase iguais, a situação abaixo existe

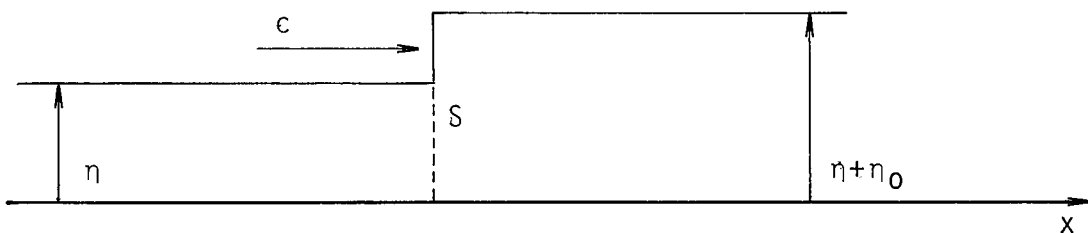


Figura II.4

A concentração normalizada à esquerda de S é η , enquanto a concentração normalizada à direita de S é $(\eta + \eta_0)$, onde $\eta + \eta_0 \leq 1$.

Neste caso temos

$$\eta_1 = \eta ; \eta_2 = (\eta + \eta_0)$$

Substituindo na equação (II.8)

$$c = u_f [1 - (\eta_1 + \eta_2)] = u_f [1 - (2\eta + \eta_0)]$$

Desprezando o valor de η_0 por ser muito pequeno frente a 2η , teremos a expressão da velocidade de propagação da onda de descontinuidade abaixo

$$c = u_f [1 - 2\eta] \quad (\text{II.9})$$

Esta é a equação para a propagação das ondas de densidade obtida por Lighthill e Whitham³ através de uma análise mais elaborada.

II.1.2 - Ondas de Parada

Considere uma linha de tráfego movendo-se com uma concentração normalizada η_1 e uma velocidade média dos veículos de

$$u_1 = u_f (1 - \eta_1)$$

Em uma posição $x = x_0$ na rodovia, um sinal (semáforo) obriga o tráfego a parar. A corrente de tráfego imediatamente assume a concentração normalizada de saturação com $\eta_2=1$, como mostrado na figura II.5.

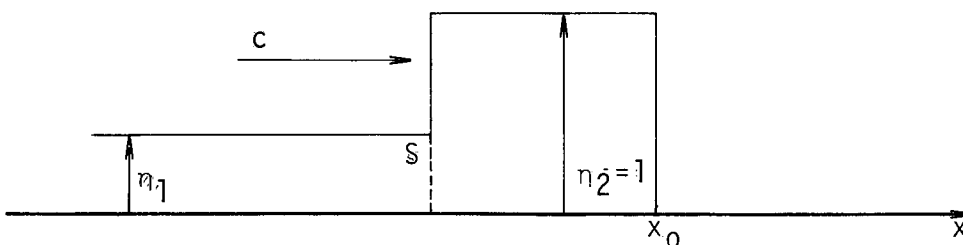


Figura II.5

À esquerda da linha S o tráfego está ainda em movimento com velocidade média dada por

$$u_1 = u_f (1 - \eta_1)$$

sob a concentração normalizada original η_1 .

Sob estas condições, a velocidade da onda de choque é dada pela equação (II.8) com

$$\eta_1 = \eta_1 \quad \text{e} \quad \eta_2 = 1$$

$$c = u_f [1 - (\eta_1 + \eta_2)] = u_f [1 - (\eta_1 + 1)]$$

$$c = - u_f \eta_1 \quad (\text{II.10})$$

Este resultado indica que a onda de choque provocada por uma parada do tráfego, caminha para trás com a velocidade de $u_f \eta_1$.

Se o sinal na posição $x = x_0$ aciona o vermelho no instante $t = 0$, então no instante $t = t$ estará formada uma fila de veículos parados, a partir de x_0 , cujo comprimento será

$$x - x_0 = u_f \eta_1 t$$

e terá atingido na via o ponto

$$x = x_0 + u_f \eta_1 t \quad (\text{II.11})$$

II.1.3 - Ondas de Partida

Para discutir a natureza da onda de choque produzida pela partida de uma linha de veículos, admita que em $t = 0$ uma linha de veículos esteja acumulada atrás de um sinal situado no ponto da rodovia $x = x_0$.

Pelo fato desta linha de veículos estar ainda parada, ela tem uma concentração normalizada de saturação $\eta_1 = 1$, conforme mostra a Figura II.6.

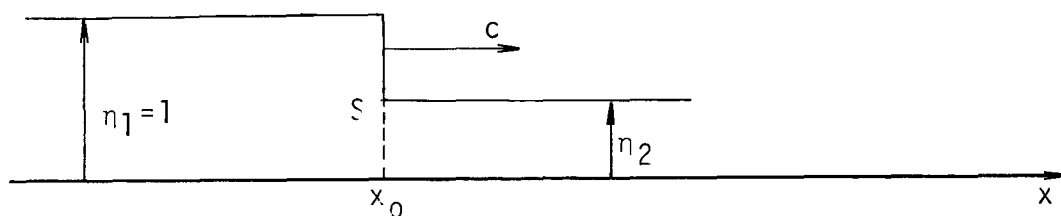


Figura II.6

Admita que em $t = 0$ o sinal na posição $x = x_0$ acione o verde e permita então os veículos se movimentarem para a frente com uma velocidade u_2 .

Da equação já vista

$$u_2 = u_f(1 - \eta_2)$$

deduzimos que existe uma densidade

$$\eta_2 = 1 - \frac{u_2}{u_f}$$

Em consequência, a onda de choque de partida se forma logo que a linha de veículos começa a se movimentar. A velocidade desta onda de choque \bar{c} é obtida substituindo-se $\eta_1 = 1$ e $\eta_2 = \eta_2$ na equação (II.8) logo

$$c = u_f [1 - (1 + \eta_2)] \quad c = - u_f \eta_2 \quad (\text{II.12})$$

mas, como $\eta_2 = 1 - \frac{u_2}{u_f}$ teremos

$$c = -u_f \left(1 - \frac{u_2}{u_f}\right) = -u_f + u_2 \quad \text{logo}$$

$$c = - (u_f - u_2) \quad (\text{II.13})$$

Em consequência, a onda de choque de partida caminha para trás, a partir de x_0 , com uma velocidade de $(u_f - u_2)$. Devido à velocidade da partida ser pequena, vemos que a onda de choque de partida caminha para trás com uma velocidade essencialmente igual a

$$c = -(u_f - u_2) \quad \text{com } u_2 \cong 0$$

$$\bar{c} = - u_f \quad (\text{II.14})$$

Esta teoria é aplicada somente a rodovias longas e repletas de veículos. As rodovias são consideradas repletas quando qualquer aumento na concentração levará a uma redução na velocidade média.

Note-se que a velocidade média não é afetada pela concentração abaixo de um certo valor limite.

II.1.4 - A Curva de Fluxo-Concentração

Quando se pressupõe, como LIGHTHILL e WHITHAM³, que o fluxo é função exclusivamente da concentração ($q = q(k)$), a curva representativa desta função torna-se extremamente importante no estudo do comportamento do tráfego em rodovias longas.

A inclinação da tangente à curva ($\frac{dq(k)}{dk}$), a inclinação da corda ($\frac{\Delta q(k)}{\Delta k}$) e a inclinação do raio vetor ($\frac{q(k)}{k}$) fornecem importantes velocidades; características do comportamento do tráfego.

$\frac{dq(k)}{dk}$ = velocidade de propagação de uma onda de densidade em condições de concentração uniforme.

$\frac{\Delta q(k)}{\Delta k}$ = velocidade de propagação de uma onda de choque, caracterizada por uma descontinuidade na concentração.

$\frac{q(k)}{k}$ = velocidade de um veículo na corrente de tráfego.

As inclinações obtidas graficamente sôbre a curva fluxo-concentração podem ser transportadas, numa escala adequada, diretamente para um diagrama espaço x tempo, fornecendo importantes informações.

Se considerarmos que a curva fluxo-concentração é característica de cada trecho uniforme da rodovia, e que a curva real é levantada no campo com auxílio de instrumentação, tendo representação analítica apenas aproximada, avaliaremos então a importância desta curva.

Além disso, podemos obter geometricamente resultados que exigiriam solução de equações diferenciais parciais não lineares bastante complicadas, envolvendo expressões analíticas apenas aproximadas.

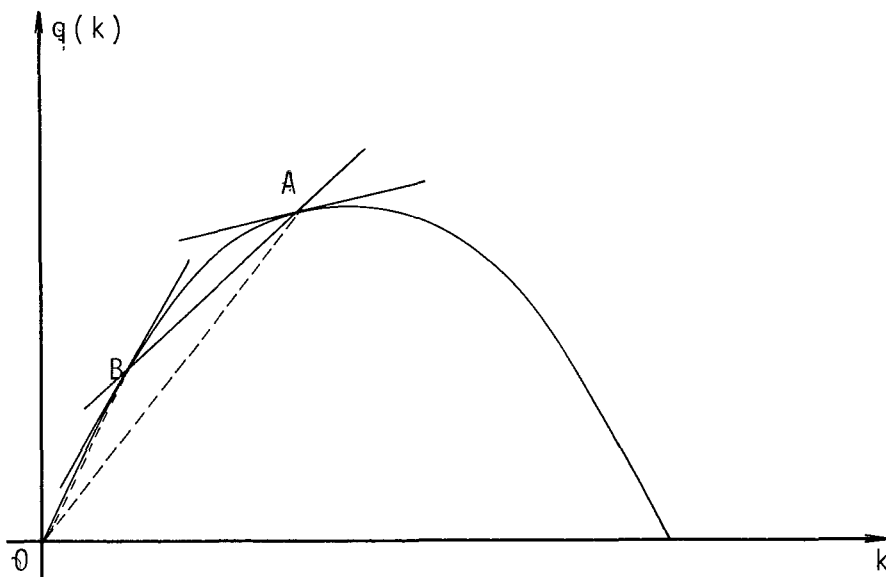


Figura II.7 - Curva fluxo x concentração

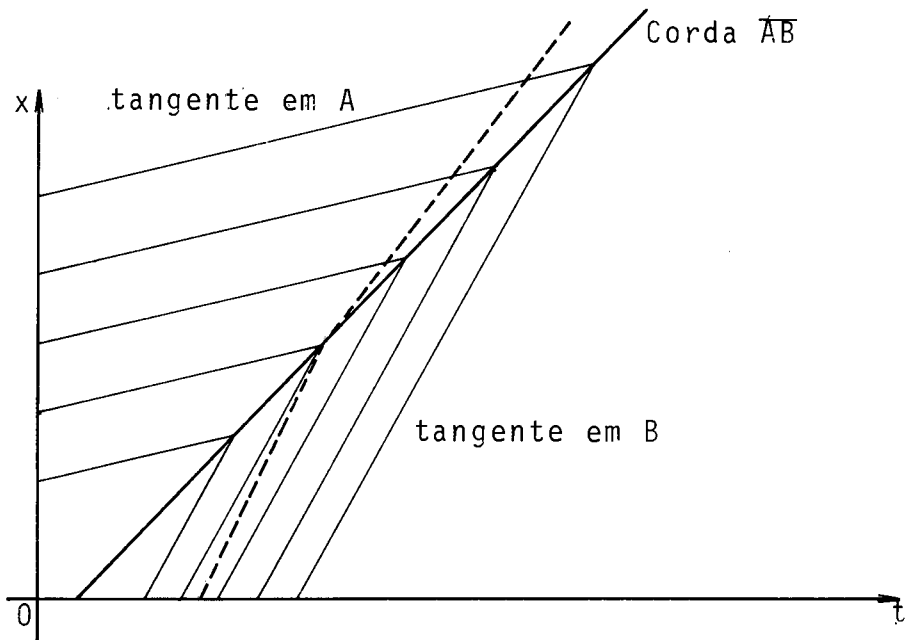


Figura II.8 - Formação da onda de choque

A linha pontilhada no diagrama da Figura II.8 representa a velocidade de um veículo que passa das condições de concentração na região B para as condições de concentração na região A. Note a mudança brusca de velocidade ao passar pela onda de choque.

Admitimos que o trecho \overline{OX} da rodovia seja homogêneo, representado pela curva da Figura II.7

II.2 - O MODELO DE PAUL I. RICHARDS⁴

PAUL I. RICHARDS⁴, independentemente de, L'IGHTHILL e WHITHAM³, estudou a propagação das ondas de densidade na corrente de tráfego, usando a analogia hidrodinâmica.

Partiu RICHARDS⁴ de dois pressupostos:

(a) Qualquer distribuição de carros pode ser substituída por uma função contínua da concentração $k(x, t)$; onde x é a posição do veículo na rodovia e t é o tempo.

(b) A velocidade de cada carro, individualmente, depende do espaçamento entre carros, de tal forma que, em qualquer instante e em qualquer ponto, os carros naquela vizinhança têm uma velocidade dada por

$$u = a(b - k)$$

onde a e b são constantes adequadas que dependem da rodovia.

Esta relação entre u e k foi escolhida por fornecer resultados simples.

Esta função pode ser simplificada para $u = u_f(1 - \frac{k}{k_j})$ ou ainda $u = u_f(1 - \eta)$, equação (II.7), após as seguintes considerações:

a) Quando $u = 0$, $b = k_j$

b) $\eta \triangleq \frac{k}{k_j}$

c) Quando $k = 0$, $ab = u_f$ logo $a = \frac{u_f}{b} = \frac{u_f}{k_j}$

A teoria de RICHARDS⁴ é válida apenas para um grande número de veículos.

Se consideramos o tráfego como um fluido compressível de densidade η e velocidade u , então podemos escrever a equação fundamental de conservação da matéria

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial (u\eta)}{\partial x} = 0 \quad (\text{II.15})$$

que é equivalente a equação (II.1)

Substituindo (II.7) em (II.15) e desenvolvendo:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + u_f(1 - 2\eta) \frac{\partial \eta}{\partial x} = 0 \quad (\text{II.16})$$

Considerando a equação (II.9)

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + c \frac{\partial \eta}{\partial x} = 0$$

A solução geral dessa equação é uma função arbitrária do argumento indicado e tem a forma:

$$\eta = f(x - ct) \quad \text{ou} \quad \eta = f[x - (1 - 2\eta)u_f t] \quad (\text{II.17})$$

De forma equivalente, desenvolvendo a partir de (II.1)

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = 0 \quad \text{ou} \quad \frac{\partial k}{\partial t} + \frac{dq}{dk} \cdot \frac{\partial k}{\partial x} = 0 \quad (\text{II.13})$$

Considerando (II.2), como implicitamente em (II.15)

$$q = uk = u_f \left(1 - \frac{k}{k_j}\right) k = u_f \left(k - \frac{k^2}{k_j}\right)$$

$$c = \frac{dq}{dk} = u_f \left(1 - 2 \cdot \frac{k}{k_j}\right)$$

$$\frac{\partial q}{\partial x} = \frac{dq}{dk} \cdot \frac{\partial k}{\partial x} = c \frac{\partial k}{\partial x} = u_f \left(1 - 2 \cdot \frac{k}{k_j}\right) \frac{\partial k}{\partial x}$$

Levando em (II.13)

$$\frac{\partial k}{\partial t} + u_f \left(1 - 2\eta\right) \frac{\partial k}{\partial x} = 0$$

que é equivalente à equação (II.16) e tem solução da forma:

$$k = f(x - ct) \quad \text{ou} \quad k = f\left[x - u_f \left(1 - 2 \frac{k}{k_j}\right) t\right] \quad (\text{II.19})$$

Ao usarmos a expressão na forma (II.17) devemos observar que, para ser aplicável ao nosso caso, a função f deve tomar valores somente entre 0 e 1, pois esta é a faixa de valores possíveis da densidade $\eta = \frac{k}{k_j}$.

A equação (II.17), por ser uma relação implícita para η , não pode ser resolvida em termos gerais para fornecer uma expressão explícita.

Observando a expressão, RICHARDS⁴ verificou que para $t = 0$ temos $f(x) = \eta(x, 0)$.

Note-se que as variáveis até aqui usadas são dependentes de x e t , isto é:

$$u = u(x, t) ; k = k(x, t) ; \eta = \eta(x, t)$$

Observou também que para valores fixos de $\eta = \eta_0$ em (II.17), o argumento da função arbitrária f é uma constante e η_0 se propaga com velocidade constante.

De outra forma, se observarmos o movimento de um ponto onde η tem um valor fixo η_0 , veremos que $x - (1 - 2\eta_0)u_f t$ deve ter um valor fixo, isto é, os pontos onde $\eta = \eta_0$ se deslocam com uma velocidade igual a $u_f(1 - 2\eta_0) = c \Big|_{\eta=\eta_0}$.

Geometricamente, RICHARDS⁴ observou que, o gráfico de $\eta(x, t)$ versus x , para qualquer instante t , pode ser obtido do gráfico de $\eta(x, 0) = f(x)$ pelo desdobramento do plano $\eta - x$, uniformemente, de tal modo que a linha $\eta = 0$ mova-se uma distância $c t$ para a direita e a linha $\eta = 1$ uma distância igual para a esquerda ($-c t$). A linha $\eta = 1/2$ permanece fixa. Esta é a re-

gra do desdobramento".

Denominando x_0 o valor fixo do argumento da função arbitrária, quando $\eta = \eta_0$, escrevemos:

$$x - (1 - 2\eta_0)u_f t = x_0 \quad \text{ou} \quad x - ct = x_0$$

ou ainda

$$x = x_0 + ct \quad (\text{II.20})$$

A equação (II.20) fornece a localização do ponto onde $\eta = \eta_0$ no instante t , sabendo que sua localização era x_0 quando $t = 0$.

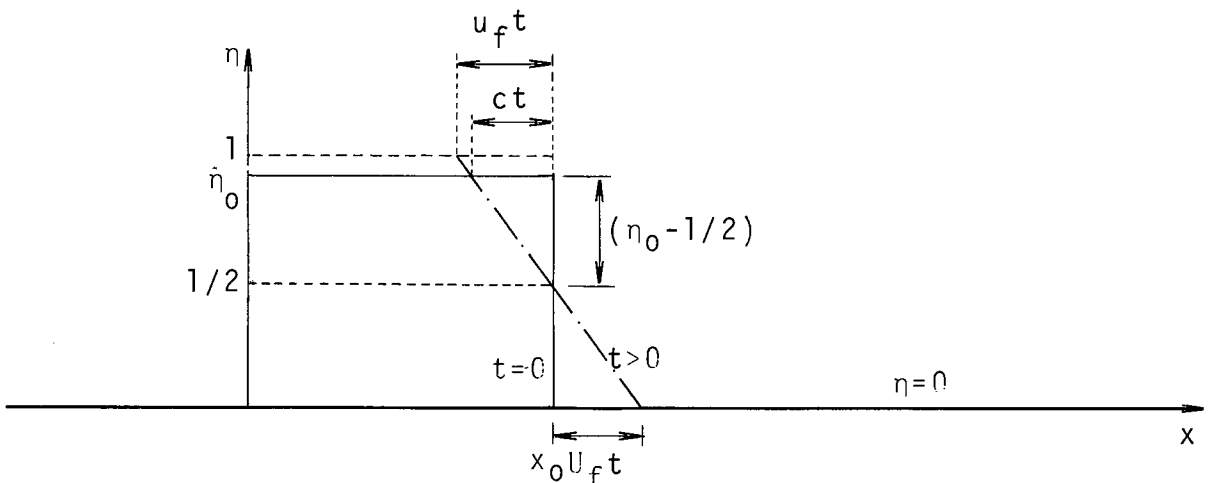


Figura II.9 - Regra do desdobramento

A Figura II.9 representa a situação de um pelotão de carros de densidade η_0 movendo-se com uma velocidade $u = u_f(1 - \eta_0)$, tendo à frente a rodovia completamente vazia ($\eta = 0$).

No instante $t = 0$ um carro da frente do pelotão $x = x_0 = 0$ se desgarra e acelera para a velocidade média livre u_f , seguido pelos demais.

A velocidade da onda de densidade será, como sabemos, $c = u_f(1-2\eta_0)$, na região de densidade η_0 .

Na região em que $\eta = 0$ (à frente do pelotão) a velocidade de propagação da onda será $c = u_f$.

Em virtude da geometria, a linha de mudança de densidade sempre passa pelo ponto $x = x_0$ e $\eta_0 = 1/2$.

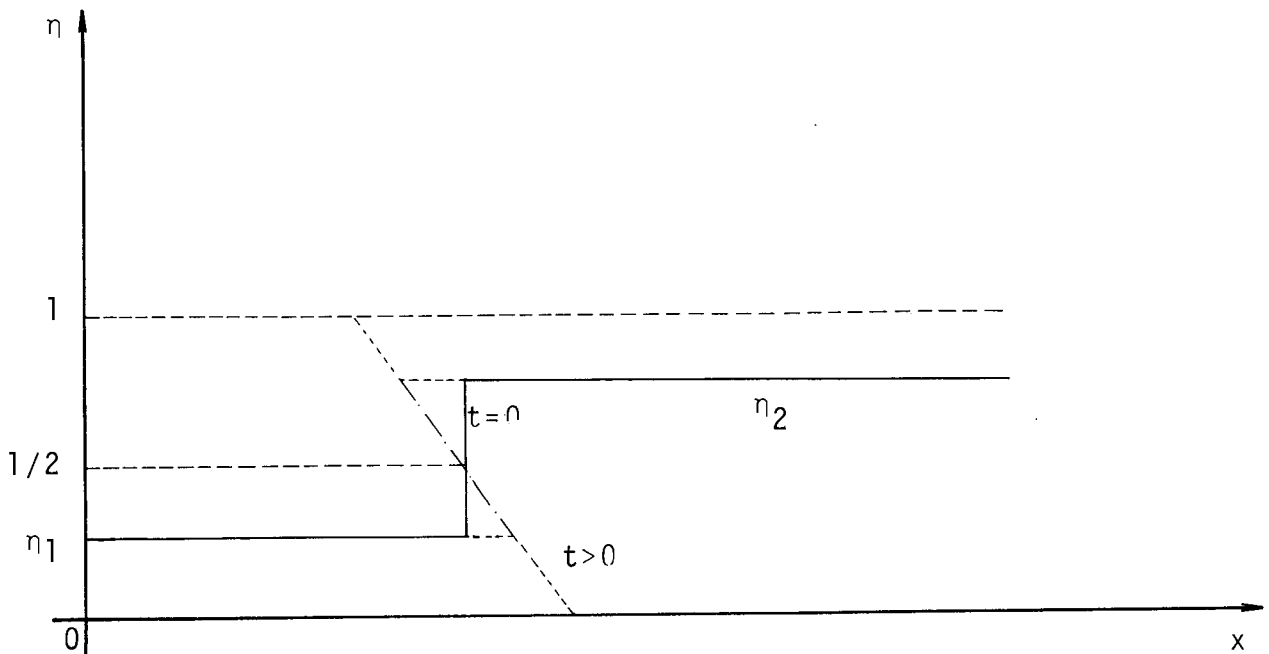


Figura II.10 - Aparente falha da regra do desdobramento na formação de uma onda de choque.

Observando a Figura II.10, vemos que a aplicação da "regra do desdobramento" proposto por RICHARDS⁴, em certas condições de densidade, pode levar a dois valores de densidade para o mesmo ponto da rodovia; o que é impossível.

Na Figura II.10 está representada uma linha de veículos mais rápidos no exato momento em que alcança o final de uma linha de veículos mais lentos.

Na realidade o que ocorre neste tipo de configuração é a formação de uma "onda de choque"; mais uma vez considerada a analogia hidrodinâmica. Isto se deve a uma descontinuidade da densidade na corrente de tráfego.

Se c é a velocidade da onda de choque, então $n_1(u_1 - c) = n_2(u_2 - c)$ e considerando (II.7) teremos

$$c = u_f [1 - (\eta_1 + \eta_2)] \text{ que é a equação (II.8)}$$

Geometricamente pode-se mostrar que a equação (II.8) é equivalente à seguinte extensão da "regra do desdobramento":

Se o processo do desdobramento do gráfico conduz a múltiplos valores de η para algum x , o gráfico correto é obtido ligando-se o ramo superior da curva ao ramo inferior por uma linha reta vertical (onda de choque), localizada de tal forma que as áreas dos laços que sobram de cada lado da reta se

jam iguais. Ver Figura II.11

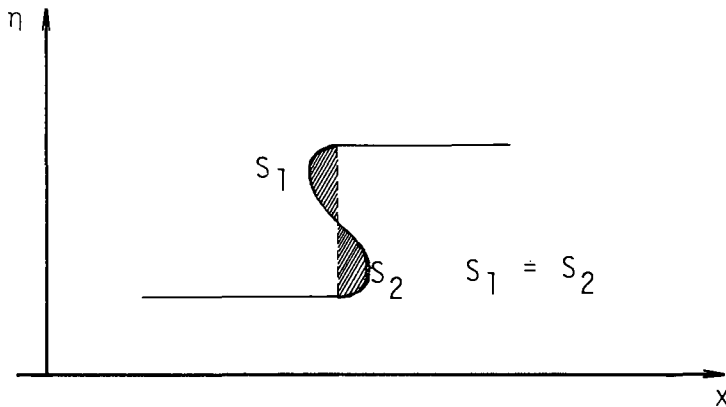


Figura II.11 - Extensão da regra do desdobramento para o caso de onda de choque.

Todas as vezes que trafegamos em uma rodovia longa e repentinamente somos forçados a freiar violentamente, fomos certamente atingidos por uma forte onda de choque.

Examinando os gráficos $\eta(x)$ e seu desenvolvimento no tempo pela regra do desdobramento, verificamos que as ondas de choque sempre se desenvolvem quando a inclinação do gráfico é positiva ($\partial\eta/\partial x > 0$).

Através de considerações geométricas usando a regra do desdobramento, podemos prever o lugar e o instante em que primeiro aparecerão as ondas de choque. Para tanto traçamos tangentes nos pontos de inclinação máxima positiva da curva de densidades e verificamos o ponto em que essas tangentes interceptam a linha de $\eta = 1/2$.

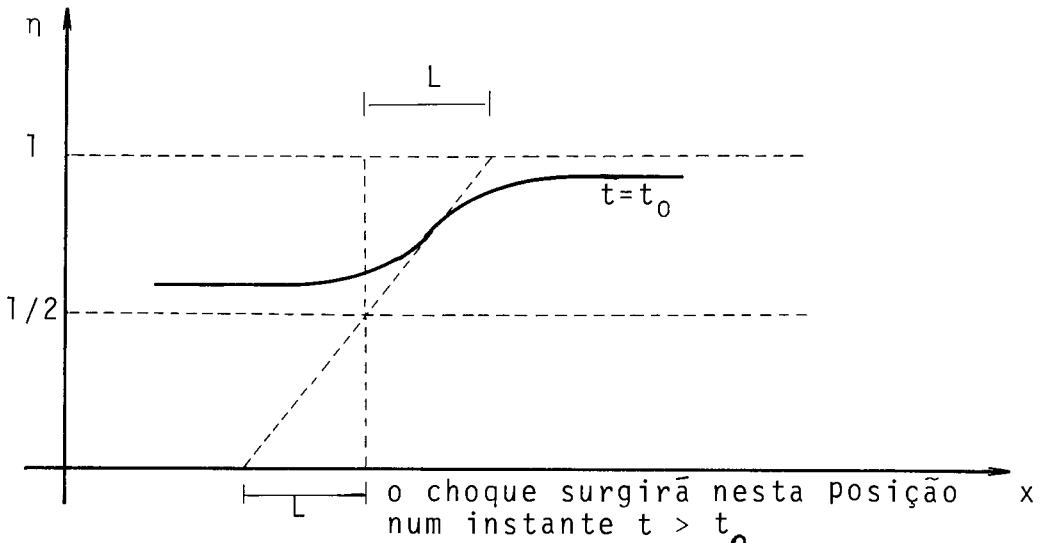


Figura II.12 - Previsão da posição e instante do aparecimento de uma onda de choque

Da Figura II.12 vemos que L é medido sobre a linha de $\eta = 0$ ou $\eta = 1$ onde $|c| = u_f$, logo a distância L será

$$L = u_f(t - t_0)$$

e o instante t do choque será

$$t = t_0 + \frac{L}{u_f} \quad (\text{II.21})$$

onde t_0 é o instante no qual a curva de densidade tinha a forma mostrada no gráfico; no instante $t = t_0$ antes do choque.

Observando a equação (II.7), $u = u_f(1-\eta)$, verificamos que $\frac{u}{u_f} = (1-\eta)$. Logo o gráfico nos dá diretamente o valor

de $\frac{u}{u_f}$ em função de x , para o instante t_0 que o gráfico representa, ao medirmos a distância entre a curva de densidades e a linha de $\eta = 1$ para cada x .

Ainda no gráfico podemos obter a aceleração de um carro em um dado lugar e tempo.

$$\frac{du(x,t)}{dt} = \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u}{\partial x} \frac{dx}{dt} = \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x}$$

considerando as equações (II.7) e (II.15)

$$\frac{du(x,t)}{dt} = -u_f^2 n \frac{\partial n}{\partial x} \quad (\text{II.22})$$

A equação (II.22) pode ser interpretada como se o motorista mudasse sua velocidade em qualquer instante de acordo com as condições que ele observa a frente (ou atrás?), como expressa o gradiente da densidade de tráfego $\partial n / \partial x$.

O fluxo de tráfego em um determinado ponto pode ser obtido de (II.2) e (II.7) por

$$q = u_f(1-n)n k_j \quad (\text{II.23})$$

Será visto agora, como se comporta a corrente de tráfego quando ocorre uma súbita interrupção em um fluxo originalmente uniforme, Figura II.13.

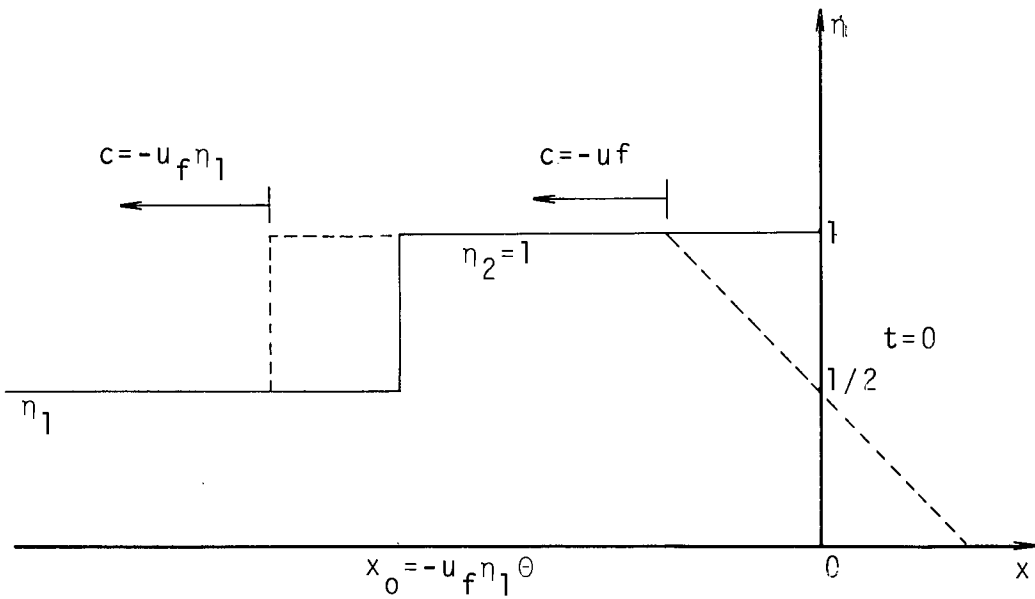


Figura II.13 - Distribuição de densidade pouco depois que um semáforo abre.

Consideremos uma densidade inicialmente uniforme $\eta = \eta_1$ para todo x .

Consideremos também que em $x = 0$, por um motivo qualquer (acidente, semáforo etc.), haja uma súbita interrupção do tráfego num determinado instante e que permaneça durante um intervalo de tempo θ . Durante esse intervalo a velocidade dos carros no ponto $x = 0$ permanece $u = 0$ e a densidade permanece $\eta = 1$.

Nessas condições desenvolve-se uma onda de choque que se propaga para trás com uma velocidade dada pela equação (II.10), $c = -u_f \eta_1$.

Ao final do intervalo θ a situação será a que está representada em traço cheio na Figura (II.13) Este instante é agora escolhido como $t = 0$, isto é, a interrupção ocorreu no instante $t = -\theta$.

Consideremos agora que em $t = 0$ a via seja repentinamente desobstruída e apliquemos a "regra do desdobramento".

Nos momentos iniciais, após $t = 0$, o tráfego se comporta de acordo com as linhas tracejadas na Figura II.13, com carros saindo na frente da região congestionada e carros chegando em sua parte de trás, onde continua a se propagar a onda de choque.

Veremos que a onda que parte de $x = 0$, caminhando para trás, em $t = 0$, caminha mais rápido que a onda de choque, alcançando-a ao fim de um tempo que depende da densidade η_1 e do tempo de retenção θ .

A onda de choque se propaga com velocidade $-\eta_1 u_f$, enquanto a onda de partida se desloca com velocidade $-u_f$.

Como em $t = 0$ a onda de partida está em $x = 0$ e a onda de choque está em $x = x(0) = -u_f \eta_1 \theta$, a onda de partida alcançará a de choque no instante t_0

$$t_0 = \frac{-u_f \eta_1 \theta}{-u_f - (-\eta_1 u_f)} \quad \text{ou} \quad t_0 = \left(\frac{\eta_1}{1 - \eta_1} \right) \theta \quad (\text{II.24})$$

Note que quando $\eta_1 = 1/2$ teremos $t_0 = \theta$, veja Figura II.15

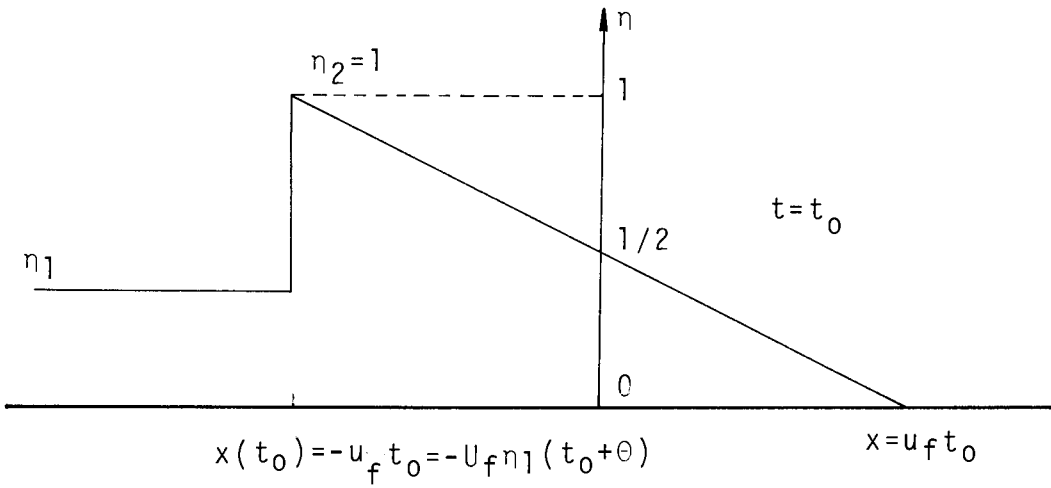


Figura II.14 - Situação em $t=t_0$, quando a onda de partida encontra o final da fila.

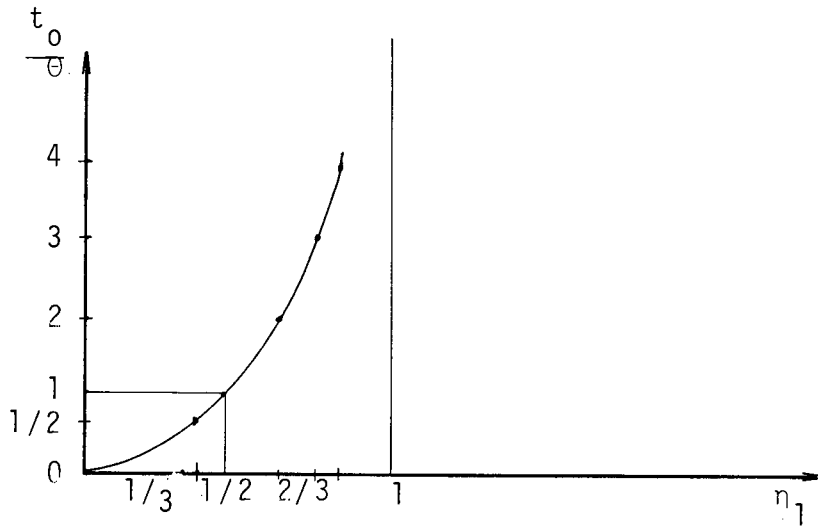


Figura II.15

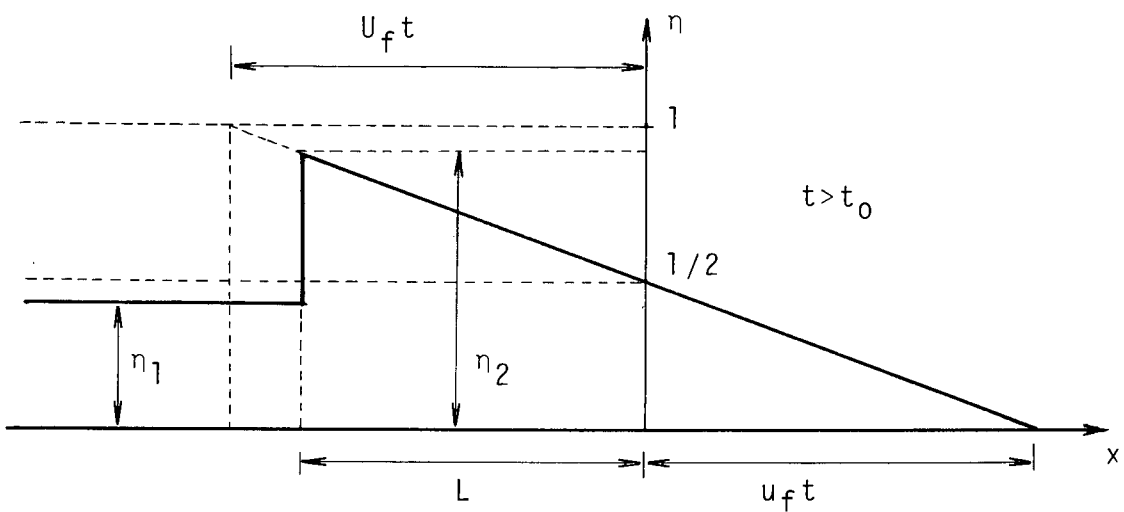


Figura II.16 - Extinção progressiva da onda de choque

Note na Figura II.16 que para todo $t > t_0$ teremos $\eta_2 < 1$. Da Figura II.16 tiramos, considerando $L > 0$

$$c = - \frac{dL}{dt} = u_f (1 - \eta_1 - \eta_2)$$

Pela semelhança de triângulo

$$\frac{\eta_2 - \frac{1}{2}}{L} = \frac{1}{2u_f t} \quad \text{ou} \quad \eta_2 = \frac{1}{2} \left(\frac{L}{u_f t} + 1 \right) \quad (\text{II.25})$$

Eliminando η_2 entre essas equações

$$\frac{dL}{dt} = \frac{L}{2t} + u_f \left(\eta_1 - \frac{1}{2} \right)$$

Esta equação diferencial tem como solução

$$L = C \sqrt{u_f t} + 2u_f \left(\eta_1 - \frac{1}{2} \right) t$$

Para calcular a constante de integração C consideramos que em $t = t_0$ temos $L = u_f t_0$, com t_0 obtido na equação (II.24)

$$u_f t_0 = C \sqrt{u_f t_0} + 2u_f \left(\eta_1 - \frac{1}{2} \right) t_0 \quad \text{ou}$$

$$C = 2 \sqrt{u_f t_0} (1 - \eta_1) \quad \text{ou}$$

$$C = 2 \sqrt{u_f \theta \eta_1 (1 - \eta_1)}$$

O resultado é

$$L = 2u_f \left[\left(\eta_1 - \frac{1}{2} \right) t + \sqrt{\eta_1 (1 - \eta_1) \theta t} \right] \quad (\text{II.26})$$

ou

$$L = 2u_f t \left[\eta_1 + \sqrt{\eta_1 (1 - \eta_1) \frac{\theta}{t}} - \frac{1}{2} \right]$$

Levando a equação (II.26) na equação (II.25)

$$\eta_2 = \eta(-L, t) = \eta_1 + \sqrt{\eta_1 (1 - \eta_1) \frac{\theta}{t}} \quad (\text{II.27})$$

Observando a equação (II.26) vemos que se $\eta_1 \geq 1/2$, isto é, se $k_1 \geq 1/2 k_j$, o que conduz pela equação (II.7) a $u_1 \leq 1/2 u_f$, a onda de choque não retornará a seu ponto de partida ($x = 0$), propagando-se para trás indefinidamente.

Vamos chamar de α a razão entre as velocidades u_2 e u_1 na fronteira definida pela frente de choque, entre η_2 e η_1 , num determinado instante t_α

$$\frac{u_2}{u_1} = \alpha \quad \text{ou} \quad \frac{1 - \eta_2}{1 - \eta_1} = \alpha$$

Substituindo η_2 na equação (II.27) teremos

$$t_\alpha = \frac{1}{(1 - \alpha)^2} \cdot \frac{\eta_1}{(1 - \eta_1)} \cdot \theta \quad (\text{II.28})$$

ou

$$t_{\alpha} = \frac{t_0}{(1-\alpha)^2}$$

t_{α} representa o instante em que a frente da onda de choque apresenta uma relação α entre as velocidades.

A equação (II.28) nos permite calcular o instante a partir do qual podemos considerar desprezíveis os efeitos da onda de choque, visto a relação entre as velocidades u_2 e u_1 ter se reduzido a um valor de α pré-fixado.

No caso que estamos analisando $\eta_1 \geq 1/2$, t_{α} fica

$$t_{\alpha} \geq \frac{\theta}{(1-\alpha)^2}$$

Note-se que a densidade em $x = 0$ é igual a $1/2$, qualquer que seja $t > 0$. Assim, um observador parado neste ponto veria o tráfego se tornar estável quase imediatamente após o retardo.

Vejamos agora a situação quando $\eta_1 < 1/2$. Nestas condições teríamos $\eta_1 - \frac{1}{2} < 0$.

Sendo assim, observando a equação (II.26), vemos que poderemos ter $L = 0$ para algum $t > 0$.

Isso significa que poderemos ter uma reversão no sentido do movimento da onda de choque, com seu retorno à ori-

gem quando $L = 0$.

Chamando o instante do retorno de $t = t_r$

$$t_r = \frac{\eta_1(1-\eta_1)}{(1/2-\eta_1)^2} \theta \quad (\text{II.29})$$

No instante t_r , em $x = 0$, o observador parado neste ponto vê a densidade que era $1/2$ repentinamente ser reduzida para o valor η_1 original.

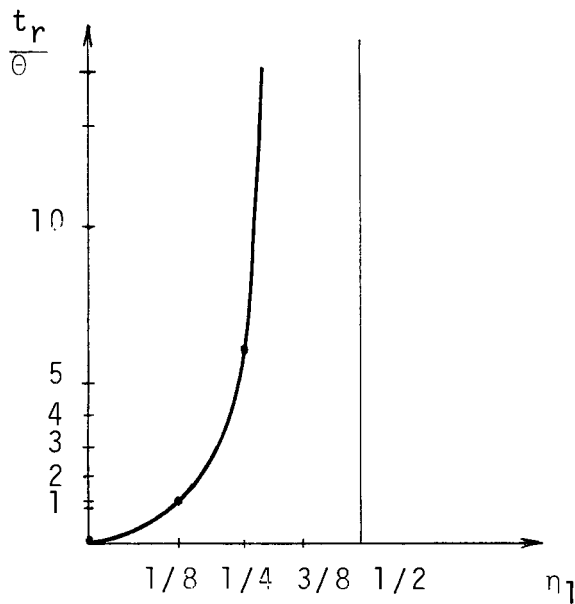


Figura II.17

Note na Figura II.17 que, para valores de η_1 na faixa $1/4 < \eta_1 < 1/2$, pequenas diferenças nos valores de η_1 produzirão grandes diferenças no tempo de retorno t_r , para uma mesma retenção θ .

Vamos agora aplicar as equações vistas, para examinar o comportamento do tráfego em um semáforo, com fases θ pa

ra o vermelho, $(T - \theta)$ para o verde e ciclo T (Figura II.18)

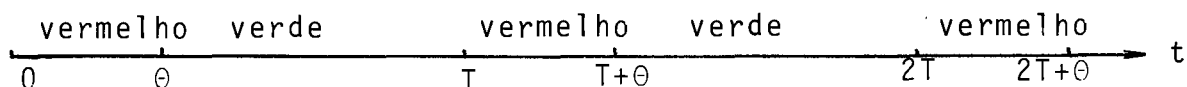


Figura II.18 - Ciclos e fases de um semáforo

A origem do tempo, na Figura II.18, está deslocada para corresponder ao início de uma fase vermelha; logo, nas fórmulas vistas, devemos substituir t por $t - \theta$.

Consideremos uma primeira situação em que η_1 é bastante pequeno para que a onda de choque passe pelo sinal ($x = 0$), enquanto ele ainda está verde.

Assim a segunda fase vermelha, como a primeira, produzirá a situação mostrada na Figura II.13 e o ciclo se repetirá indefinidamente.

Vejamos agora uma segunda situação, crítica, na qual temos o maior valor de η_1 para o qual a situação acima ainda se verifica, com a cauda da onda de choque passando em $x = 0$ no instante $t = T$, quando a fase vermelha seguinte entra.

O valor $\eta_1 = \eta_{1CR}$, neste instante, é calculado da equação (II.26) fazendo $L = 0$ e $t = T - \theta$

$$\eta_{1CR} = \frac{1}{2} \left(1 - \sqrt{\frac{\theta}{T}} \right) \quad (\text{II.30})$$

Logo, a onda de choque passará pelo semáforo, ainda na fase verde, se $\eta_1 \leq \eta_{1CR}$, para θ e T fixados.

Note que η_{1CR} se aproxima de seu valor máximo $1/2$, quando θ/T se aproxima de zero, ou seja, quando a fase verde é escolhida muito maior que a fase vermelha.

A terceira e última situação é aquela em que $\eta_1 > \eta_{1CR}$. Neste caso cada onda de choque deixará um resíduo para a fase seguinte.

Pode ser mostrado que estes resíduos sucessivos se acumularão indefinidamente, enquanto permanecer esta condição sobre η_1 .

Para mostrar isto, pela regra do desdobramento, verificamos que, durante a fase verde, em $x = 0$, temos $\eta_1 \leq 1/2$ e o fluxo de tráfego neste ponto não poderá ser maior que a capacidade, $q_{m\bar{x}} = \frac{k_j u_j}{4}$.

Isto pode ser deduzido da equação (II.23), pela condição de máximo fluxo

$$q = k_j u_f n(1-n)$$

$$\frac{dq}{dn} = k_j u_f (1-2n); \quad \frac{d^2q}{dn^2} = -2k_j u_f < 0$$

O volume máximo, portanto, corresponde a $n = 1/2$, que é o valor ótimo da densidade.

Para $n_1 \leq 1/2$ teremos

$$q \leq q_{\text{m}\bar{a}x} = \frac{k_j u_f}{4} \quad (\text{II.31})$$

O número de carros que podem passar pelo semáforo durante cada ciclo (= fase verde + fase vermelha) não pode consequentemente ser maior que $1/4 k_j u_f (T - \theta)$, isto é, com fluxo máximo durante a fase verde ($T - \theta$).

O fluxo médio máximo por ciclo que poderá passar pelo semáforo é então

$$q_{o\text{m}\bar{a}x} = \frac{k_j u_f}{4} \cdot \frac{T - \theta}{T} \quad (\text{II.32})$$

$$\text{ou} \quad q_{o\text{m}\bar{a}x} = q_{\text{m}\bar{a}x} \left(1 - \frac{\theta}{T}\right) \quad (\text{II.33})$$

Como era esperado, quando a fase verde é escolhida muito maior que a vermelha, o valor de $q_{o\text{m}\bar{a}x}$ se aproxima de $q_{\text{m}\bar{a}x}$.

Logo, de modo geral, teremos

$$q_0 \leq q_{\text{m}\bar{a}x} \left(1 - \frac{\theta}{T}\right)$$

Do que foi dito, podemos concluir que, quando $\eta_1 > \eta_{1CR}$, o fluxo médio por ciclo fica limitado no valor $q_{0\text{m}\bar{a}x}$.

Embora o fluxo instantâneo possa variar de lugar para lugar, o valor médio sôbre um longo tempo deve ser o mesmo para todos os pontos da rodovia.

Como, para valores elevados de η_1 , o fluxo atrás do semáforo está limitado pela equação (II.32), então a densidade média η_{10} , neste local, deve se deslocar suficientemente, para limitar o fluxo médio a este valor.

Levando a equação (II.32) na equação (II.23) teremos, se $q = q_{0\text{m}\bar{a}x}$

$$k_j u_f (1 - \eta_{10}) \eta_{10} = \frac{k_j u_f}{4} \cdot \frac{T - \theta}{T} \quad \text{ou} \quad \eta_{10}^2 - \eta_{10} + \frac{T - \theta}{4T} = 0$$

resolvendo

$$\eta_{10} = \frac{1}{2} \left(1 + \sqrt{\frac{\theta}{T}}\right) \quad (\text{II.34})$$

Assim, se $\eta_1 > \frac{1}{2} \left(1 - \sqrt{\frac{\theta}{T}}\right)$, a densidade mudará do valor η_1 para o valor médio η_{10} .

Resumindo, se tivermos $\eta_1 \leq \eta_{1CR}$ o semáforo terá apenas uma influência momentânea sobre o fluxo de tráfego, mas se tivermos $\eta_1 > \eta_{1CR}$ isto causará um súbito retrocesso da densidade para o valor médio $\eta_{10} = \frac{1}{2} \left(1 + \sqrt{\frac{\theta}{T}}\right)$.

II.3 - O MODELO DE RICHARD HABERMAN⁵

RICHARD HABERMAN⁵, mais recentemente, usando ainda a analogia hidrodinâmica, estudou o fluxo de tráfego desenvolvendo o "*método das características*".

Também partiu do pressuposto que a velocidade é uma função da concentração.

Em um tratamento preliminar da equação diferencial parcial da "*conservação dos carros*" feito por HABERMAN⁵ temos as considerações que se seguem.

Se admitirmos que, sob todas as circunstâncias, a velocidade dos carros é uma função conhecida de k , determinada por $u = u(k)$, então a equação de conservação dos carros, equação (II.1)

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = 0$$

poderã ser escrita na forma

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} [k u(k)] = 0 \quad (\text{II.35})$$

Se uma concentração inicial, não constante, existe, diferentes carros mover-se-ão a diferentes velocidades. Vamos supor que a concentração variarã imediatamente e os motoristas ajustarã suas velocidades imediatamente. O processo assim continuaria.

O problema do trãfego tem sido formulado em termos da equaçã (II.35), ou, de forma equivalente,

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} q(k) = 0 \quad (\text{II.36})$$

visto ser $q = uk$

Deste modo q pode ser considerado uma funçã somente de k .

Pela regra da cadeia podemos escrever

$$\frac{\partial}{\partial x} q(k) = \frac{dq}{dk} \cdot \frac{\partial k}{\partial x}$$

e então a equaçã toma a forma

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{dq}{dk} \cdot \frac{\partial k}{\partial x} = 0 \quad (\text{II.37})$$

Para resolvermos a equação (II.37) de modo único, precisamos de uma condição inicial.

Uma possível condição inicial seria conhecer uma $f(x)$ tal que

$$k(x, 0) = f(x)$$

Inicialmente, ao invés de resolvermos esta equação diferencial parcial não linear, vamos fazer algumas considerações preliminares.

Se a concentração inicial for constante, isto é,

$$k(x, 0) = k_0;$$

independente de x , então a concentração deverá permanecer constante, visto que todos os carros deverão se mover à mesma velocidade.

Isto é constatado verificando-se que uma concentração constante $k(x, t) = k_0$ satisfaz a equação (II.37)

Qualquer concentração constante é uma solução de equilíbrio da equação (II.37), pois não depende do tempo.

II.3.1 - Tráfego Quase Uniforme

Vamos estudar uma situação na qual a concentração \bar{k} é aproximadamente constante, onde, por experiência própria, sabemos que, às vezes, sem razão aparente, os carros sucessivamente reduzem suas velocidades.

Se a concentração \bar{k} é aproximadamente uniforme, deve haver uma solução aproximada para a equação diferencial tal que

$$k(x,t) = k_0 + \epsilon k_1(x,t) \quad (\text{II.38})$$

onde $|\epsilon k_1| \ll k_0$.

A parcela $\epsilon k_1(x,t)$ é denominada concentração perturbada; representa o desvio da concentração constante k_0 .

Consideremos que a concentração inicial $k(x,0)$ seja uma função conhecida de x , quase igual a constante k_0 ,

$$k(x,0) = k_0 + \epsilon f(x)$$

Comparando com a expressão (II.38) vemos que $\epsilon k_1(x,0)$, a concentração perturbada, é também inicialmente conhecida, pois

$$k_1(x,0) = f(x).$$

Levando (II.38) na equação (II.37)

$$\cancel{\frac{\partial k_1}{\partial t}} + \frac{dq}{dk}(k_0 + \epsilon k_1(x, t)) \cdot \cancel{\frac{\partial k_1}{\partial x}} = 0$$

Faremos agora uma aproximação, calculando $\frac{dq}{dk}$ através de uma expansão em série de Taylor; desprezando os termos menores.

$$\frac{dq}{dk}(k_0 + \epsilon k_1(x, t)) = \frac{dq}{dk}(k_0) + \epsilon k_1 \frac{d^2q}{dk^2}(k_0) + \dots + \frac{(\epsilon k_1)^{n-1}}{(n-1)!} \cdot \frac{d^{(n)}q}{dk^{(n)}}(k_0) + \dots$$

finalmente obtemos a equação

$$\frac{\partial k_1}{\partial t} + \frac{dq}{dk}(k_0) \cdot \frac{\partial k_1}{\partial x} = 0 \quad (\text{II.39})$$

Esta equação diferencial governa a concentração perturbada $\epsilon k_1(x, t)$.

Note que o coeficiente $\frac{dq}{dk}(k_0)$ da equação (II.39) é uma constante que denominaremos

$$c = \frac{dq}{dk}(k_0) \quad (\text{II.40})$$

A equação (3.5) pode então ser escrita na forma

$$\frac{\partial k_1}{\partial t} + c \frac{\partial k_1}{\partial x} = 0 \quad (\text{II.41})$$

Note que a equação (II.39), apenas aproximada, é uma equação diferencial parcial linear, enquanto que a equação (II.37), exata, é uma equação diferencial parcial não linear.

Vamos resolver a equação (II.41), considerando conhecida a condição inicial $k_1(x, 0) = f(x)$.

Para maior clareza do desenvolvimento e de seu significado físico, vamos fazer uma mudança de sistema de coordenadas, onde x' move-se com a velocidade c .

$$\text{Seja } x' = x - c t \text{ e}$$

$$t' = t$$

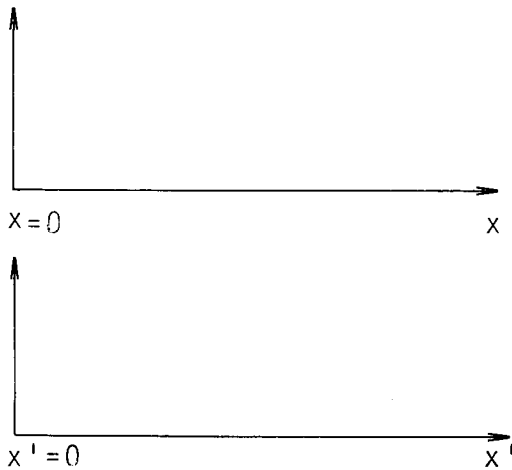


Figura II.19 - Situação em $t=0$; os sistemas têm a mesma origem

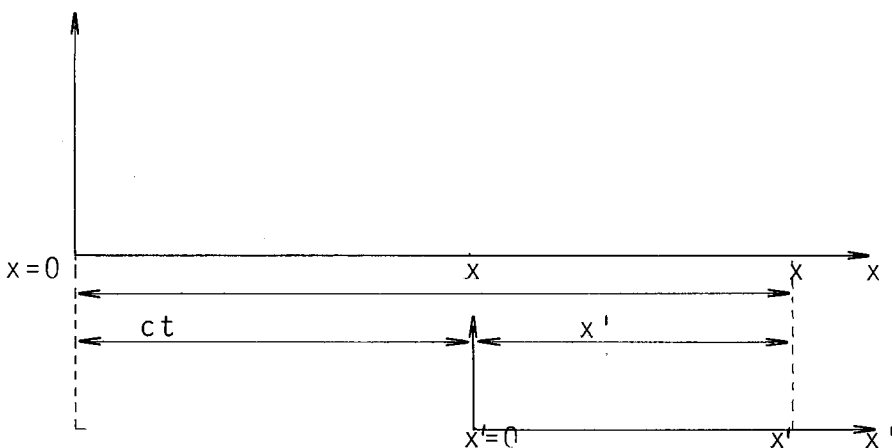


Figura II.20 - Situação em $t>0$; o sistema móvel, em t , deslocou-se de uma distância ct .

Vemos portanto que, quando $x' = 0$, teremos $x = c t$.

Vamos resolver a equação que descreve o fluxo de tráfego linearizado no sistema móvel de coordenadas. A solução dependerá agora de x' e t' .

Pela regra da cadeia

$$\frac{\partial}{\partial x} = \frac{\partial x'}{\partial x} \frac{\partial}{\partial x'} + \frac{\partial t'}{\partial x} \frac{\partial}{\partial t'}$$

$$\frac{\partial}{\partial t} = \frac{\partial x'}{\partial t} \frac{\partial}{\partial x'} + \frac{\partial t'}{\partial t} \frac{\partial}{\partial t'}$$

Estas expressões podem ser reduzidas a

$$\frac{\partial}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x'}$$

$$\frac{\partial}{\partial t} = -c \frac{\partial}{\partial x'} + \frac{\partial}{\partial t'}$$

Note que embora $t' = t$ temos $\frac{\partial}{\partial t'} \neq \frac{\partial}{\partial t}$. Isto se deve ao fato que, em $\frac{\partial}{\partial t'}$ fazemos x' constante e em $\frac{\partial}{\partial t}$ fazemos x constante. As variações no tempo podem ser diferentes nos dois sistemas.

Vejam agora a forma da equação diferencial, es-

crita no sistema que se move com velocidade c .

$$-c \frac{\partial k_1}{\partial x'} + \frac{\partial k_1}{\partial t'} + c \frac{\partial k_1}{\partial x'} = 0$$

que simplificando fica

$$\frac{\partial k_1}{\partial t'} = 0 \quad (\text{II.42})$$

Logo, se x' é fixado, teremos $k_1 = \text{constante}$, ou seja, k_1 é constante no tempo em um sistema de coordenadas que se move com velocidade constante c .

Observe que, para diferentes valores de x' , teremos diferentes valores de k_1 ; logo, k_1 é uma função de x' .

$$k_1 = g(x')$$

onde $g(x')$ é uma função arbitrária de x' .

Voltando às variáveis originais, x e t , teremos

$$k_1 = g(x - ct) \quad (\text{II.43})$$

A função arbitrária $g(x')$ pode agora ser determinada para obtermos a condição inicial.

A solução geral é

$$k_1(x, t) = g(x - c t) ,$$

mas vimos que $k_1(x, 0) = f(x)$; logo, $g(x) = f(x)$, com $t = 0$.

A solução da equação diferencial, satisfazendo esta condição inicial é

$$k_1(x, t) = f(x - c t) \tag{II.44}$$

ou, de forma equivalente,

$$k(x, t) = k_0 + \epsilon f(x - c t)$$

Podemos então concluir que, para um observador que se move com velocidade c , a concentração permanece a mesma. Diz-se então que a concentração se propaga como uma onda, com velocidade c .

Essa onda é denominada "*onda de densidade*".

Ao longo das linhas $x - c t = x' = \text{constante}$, a concentração permanece a mesma. Essas linhas são denominadas "*características*" da equação diferencial parcial (II.41).

As "*características*" são linhas, ao longo das quais a equação diferencial parcial se reduz a uma equação dife

rencial ordinária.

Neste nosso caso, as características são retas com coeficiente angular $\frac{dx}{dt} = c$; a velocidade de propagação da onda.

Essas retas são mostradas na Figura II.21

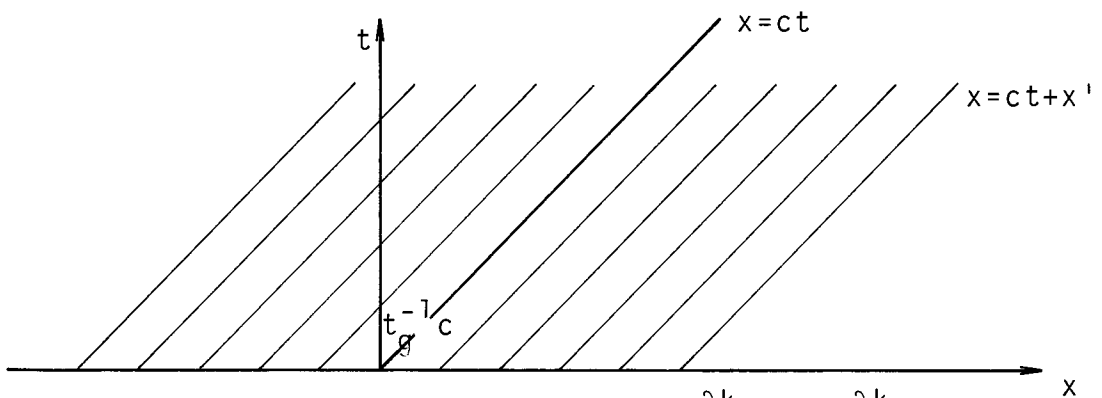


Figura II.21 - Características da equação $\frac{\partial k_1}{\partial t} + c \frac{\partial k_1}{\partial x} = 0$

Note que, ao longo de cada característica, a concentração permanece constante para qualquer $t \geq 0$, embora $\frac{\partial k_1}{\partial t}$ e $\frac{\partial k_1}{\partial x}$ não sejam obrigatoriamente iguais a zero; como mostra a

Figura II.22

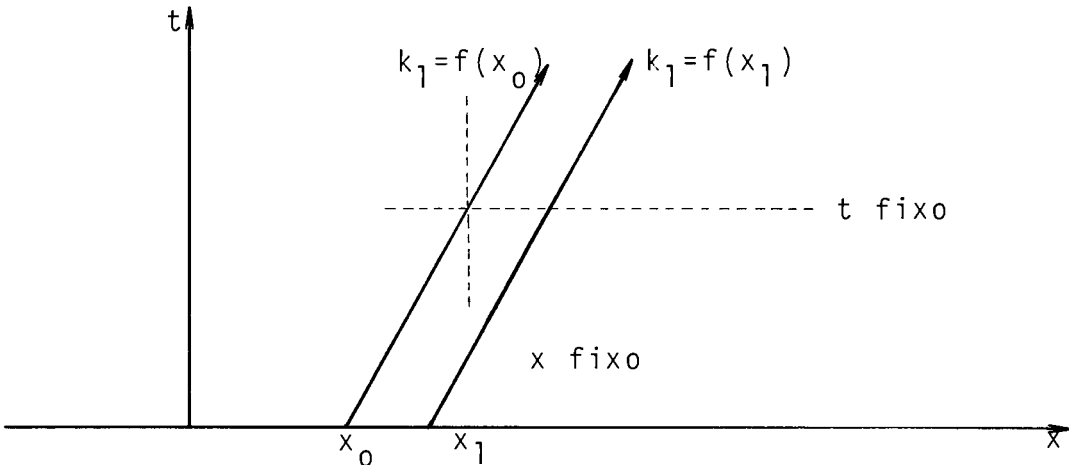


Figura II.22 - Ao longo da característica a concentração é constante

Vejamos agora o sinal de c . Para isto, esboçamos na Figura II.23 o diagrama fundamental do tráfego, já mostrado na Figura II.2

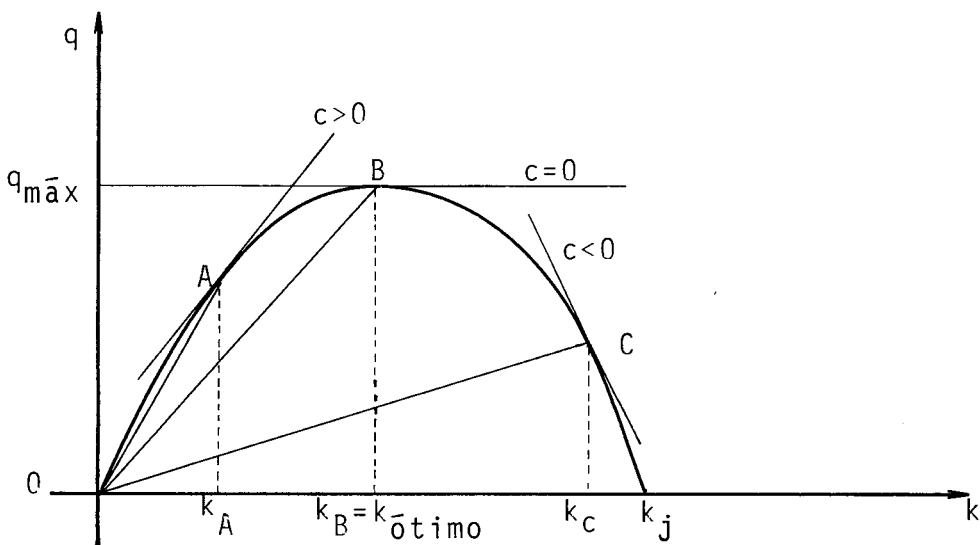


Figura II.23 - Valores relativos da c (velocidade de propagação da onda de densidade).

Na realidade, o diagrama fundamental do tráfego varia de rodovia para rodovia. Até mesmo em uma dada rodovia ele varia no espaço de seção para seção e, no tempo, em função de qualquer alteração física.

Além disso, fatores como iluminação, pista seca ou molhada etc., influem no diagrama.

Se construíssemos duas vias exatamente iguais, em regiões em que os "*hábidos de dirigir*" fossem diferentes, como o diagrama é levantado por medições diretas na via, verificaríamos que estes teriam diferenças.

O que permanece comum a todos os diagramas é sua forma geral, com concavidade voltada para baixo $\frac{d^2q}{dk^2} < 0$, um só ponto de máximo em $\frac{dq}{dk} = 0$, e $q = 0$ para $k = 0$ e $k = k_j$.

Os estudos, feitos sobre um particular diagrama, pressupõem que este represente uma seção homogênea da rodovia.

Da equação (II.40), com $0 \leq k_0 \leq k_j$, e observando a Figura II.23, vemos que

$$c > 0 \text{ para } 0 \leq k < k_{\text{ótimo}}$$

$$c = 0 \text{ para } k = k_{\text{ótimo}}$$

$$c < 0 \text{ para } k_{\text{ótimo}} < k \leq k_j$$

HABERMAN⁵ adotou uma divisão do espectro de concentrações diferente do que vimos até agora. Ele considera apenas duas situações: tráfego leve, quando $k < k_{\text{ótimo}}$ e tráfego pesado, quando $k > k_{\text{ótimo}}$.

Sob condições de concentração aproximadamente uniforme, as características para tráfego leve e pesado teriam os aspectos mostrados nas Figuras II.24 e II.25, respectivamente

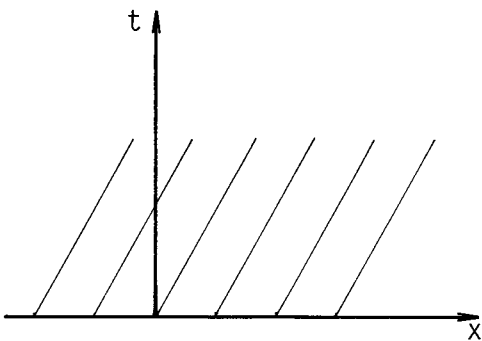


Figura II.24 - características para tráfego leve

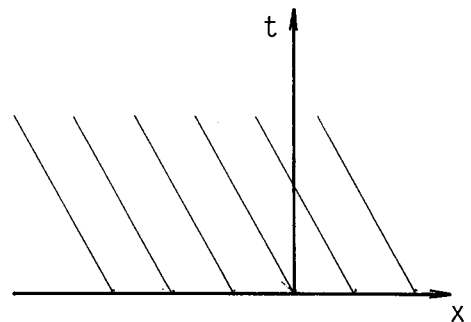


Figura II.25 - Características para tráfego pesado

Vamos agora tecer algumas considerações sobre a propagação das "ondas de densidade".

Imaginemos que, sob condições de tráfego pesado e concentração aproximadamente uniforme, tenhamos uma distribuição de concentração, num trecho da rodovia, como mostra a Figura II.26.

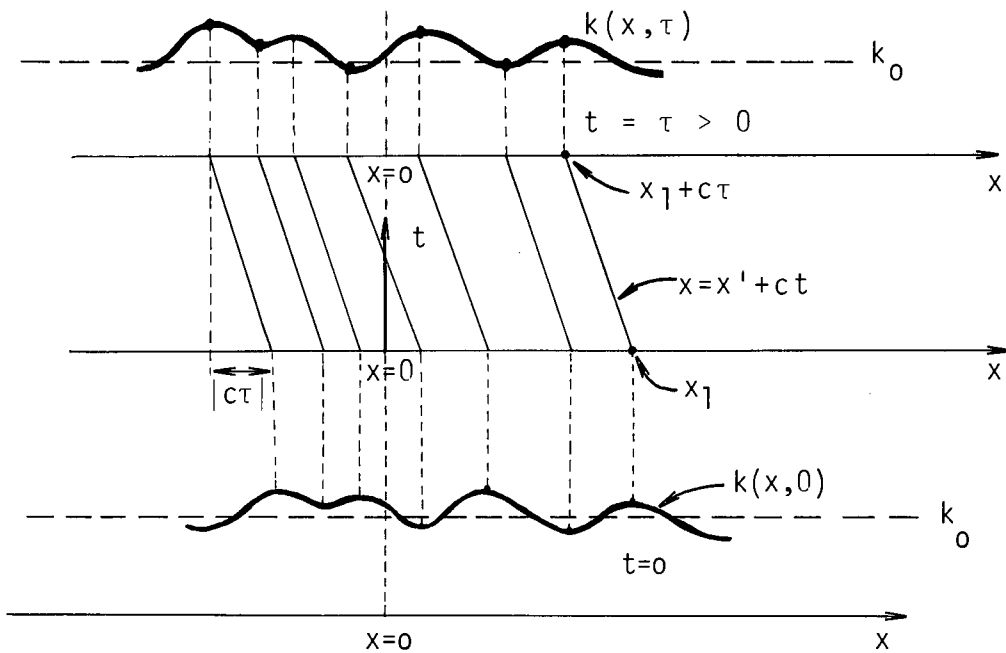


Figura II.26 - A onda de densidade se desloca sem mudar de forma

$$k(x, 0) = k_0 + \epsilon k_1(x, 0)$$

$$k(x, 0) - k_0 = \epsilon k_1(x, 0)$$

$$k(x, \tau) = k[(x - c\tau), 0]$$

A "onda de densidade" da Figura II.26 desloca-se sem mudar a forma, com velocidade constante $c = \frac{dq}{dk}(k_0)$

Em fluxo de tráfego há três importantes velocidades a saber:

(a) velocidade dos carros;

- (b) Velocidade de propagação das ondas de densidade; e
- (c) Velocidade de propagação das ondas de choque, ou velocidade da descontinuidade da concentração.

A terceira velocidade será considerada mais adiante.

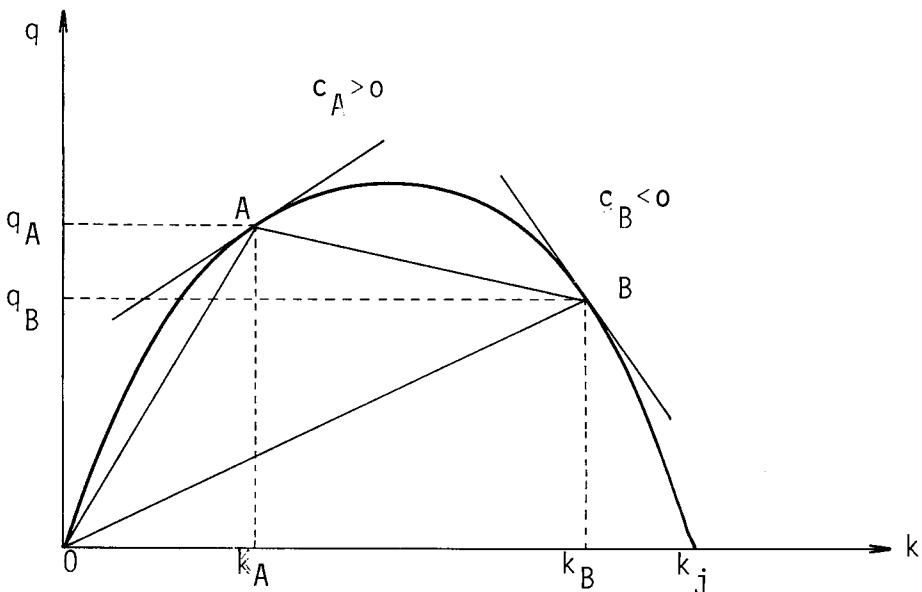


Figura II.27 - Elementos colhidos geometricamente sobre o diagrama fundamental do tráfego

Na Figura II.27 estão representadas, pelas inclinações das diversas retas, as velocidades:

- OA - velocidade u_A dos carros na região de concentração k_A ;
- OB - velocidade u_B dos carros na região de concentração k_B ;
- c_A - velocidade de propagação da onda de densidade na região de concentração k_A ;

c_B - velocidade de propagação da onda de densidade na região de concentração k_B ; e

AB - velocidade da onda de choque, gerada pela descontinuidade das concentrações na fronteira entre as regiões de concentrações k_A e k_B .

O diagrama fundamental do tráfego pode ser bastante usado para esboçar soluções da equação diferencial (II.41).

Sabemos que k_1 é constante ao longo das curvas nas quais $x - ct = \text{constante}$, isto é, retas de velocidade c .

Se estas características são traçadas em um diagrama espaço x tempo, tal que as inclinações tenham unidade de velocidade, então as inclinações das retas características são as mesmas que as das tangentes apropriadas, no diagrama fundamental do tráfego.

Logo, se a concentração é aproximadamente k_0 , todas as características são retas paralelas à tangente no ponto (k_0, q_0) , do diagrama fundamental.

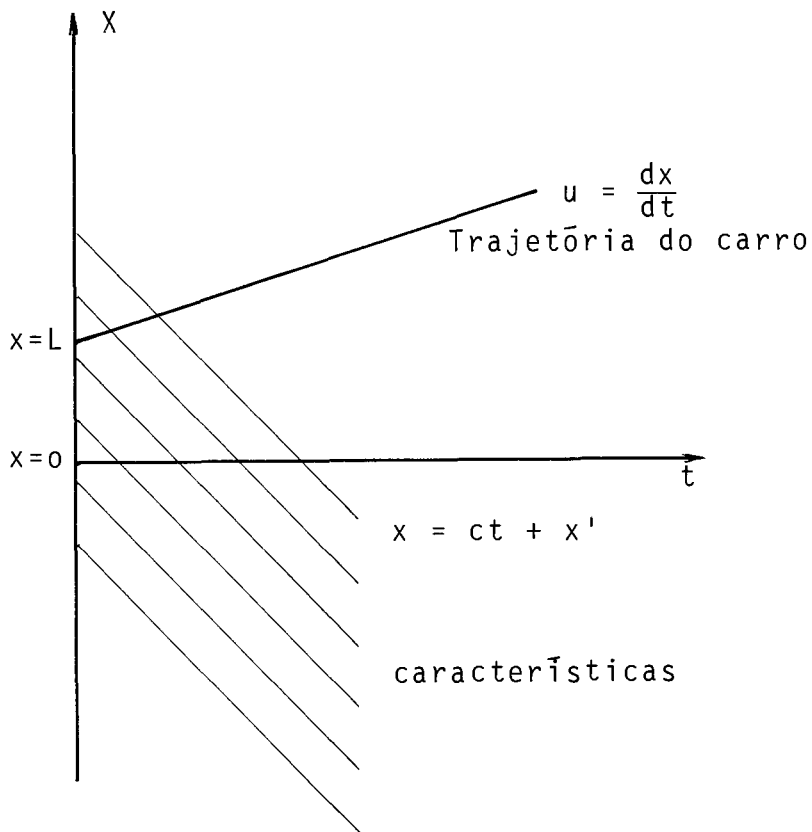


Figura II.28 - Construída a partir da Figura II.27.

II.3.2 - Tráfego Não Uniforme

Considerando o diagrama fundamental do tráfego e a equação diferencial (II.37), podemos escrever

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{dq(k)}{dk} \cdot \frac{\partial k}{\partial x} = 0 \quad (\text{II.45})$$

Esta é uma equação diferencial parcial de primeira ordem, não linear.

Note que, ao estudarmos a equação (II.39), conside-

ramos soluções aproximadas, visto que ela é o resultado da linearização da equação (II.45), sendo somente válida para o tráfego com concentração quase uniforme.

Foi visto, neste caso, que o tráfego varia segundo ondas de densidade.

Consideremos novamente um observador se deslocando de alguma forma predeterminada $x(t)$.

A concentração, para este observador, varia no tempo quando ele se desloca, assim:

$$\frac{dk}{dt} = \frac{\partial k}{\partial t} + \frac{dx}{dt} \frac{\partial k}{\partial x} \quad (\text{II.46})$$

Por simples comparação entre as equações (II.45) e (II.46), concluímos que teremos

$$\frac{dk}{dt} = 0 \quad (\text{II.47})$$

isto é, $k = \text{constante}$, se

$$\frac{dx}{dt} = \frac{dq(k)}{dk} \triangleq q'(k) \quad (\text{II.48})$$

Portanto, para ver $k = \text{constante}$, o observador deve se deslocar a uma velocidade $q'(k)$, velocidade na qual se

propagam as ondas de densidade, onde a concentração \bar{c} é quase uniforme.

Esta velocidade é denominada "velocidade local da onda", visto que ela depende da concentração, a qual pode variar severamente de uma seção para outra da rodovia.

Assim, se o observador se desloca com a velocidade local da onda, então a concentração do tráfego lhe parecerá constante.

Concluimos então que existem certos movimentos segundo os quais o observador medirá uma concentração de tráfego constante, ver Figura II.29

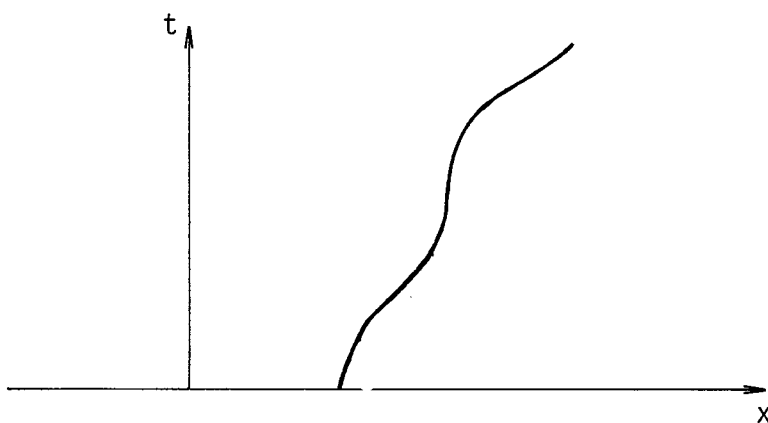


Figura II.29 - Trajetória segundo a qual o observador medirá concentração constante

Note que, sendo as equações (II.47) e (II.48) equações diferenciais ordinárias, essas curvas serão curvas características, ao longo das quais a concentração será constante.

Para cada observador, a concentração permanecerá a mesma e, em consequência, também a velocidade local da onda permanecerá a mesma para ele.

A velocidade com a qual cada observador se move é constante.

Note que, cada observador se move com velocidade constante, mas diferentes observadores se movem com velocidades constantes diferentes, se partirem com condições iniciais de concentração diferentes.

Cada observador se desloca com sua própria velocidade local da onda.

Decorre daí que cada característica é uma reta, como no caso de concentração quase uniforme, apenas podendo não ser paralelas.

Consideremos as características que, em $t = 0$, estão nos pontos $x = \alpha$ e $x = \beta$ da rodovia, ver Figura II.30.

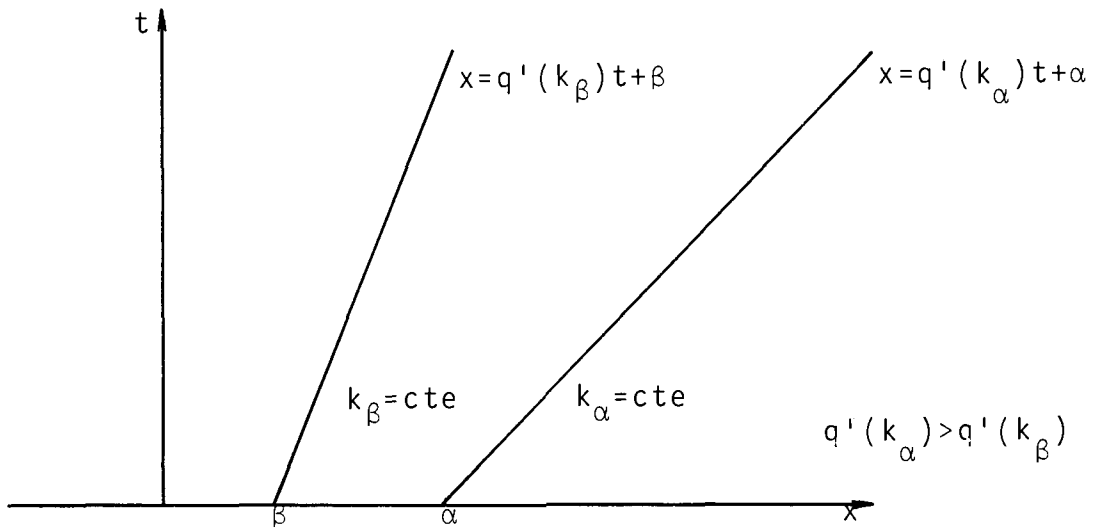


Figura II.30 - Retas características das concentrações k_α e k_β para observadores partindo, em $t=0$, de α e β , respectivamente

Das equações (II.47) e (II.48), para cada característica, teremos como conhecidas as constantes

$$k = k(\alpha, t) = k(\alpha, 0) \triangleq k_\alpha$$

$$k = k(\beta, t) = k(\beta, 0) \triangleq k_\beta$$

A velocidade local de cada onda, que determina as características, serão as constantes

$$\frac{dx}{dt} = q'(k_\alpha) \text{ e } \frac{dx}{dt} = q'(k_\beta)$$

Consequentemente, as características serão as retas

$$x = q'(k_\alpha)t + \alpha$$

$$x = q'(k_\beta)t + \beta$$

Note que, se $k_\alpha \neq k_\beta$, teremos $q'(k_\alpha) \neq q'(k_\beta)$ e as retas características não serão paralelas.

Para determinar a concentração em um ponto $x = x^*$ da rodovia, em um instante futuro $t = t^*$, devemos conhecer a característica que passa por aquele ponto.

Conhecer uma reta significa conhecer seu coeficiente angular (inclinação) e um de seus pontos ou então conhecer dois de seus pontos.

Se pudermos conhecer a reta característica que passa pelo ponto (x^*, t^*) , isto é, se pudermos determinar $q'(k)$ neste ponto, então conheceremos a concentração nele. Isto porque a concentração $k(x^*, t^*)$ é a mesma que a do ponto em que a característica intercepta x , a qual consideramos, de início, conhecida, $k(x^*, t^*) = k(\gamma, 0)$, ver Figura II.31.

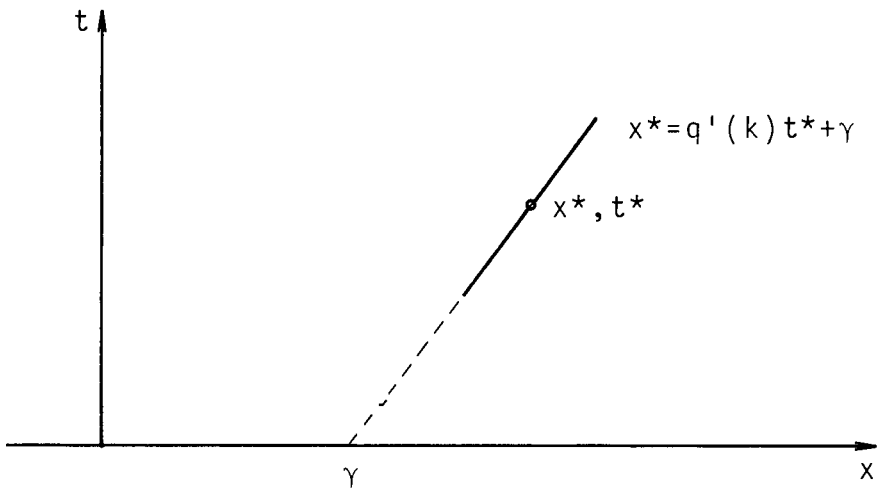


Figura II.31 - Conhecendo $q'(k)$ em (x^*, t^*) determinamos γ , onde conhecemos k_γ .

A técnica descrita é denominada "Método das características".

Vejamos algumas propriedades da velocidade da onda de densidade.

Observando o diagrama fundamental de tráfego, Figura II.27, verificamos que $\frac{dq}{dk}$ decresce quando k cresce.

Isto pode ser visto diretamente na Figura II.32.

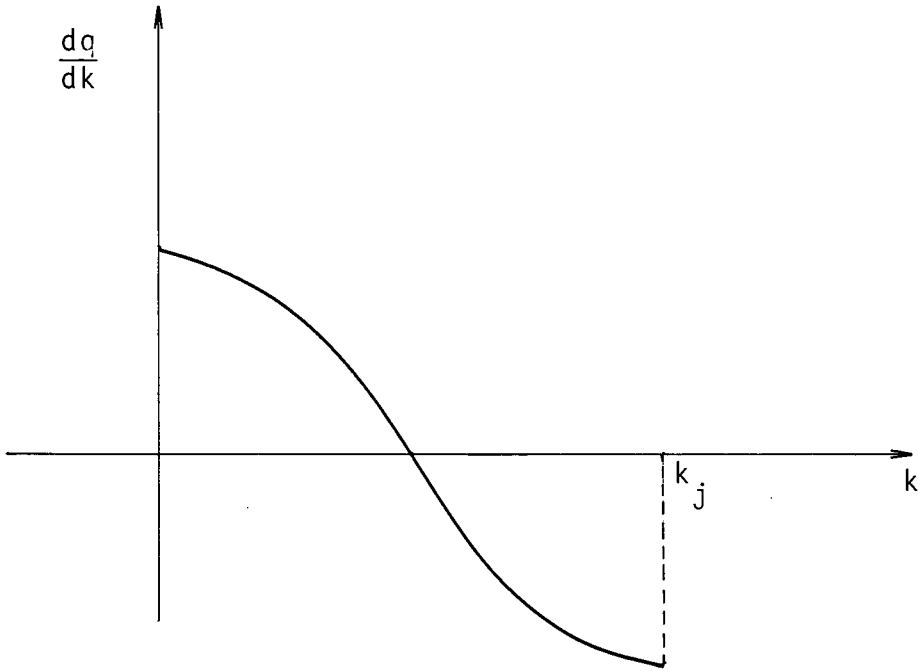


Figura II.32 - Esbôço da variação de $\frac{dq}{dk}$ com k .

Vemos que a velocidade da onda de densidade diminui à medida que o tráfego se torna mais denso.

Outro fato de interesse é a relação que existe entre duas velocidades importantes; a velocidade da onda de densidade e a velocidade dos veículos.

Sabendo que

$$q = k \cdot u(k)$$

Temos por derivação

$$\frac{dq}{dk} = \frac{d}{dk} (k \cdot u(k)) = k \frac{du(k)}{dk} + u(k) \frac{dk}{dk}$$

logo

$$\frac{dq(k)}{dk} = k \frac{du(k)}{dk} + u(k) \quad (\text{II.49})$$

Da hipótese inicial de que, quando a concentração cresce a velocidade dos veículos diminui, tiramos

$$\frac{du(k)}{dk} \leq 0 \quad (\text{II.50})$$

Sendo que $\frac{du}{dk} = 0$ só se verifica quando a concentração é extremamente baixa (quase zero), caso em que a limitação da velocidade na rodovia, mais que a interação entre veículos, controla a velocidade destes.

Levando (II.50) em (II.49) e sabendo que $k \geq 0$, temos

$$\frac{dq}{dk} \leq u(k) \quad (\text{II.51})$$

Concluimos portanto que a velocidade da onda de densidade nunca é maior que a velocidade dos veículos.

Quando $q(k)$ é máximo, $\frac{dq(k)}{dk} = 0$ e da equação (II.49)

temos

$$\left. \frac{du(k)}{dk} \right|_{q_{\max}} = - \frac{u_{\bar{o}timo}}{k_{\bar{o}timo}} \quad (\text{II.52})$$

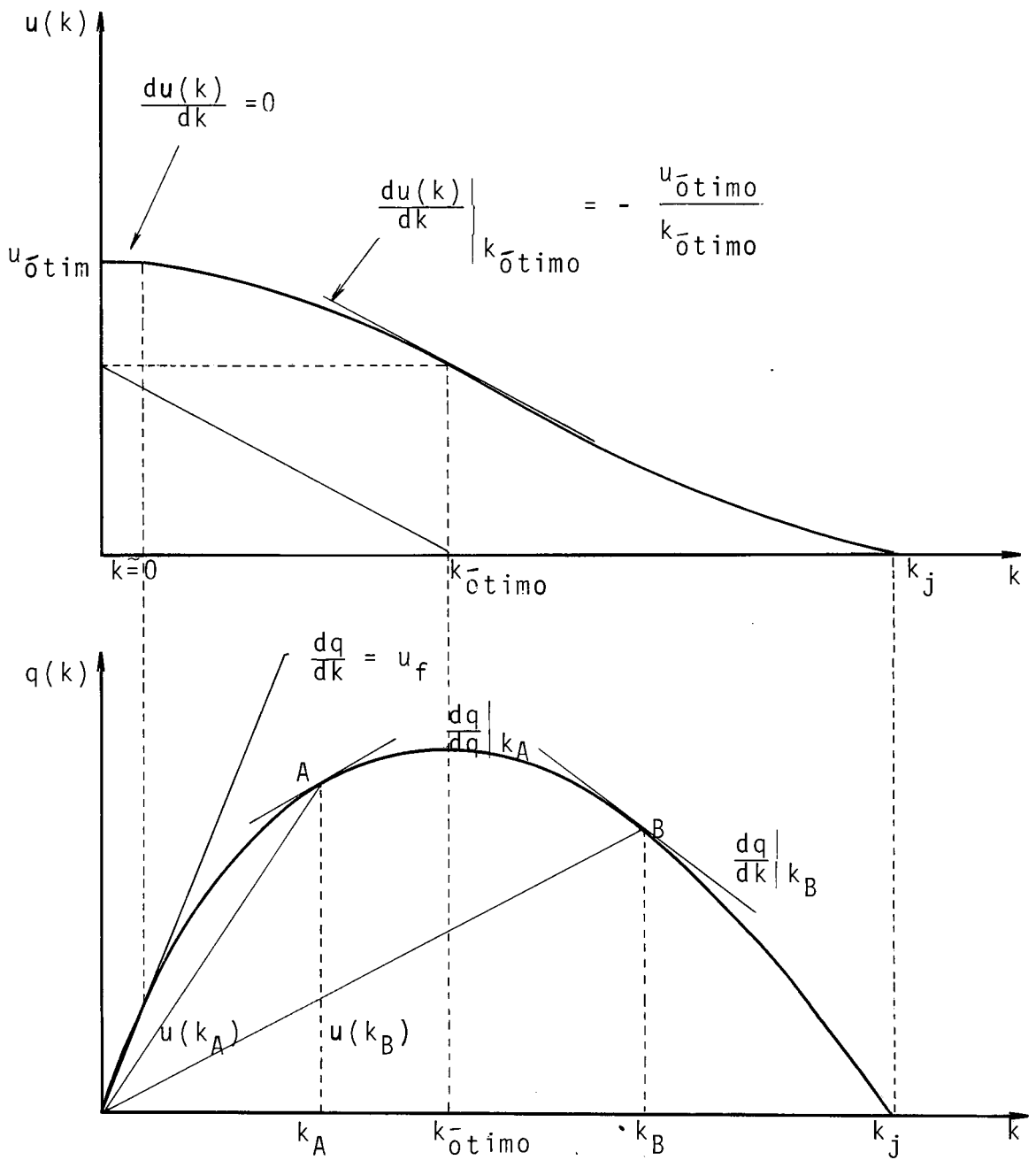


Figura II.33

II.3.3 - Método das Características Aplicado

Nas seções II.3.1 e II.3.2 foram feitas suposições e formulado, sobre elas, o modelo matemático que HABERMAN⁵ denominou "*método das características*".

Nessas seções não foram tratados os problemas que surgem frequentemente numa rodovia. Isto será feito agora.

II.3.3.1 - Quando um Semáforo Abre

O semáforo, neste problema, simboliza qualquer obstrução total da corrente de tráfego em um ponto da rodovia que, de súbito, seja totalmente removida.

A análise que será feita agora só é válida para instantes e posições da rodovia, atrás da obstrução, onde a fila de veículos retidos apresenta, continuamente, concentração máxima.

Se a obstrução se verificou no ponto $x = 0$ e permaneceu assim por um tempo suficientemente longo, para que não existam veículos em $x > 0$, podemos admitir a situação da Figura II.34.

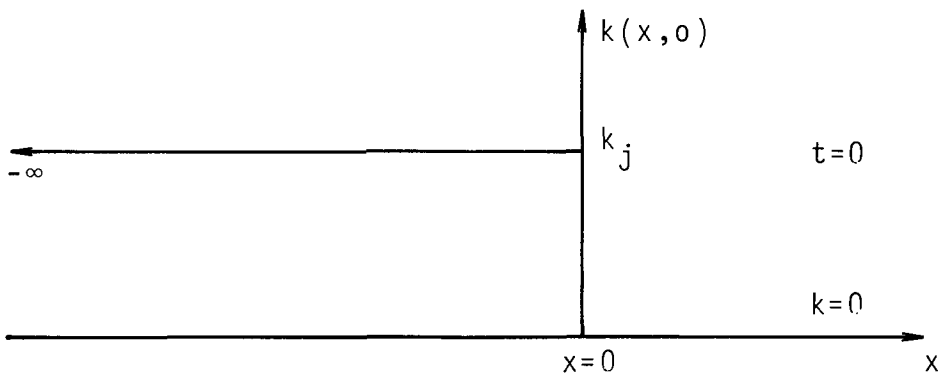


Figura II.34 - Longa fila de veículos retidos por uma obstrução

Nessa situação, temos as condições iniciais

$$k(x,0) = \begin{cases} k_j & \text{para } x < 0 \\ \text{descontinuidade} & \text{para } x = 0 \\ 0 & \text{para } x > 0 \end{cases}$$

Suponhamos que em $t = 0$ a obstrução seja, de súbito, completamente removida.

Vejamos como se comportará a concentração.

A equação de conservação de carros, equação (II.18)

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{dq}{dk} \frac{\partial k}{\partial x} = 0$$

deve ser válida para as condições iniciais do problema, que é uma função descontínua.

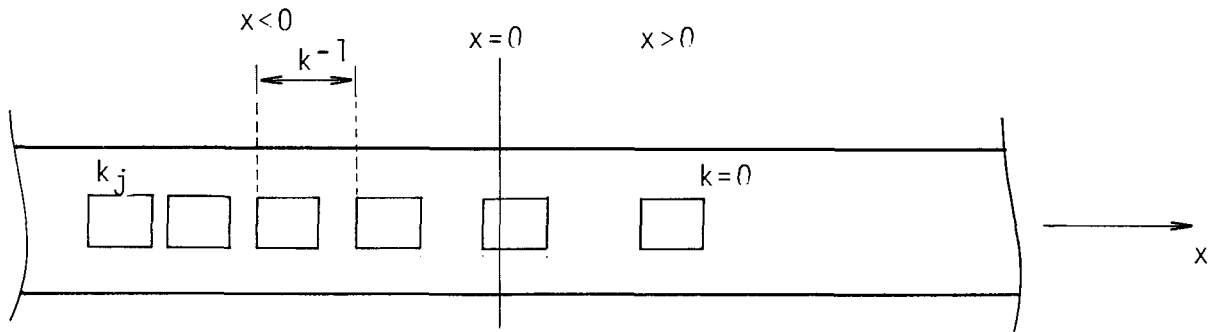


Figura II.35 - Trecho de rodovia mostrando a distribuição dos carros ao partirem de um semáforo

Lembrando que a concentração \bar{k} é o inverso do espaçamento entre veículos (distância entre os parachoques traseiros de dois veículos consecutivos) e observando a Figura II.35, esboçada a partir da observação diária, podemos prever para a distribuição da concentração, nos instantes que se seguem à desobstrução, o esboço da Figura II.36.

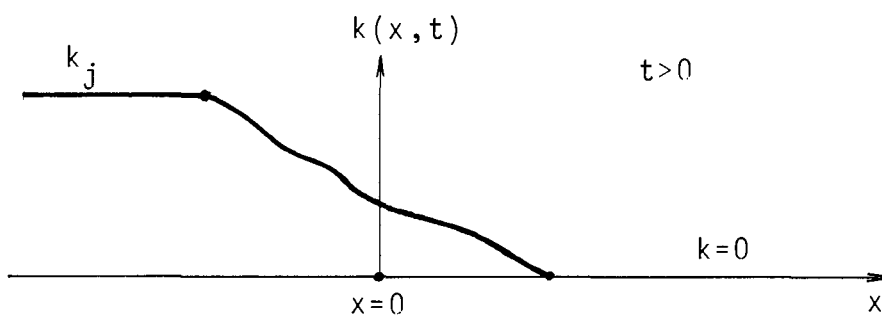


Figura II.36 - Comportamento esperado da concentração nos instantes que se seguem à desobstrução

A solução que será obtida pelo "método das características" deverá dar este tipo de resultado.

Das equações (II.48) e (II.49), sabendo que a concentração de tráfego $k(x, t)$ é constante ao longo das características dadas por

$$\frac{dx}{dt} = \frac{dq(k)}{dk} = k \frac{du(k)}{dk} + u(k) \quad (\text{II.53})$$

Como $k(x, t)$ permaneceu constante ao longo da característica, a concentração se desloca com velocidade constante e as características são retas no plano $x \times t$

$$x = \frac{dq(k)}{dk} t + x_0 \quad (\text{II.54})$$

onde cada característica pode ter constantes de integração x_0 diferentes.

Vamos analisar todas as características que interceptam o eixo x na região $x > 0$. Nessa região, no instante $t=0$, não há carros, logo $k(x, 0) = 0$.

Assim, da equação (II.53) temos

$$\left. \frac{dx}{dt} = \frac{dq(k)}{dk} \right|_{k=0} = u(0) = u_f \quad (\text{II.55})$$

e as características, nessa região, serão retas com velocidade u_f .

As características que partem de $x > 0$, em $t = 0$, são dadas pela equação (II.56) e mostrada na figura II.37:

$$x = u_f t + x_0 \quad x_0 > 0 \quad (\text{II.56})$$

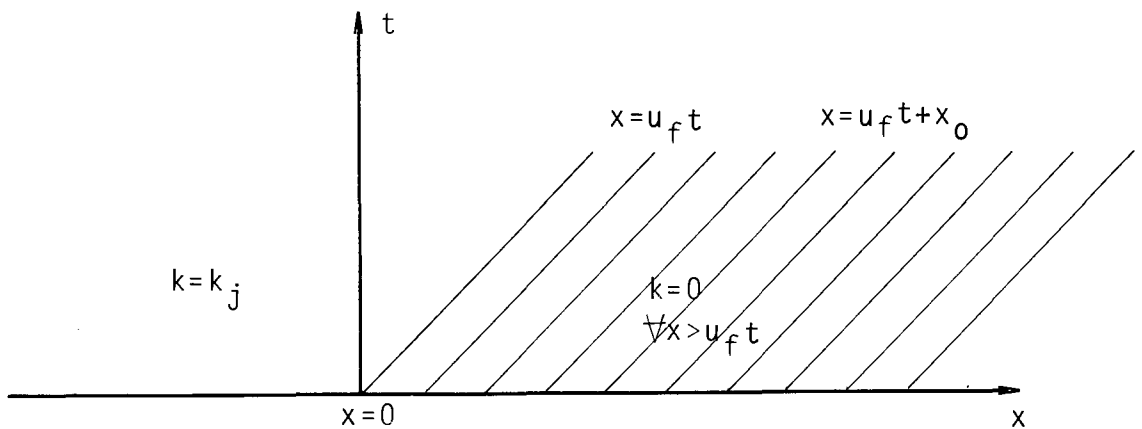


Figura II.37 - Características na ausência de tráfego

A característica que parte de $x = 0$ tem equação

$$x = u_f t$$

Então, na região de $x > 0$, para qualquer $t > 0$, teremos $k = 0$ onde $x > u_f t$, isto é, não chegarão carros em um ponto x da rodovia antes que seja decorrido o tempo

$$t = \frac{x}{u_f} \quad (\text{II.57})$$

Dito de outra forma, o carro mais avançado estará, no máximo, na posição $x = u_f t$; que se torna uma linha de fronteira.

Aqui, é importante notar que, neste modelo, admitiu-se que o carro parte já com a velocidade u_f , isto é, acelera instantaneamente da velocidade $u = 0$ para a velocidade livre $u = u_f$.

Vamos analisar agora todas as características que interceptam o eixo x na região $x < 0$. Nessa região, no instante $t = 0$, a distância entre carros consecutivos é zero, logo, $k(x, 0) = k_j$.

Assim, da equação (II.53), sabendo-se que $u(k_j) = 0$,

$$\frac{dx}{dt} = \frac{dq(k)}{dk} \Big|_{k = k_j} = k_j \frac{du(k)}{dk} \Big|_{k = k_j} = k_j u'(k_j) \quad (\text{II.58})$$

Note-se que $k_j > 0$ e $u'(k_j) < 0$, logo, as características nessa região serão retas paralelas com velocidade

$$k_j u'(k_j) < 0$$

dadas pela equação (II.59) e mostradas na figura II.38.

$$x = k_j u'(k_j) t + x_0 \quad x_0 < 0 \quad (\text{II.59})$$

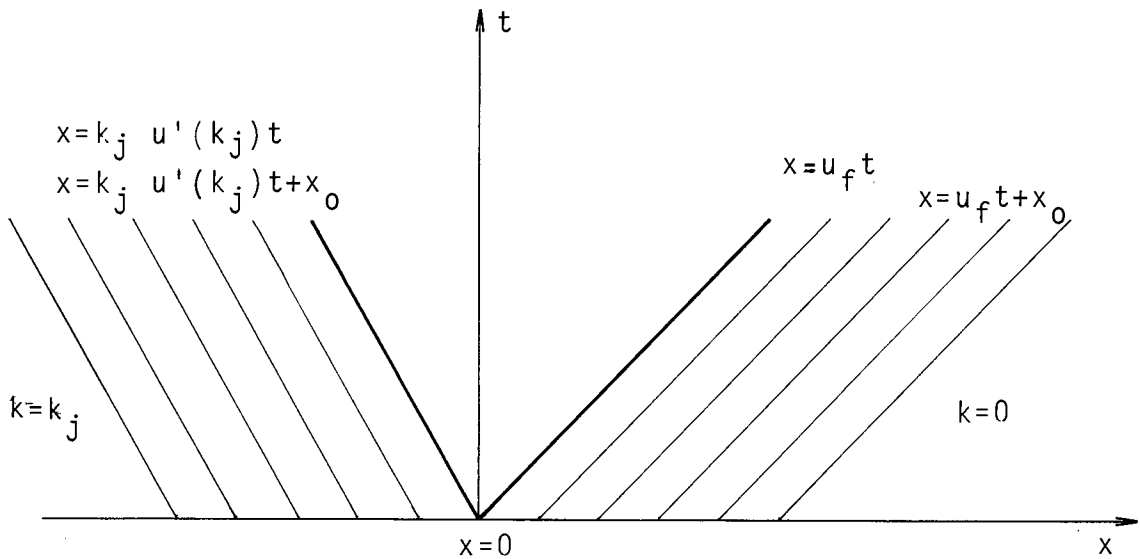


Figura II.38 - Características extremas para ausência de carros e para fila de carros com parachoques encostados

A reta $x = k_j u'(k_j)t$, que corta o eixo x em $x = 0$ ($t = 0$), é uma linha de fronteira entre a região de concentração k_j e a região de concentração $k < k_j$. Esta linha é o lugar dos carros na iminência da partida.

Vemos portanto que, os carros situados na região $x < k_j u'(k_j)t$, estão ainda parados.

Dito de outra forma, num ponto x da rodovia, na região de concentração $k = k_j$, não haverá movimento de carros antes que seja decorrido o tempo

$$t = \frac{x}{k_j u'(k_j)} \quad (\text{II.60})$$

É fato observado rotineiramente que, após o desimpedimento da via, cada carro leva um tempo finito para iniciar seu deslocamento.

Se considerarmos o n -ésimo carro na fila de carros parados ($k = k_j$), esta teoria diz que, após o semáforo indicar verde, este carro aguardará, para iniciar seu movimento, um tempo

$$t = \frac{(n-1) \varepsilon}{-k_j u'(k_j)} \quad (\text{II.61})$$

onde ε é a distância entre os para-choques traseiros de dois carros consecutivos.

Note que podemos medir o valor de $u'(k_j)$, em uma posição da rodovia, usando a equação (II.61) sob a forma (II.62)

$$u'(k_j) = \frac{(n-1) \varepsilon}{-k_j t} \quad (\text{II.62})$$

pois conhecemos n , ε , k_j e medimos t .

Conhecido assim o valor de $u'(k_j)$, podemos usar a equação (II.61) para calcular t em situações futuras.

Até aqui foi calculada a parte mais fácil do problema, ou seja, a situação nas regiões onde a concentração é $k = 0$ ou $k = k_j$.

Foi visto, então, que as concentrações na rodovia, na situação do problema, eram

$$k = k_j \text{ para } x < k_j u'(k_j) t$$

e
$$k = 0 \text{ para } x > u_f t ,$$

como mostrado na Figura II.39 para $t > 0$

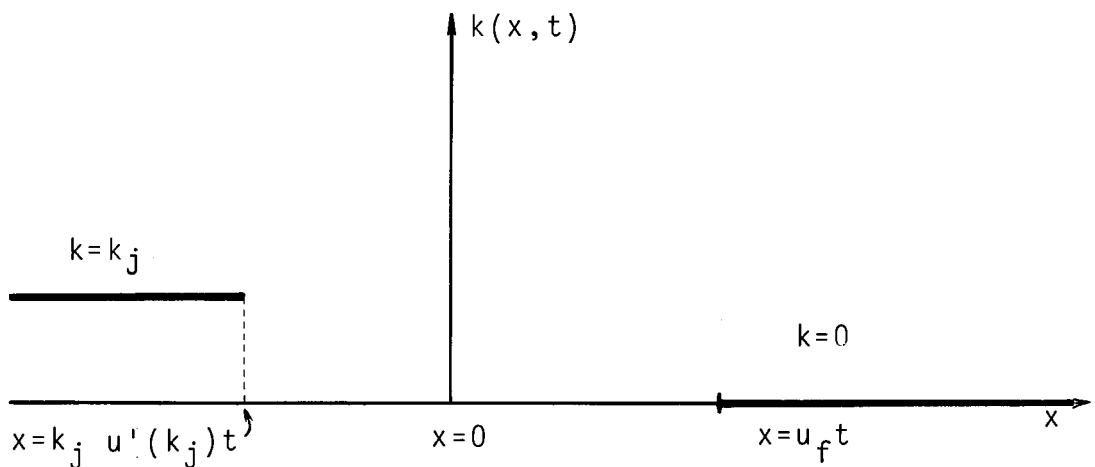


Figura II.39 - Distribuição das concentrações na rodovia, decorrido um tempo t , após o desprendimento em $x=0$.

Vemos, portanto, que nos falta conhecer a distribuição das concentrações na rodovia no trecho

$$k_j u'(k_j) t < x < u_f t$$

Para estudar este caso, vamos admitir inicialmente que não haja descontinuidade da concentração no ponto $x = 0$ quando $t = 0$, isto é, vamos admitir que $k(x, 0)$ seja contínua.

Assim vamos supor que haja uma suave transição entre os valores $k = k_j$ e $k = 0$, em uma pequena distância Δx , no entorno do ponto de obstrução, ver Figura II.40.

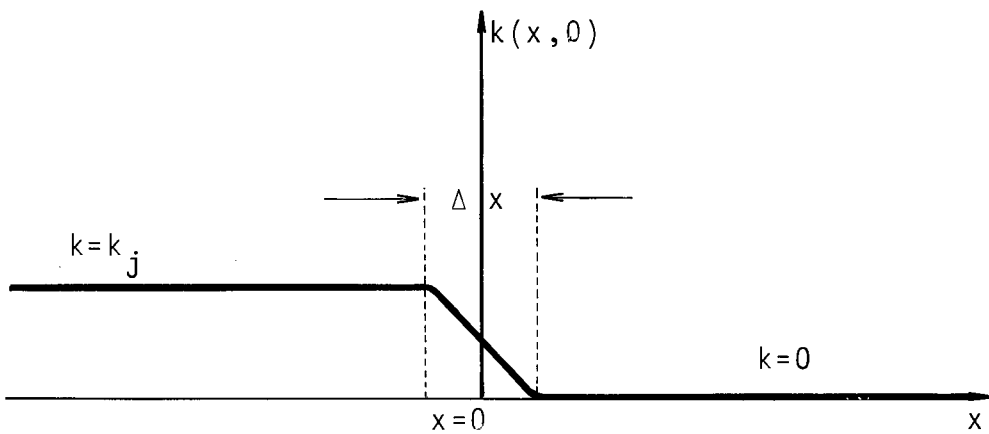


Figura II.40 - Modelo contínuo da concentração inicial.

Se Δx é suficientemente pequeno, podemos esperar que a solução deste problema seja essencialmente equivalente à solução no caso de $\Delta x = 0$.

Se $\Delta x \neq 0$, as características ao longo das quais $k = 0$ e $k = k_j$, podem ser esboçadas num diagrama como o da Figura II.41.

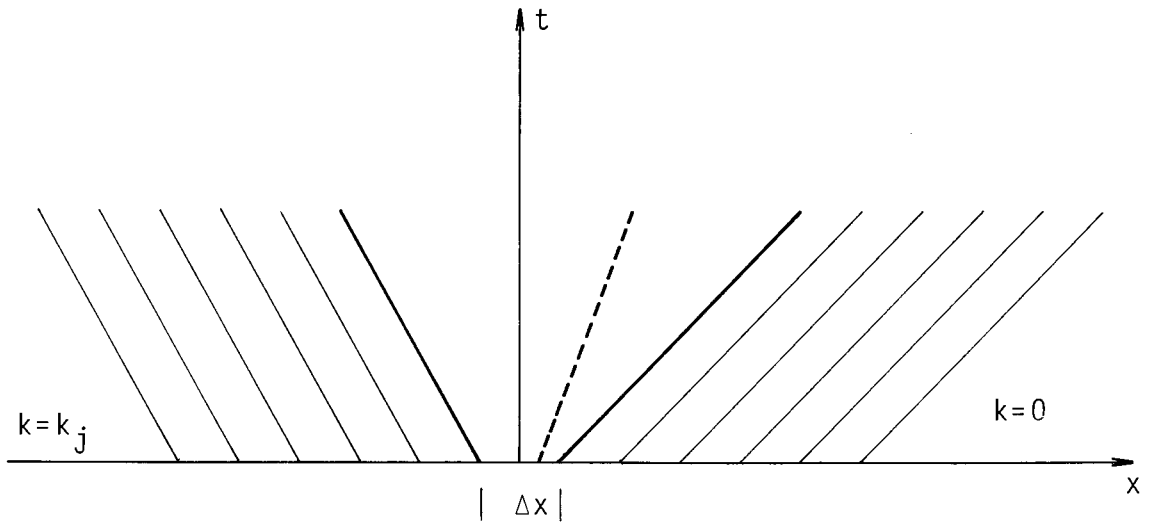


Figura II.41 - Retas características

Sabemos que k é constante ao longo da reta definida pela equação (II.54).

$$x = \frac{dq(k)}{dk} t + x_0,$$

que é representada na Figura II.41, para x_0 no intervalo Δx , pela linha tracejada.

Como k varia continuamente entre $k = 0$ e $k = k_j$, a velocidade $\frac{dq}{dk}$ permanece sempre entre os valores correspondentes a estas concentrações extremas, isto é,

$$k_j u'(k_j) < \frac{dq}{dk} < u_f$$

Onde a concentração k é menor, a velocidade $\frac{dq}{dk}$ é maior, isto é, quando a concentração cresce, a velocidade da onda diminui, assumindo valores negativos para $k > k_{\text{ótimo}}$.

Para o tráfego leve, a velocidade da onda é positiva; ao atingir a capacidade da via ($q = q_{\text{máx}}$), a velocidade da onda é zero; e para tráfego pesado, a velocidade da onda se torna negativa (propaga-se no sentido contrário ao fluxo de tráfego); ver Figura II.42.

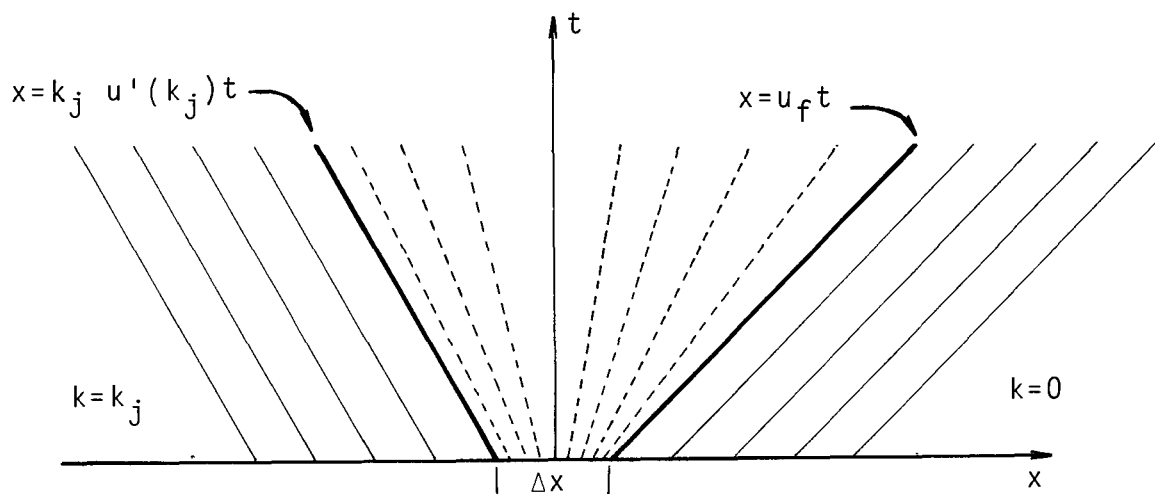


Figura II.42 - Método das características; Δx representa a distância inicial na qual $0 \leq k \leq k_j$

Note que as características representadas pelas linhas tracejadas abrem-se em leque.

A distância sobre a qual o tráfego varia sua concentração de $k = 0$ a $k = k_j$, de valor Δx em $t = 0$, aumenta com o tempo, isto é, o tráfego se expande após a via ser desimpedida.

Agora, se a concentração inicial é descontínua, isto é, representada pela Figura II.38 e não pela Figura II.42, então poderemos obter a concentração na região desconhecida, considerando o limite da condição contínua inicial, isto é, limite quando $\Delta x \rightarrow 0$.

Como x_0 está no intervalo Δx , então, quando $\Delta x \rightarrow 0$, teremos simultaneamente $x_0 \rightarrow 0$.

Assim sendo a equação (II.54), para a região em estudo, se reduz a

$$x = \frac{dq(k)}{dk} t \quad (\text{II.63})$$

Os observadores, acompanhando concentrações constantes, trafegarão a diferentes velocidades de onda $\frac{dq}{dk}$, que dependerão somente da concentração que observaram inicialmente em $x = 0$.

As características, nessa região, são ditas em "leque", representando uma expansão das ondas, como mostrado na Figura II.43.

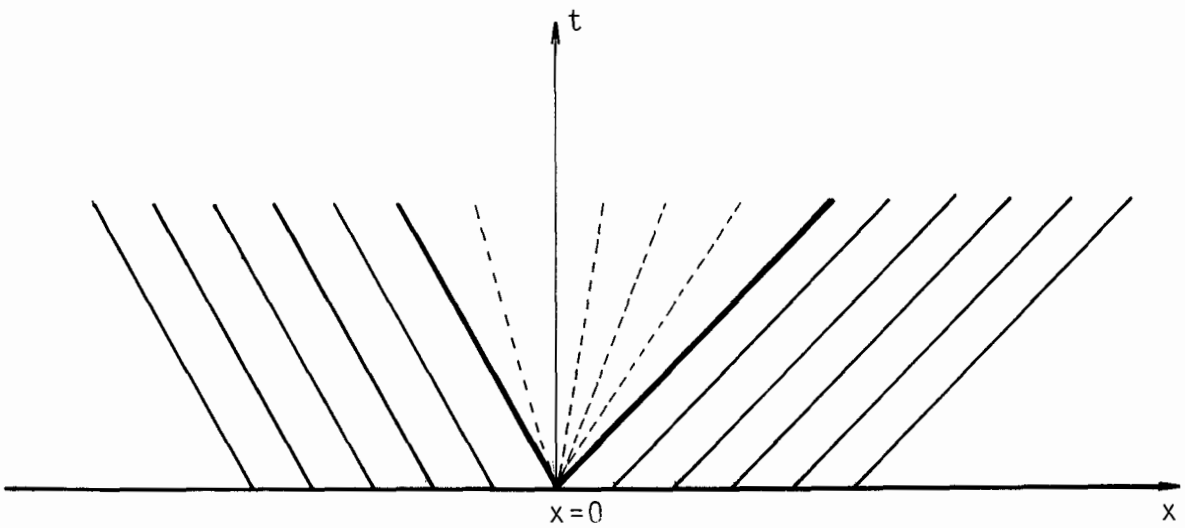


Figura II.43 - Características em forma de "leque"

Ao longo de cada característica a concentração \bar{c} é constante.

Nessa região de "leque", para obter a concentração em (x, t) , devemos determinar a característica que passa por ele. Neste ponto, a velocidade da "onda de densidade" é conhecida:

$$\frac{dq}{dk} = \frac{x}{t}$$

(II:64)

Essa equação deve ser resolvida para k .

Como $\frac{dq}{dk}$ depende somente de k , frequentemente é possível resolver algebricamente para k como uma função de x e t (neste caso função de x/t) na região do leque de características.

Para uso prático, frequentemente dispomos somente do gráfico da curva $q \times k$, a qual sabemos representar apenas trechos homogêneos da rodovia.

Podemos obter também as curvas $\frac{dq}{dk} \times k$.

Em uma dada posição, dentro do leque, a concentração pode ser determinada graficamente como descreveremos agora.

Dados x e t , a velocidade da onda $\frac{dq}{dk}$ é calculada pela equação (II.64). Este valor de $\frac{dq}{dk}$ é então locado sobre a curva $\frac{dq}{dk} \times k$ e o correspondente valor de k é obtido, Figura II.44.

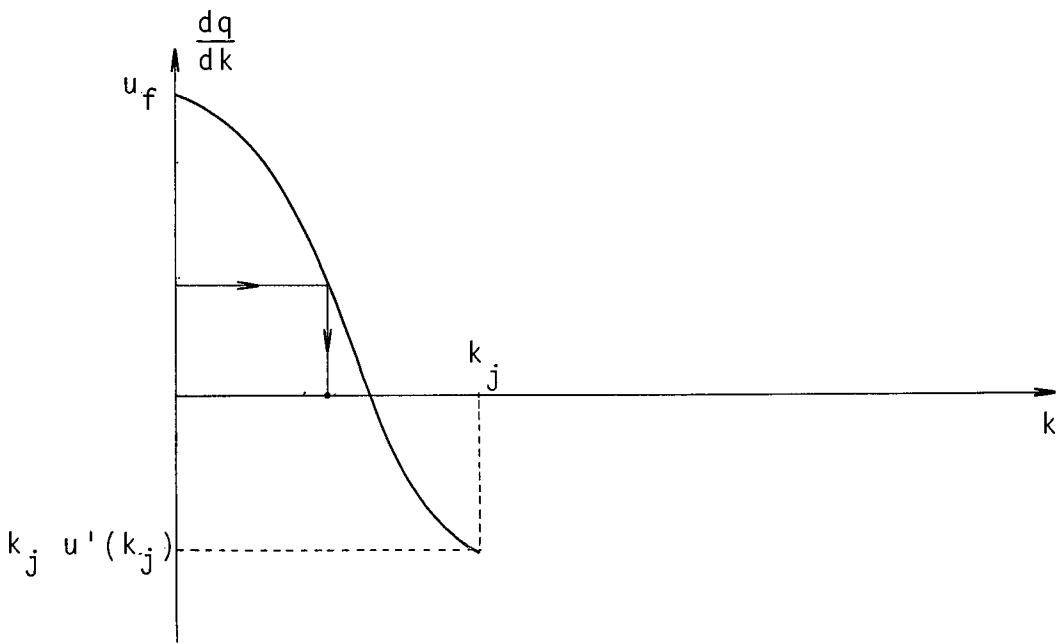


Figura II.44 - Determinação de k a partir de $\frac{dq}{dk}$

Outra forma gráfica de obter o valor de k , correspondente à reta característica que passa por (x, t) na região do leque, é fazendo uso do diagrama fundamental do tráfego, $q \times k$.

Dados x e t , a inclinação da reta característica que passa pela origem $(0, 0)$ do diagrama $x \times t$ e pelo ponto (x, t) , é igual à tangente à curva $q \times k$, isto é igual a $\frac{dq}{dk}$;
 Figura II.45(a) e (b).

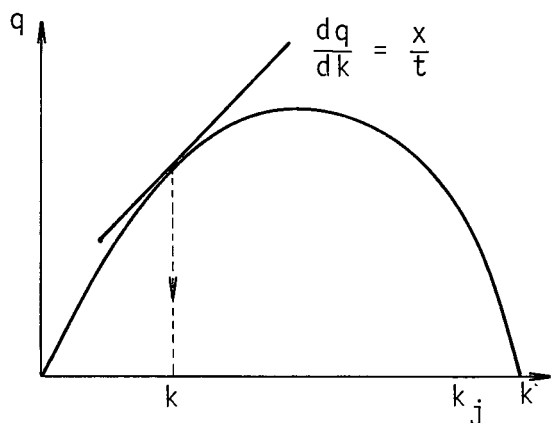


Figura II.45(a) - Diagrama fundamental do tráfego

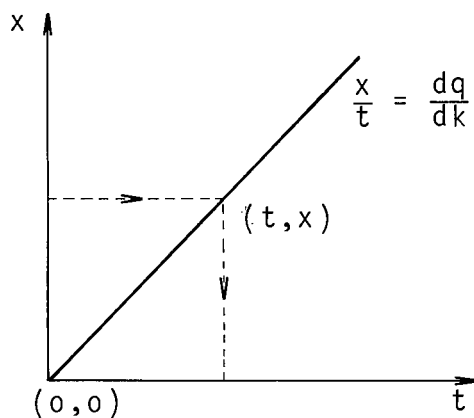


Figura II.45(b) - Diagrama espaço x tempo

Conhecendo x e t calculamos $\frac{x}{t} = \frac{dq}{dk}$ ou traçamos a reta característica sobre o diagrama x x t .

A partir daí, usando unidades adequadas, transportamos graficamente a reta característica para o diagrama fundamental do tráfego até encontrar o ponto de tangência, que é único.

Descoberto o ponto de tangência, sobre o diagrama fundamental do tráfego, procuramos o valor da concentração k correspondente a este ponto.

Vejamos agora qual o valor do fluxo de tráfego $q(k)$ na posição $x = 0$ da rodovia, para $t > 0$.

O fluxo máximo ocorre para $\frac{dq}{dk} = 0$.

Neste caso a velocidade da onda de densidade é zero, a onda permanece estacionária, e indica as posições em que o fluxo é máximo.

Veremos agora que, assim que a via é desimpedida, ocorre fluxo máximo na posição $x = 0$, assim permanecendo.

Da equação II.64

$$\frac{dq}{dk} = \frac{x}{t} ;$$

na posição $x = 0$, para $t > 0$, teremos

$$\frac{dq}{dk} = 0$$

Isto significa fluxo máximo neste ponto da região do leque, para qualquer $t > 0$ e qualquer que seja o diagrama fundamental do tráfego representativo deste trecho homogêneo da via.

Isto sugere uma maneira simples de medir a capacidade ($q_{\text{máx}}$) de um trecho homogêneo da via.

Posicione um observador em um ponto do trecho e obstrua de alguma forma, totalmente, o fluxo de tráfego neste

ponto. Deixe formar uma fila suficientemente longa de carros, onde sabemos que a concentração irá para seu valor máximo.

Desobstrua, de súbito, a via e simultaneamente o observador iniciará a medição do fluxo do tráfego neste ponto.

Se este modelo é correto, isto é, se a velocidade do tráfego é função somente da concentração $u = u(k)$, então o observador medirá um fluxo de tráfego constante e igual à capacidade da rodovia naquele ponto.

II.3.3.2 - Quando há um Congestionamento à Frente

Imaginemos a situação em que, inicialmente, o tráfego se torna mais concentrado à medida que avançamos na rodovia, como na Figura II.46.

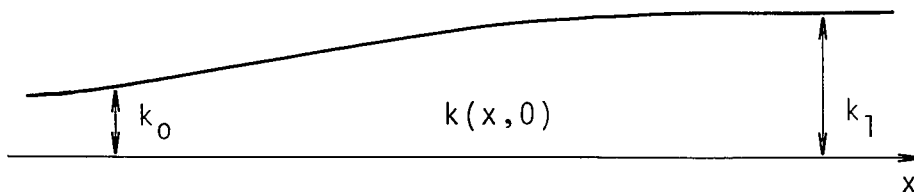


Figura II.46 - Tráfego progressivamente mais concentrado.

A solução que obteremos será denominada "onda comprimida".

Admitamos, por conveniência, que

$$k \rightarrow k_1 \text{ quando } x \rightarrow +\infty$$

e

$$k \rightarrow k_0 \text{ quando } x \rightarrow -\infty$$

onde

$$0 \leq k_0 < k_1 \leq k_j$$

Vejamos o que o modelo matemático prediz.

Vamos esboçar algumas características na região do tráfego pesado ($k \approx k_1$) e algumas na região de tráfego leve ($k \approx k_0$), como na Figura II.47

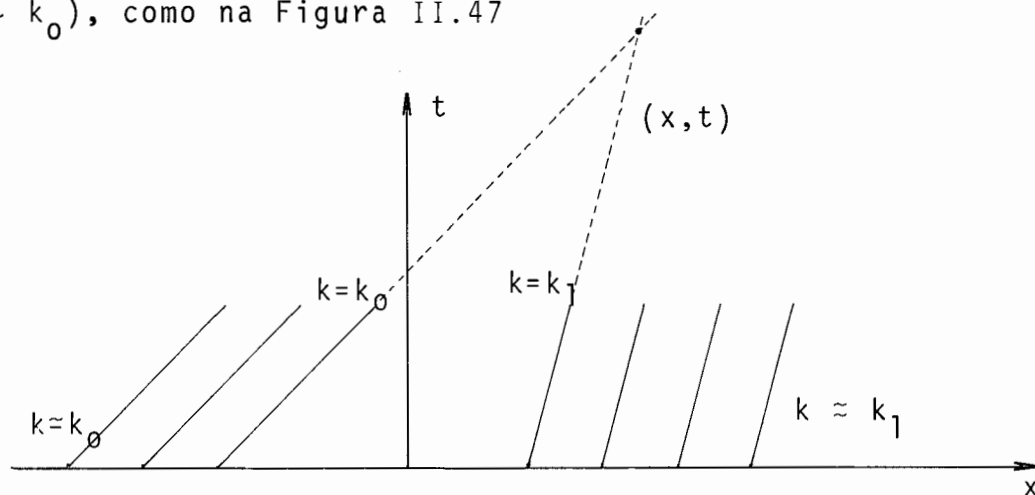


Figura II.47 - Interseção de características.

Uma "onda de densidade", para o tráfego pesado, move-se com velocidade $\left. \frac{dq}{dk} \right|_{k=k_1}$, a qual é menor que a velocidade para o tráfego leve.

Eventualmente, estas características poderão se cruzar.

Na Figura II.47 as características traçadas representam tráfego leve e as "*ondas de densidade*" correspondentes se deslocam na mesma direção do fluxo de tráfego (são positivas).

Todas as vezes que tivermos uma distribuição de concentração sobre a via como a da Figura II.46, algumas características se cruzarão.

Aqui, esta teoria prediz uma situação impossível de ocorrer, ou seja, mais que um valor da concentração em uma mesma posição da rodovia; os valores k_0 e k_1 .

Nessa situação, portanto, o modelo precisa ser modificado.

O modelo, na forma atual, prediz uma evolução de $k(x, t)$, como mostra a sequência (a), (b), (c) e (d) na Figura II.48.

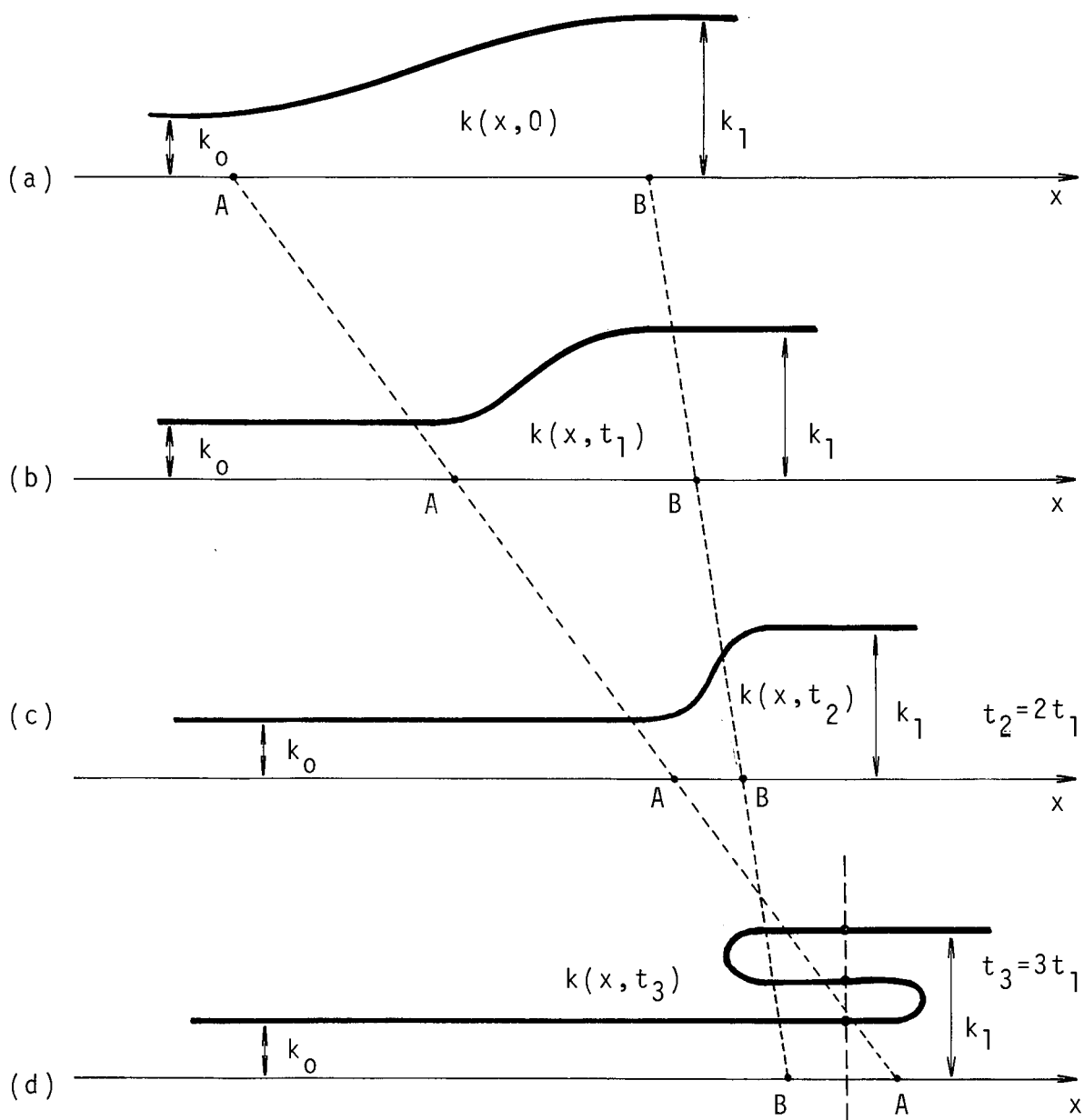


Figura II.48 - Evolução do perfil de concentrações ao longo da rodovia. A e B são dois observadores seguindo as concentrações constantes k_0 e k_1 .

Note que o modelo atual nos leva a um triplo valor de concentração em um mesmo ponto da rodovia na Figura II.48(d).

Dizemos, neste caso, que houve uma "quebra" da "onda de densidades".

Sabemos que \bar{s} pode haver um valor de $k(x, t)$ para cada posição da rodovia, logo o modelo atual deve ser de alguma forma modificado.

II.3.3.3 - Descontinuidades no Tráfego

Como o "método das características" está matematicamente justificado⁵, então a equação diferencial parcial não deve estar inteiramente válida.

Alguns dos pressupostos ou das aproximações feitas não devem ser inteiramente válidas.

Recordemos então quais foram:

- (1) Admitimos que, se os valores médios existem, podemos formular a integral de conservação dos carros.
- (2) Se a concentração e o fluxo são contínuos, então a lei integral de conservação torna-se uma lei diferencial de conservação.

(3) Postulando que a velocidade dos carros é função somente da concentração, a lei diferencial de conservação torna-se uma equação diferencial parcial para a concentração do tráfego.

A modificação do modelo será feita apenas para as situações em que apareceriam valores múltiplos da concentração, permanecendo válido tudo o que foi dito até aqui para as situações onde isso não ocorre.

Por conveniência e facilidade matemática, modificaremos apenas o pressuposto em (2).

Removeremos, onde necessário, o pressuposto que a concentração e a velocidade são funções contínuas do espaço e do tempo.

Admitamos que a concentração e a velocidade são descontínuas em alguma posição desconhecida x_s , e que esta descontinuidade pode se propagar no tempo $x_s(t)$; Figura II.49.

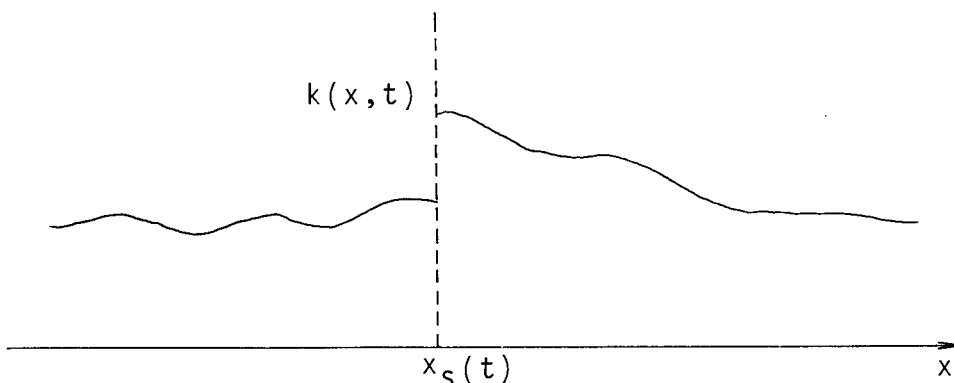


Figura II.49 - Descontinuidade de $k(x,t)$ em uma posição desconhecida $x_s(t)$, móvel

Vamos reconstruir a "conservação dos carros".

Consideremos o número $N(t)$ de carros contidos na região $x_1 < \bar{x} < \bar{x}_2$, onde estamos admitindo $x_1 < x_s(t) < x_2$; a equação (II.65).

$$N(t) = \int_{x_1}^{x_2} k(x, t) dx \quad (\text{II.65})$$

Esta integral está ainda bem definida, mesmo se $k(x, t)$ tem uma descontinuidade em salto, como na Figura II.50.

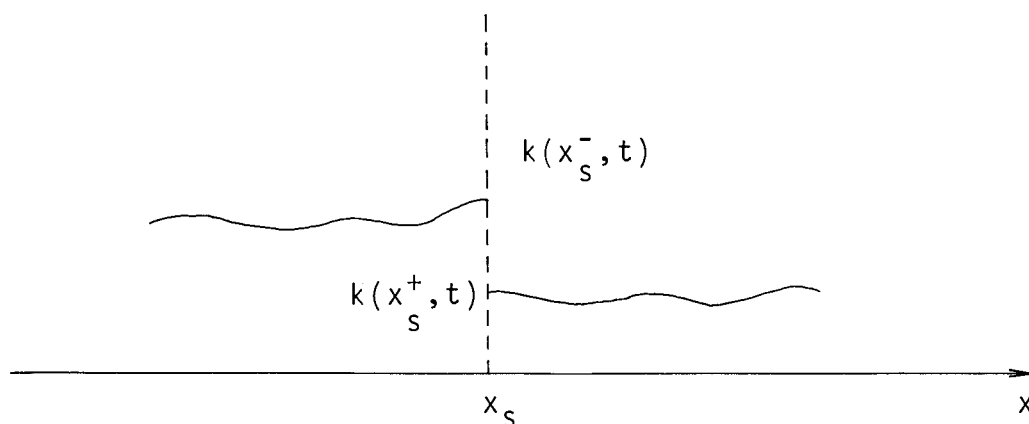


Figura II.50 - Descontinuidade em salto; os limites existem em ambos os lados.

Como x_s depende de t , vamos considerar que os dois pontos extremos se movam.

Vamos considerar a variação do número de carros entre esses extremos $x = x_1(t)$ e $x = x_2(t)$

$$\frac{dN(t)}{dt} = \frac{d}{dt} \int_{x_1(t)}^{x_2(t)} k(x, t) dx \quad (\text{II.66})$$

A variação do número de carros \bar{e} é devida somente aos carros que cruzam os extremos $x = x_1$ e $x = x_2$.

Visto que o extremo esquerdo $x = x_1$ não é fixo, movendo-se com velocidade $\frac{dx_1}{dt}$, o número de carros que cruzam esta fronteira móvel na unidade de tempo é

$$k(x_1, t) \left[u(x_1, t) - \frac{dx_1}{dt} \right] = q(x_1, t) - k(x_1, t) \frac{dx_1}{dt}$$

Note que se a fronteira se deslocar com velocidade igual \bar{a} dos carros, então nenhum carro a cruzará.

Expressão semelhante pode ser escrita para o número de carros que cruzam a fronteira móvel $x = x_2$ na unidade de tempo

$$k(x_2, t) \left[u(x_2, t) - \frac{dx_2}{dt} \right] = q(x_2, t) - k(x_2, t) \frac{dx_2}{dt}$$

Dessas expressões obtem-se

$$\frac{d}{dt} \int_{x_1(t)}^{x_2(t)} k(x, t) dx = q(x_1, t) - k(x_1, t) \frac{dx_1}{dt} - \left[q(x_2, t) - k(x_2, t) \frac{dx_2}{dt} \right]$$

Suponha que a descontinuidade em salto, a qual será denominada "onda de choque" ou simplesmente "choque", ocorra em $x_s(t)$, denominada de "posição do choque".

Consideremos que as extremidades (fronteiras) da região se movimentem exatamente com a mesma velocidade do "choque" (uma de cada lado), como se estivessem ligadas rigidamente.

Se tornarmos, nessas condições, a distância entre as fronteiras x_1 e x_2 infinitesimal, então nenhum carro estará contido em $x_1 \leq x \leq x_2$, logo

$$\int_{x_1}^{x_2} k \, dx = 0$$

e em consequência

$$q(x_1, t) - k(x_1, t) \frac{dx_1}{dt} - \left[q(x_2, t) - k(x_2, t) \frac{dx_2}{dt} \right] = 0 \quad (\text{II.67})$$

Como ambas as extremidades se movem com a "velocidade do choque", teremos

$$\frac{dx_1}{dt} = \frac{dx_2}{dt} = \frac{dx_s}{dt}$$

O fluxo de tráfego, em relação ao choque móvel, é o mesmo em ambos os lados do choque.

Resolvendo a equação (II.67) para a velocidade de choque, temos

$$\frac{dx_s}{dt} = \frac{q(x_1, t) - q(x_2, t)}{k(x_1, t) - k(x_2, t)} \quad (\text{II.68})$$

Como estamos considerando uma condição de choque, então, por definição, o denominador de (II.68) é não nulo.

Um salto na concentração será simbolizado por $[k]$ e um salto no fluxo por $[q]$, logo

$$[k] = k(x_1, t) - k(x_2, t)$$

ou de forma equivalente, chamando

$$x_1 = x_s^- \quad \text{e} \quad x_2 = x_s^+$$

$$[k] = k(x_s^-, t) - k(x_s^+, t) \quad (\text{II.69})$$

Da mesma forma, para o fluxo

$$[q] = q(x_s^-, t) - q(x_s^+, t) \quad (\text{II.70})$$

Assim, podemos escrever a "velocidade do choque" na forma

$$\frac{dx_s}{dt} = \frac{[q]}{[k]} \quad (\text{II.71})$$

Se de um lado do choque a concentração for k_1 e do outro lado k_2 , podemos escrever

$$\frac{dx_s}{dt} = \frac{k_2 u(k_2) - k_1 u(k_1)}{k_2 - k_1} \quad (\text{II.72})$$

Então, nos pontos de descontinuidade, a condição de choque substitui o uso da equação diferencial parcial, a qual continua válida nos outros casos.

Note-se que ainda não descobrimos onde os choques ocorrem e como determinar k_1 e k_2 .

Vejamos outra maneira de obter a condição de choque.

Imaginemos dois observadores fixos em $x = x_1$ e $x = x_2$. Neste caso a conservação de carros implica que

$$\frac{d}{dt} \int_{x_1}^{x_2} k \, dx = q(x_1, t) - q(x_2, t)$$

Suponha que ocorra uma descontinuidade entre x_1 e x_2 .

Vamos dividir a integral em duas partes

$$\int_{x_1}^{x_2} k \, dx = \int_{x_1}^{x_s} k \, dx + \int_{x_s}^{x_2} k \, dx$$

Agora em cada integral o integrando é contínuo.

Note-se entretanto que os limites de integração das duas integrais são funções do tempo, pois $x_s = x_s(t)$.

Neste caso, como lembrete, a derivação de uma integral deste tipo é feito como segue

$$\frac{d}{dt} \int_{\alpha(t)}^{\beta(t)} f(x,t) \, dx = \frac{d\beta}{dt} f(\beta,t) - \frac{d\alpha}{dt} f(\alpha,t) + \int_{\alpha(t)}^{\beta(t)} \frac{\partial f(x,t)}{\partial t} \, dx$$

Esta fórmula não é válida se $f(x,t)$ tem uma descontinuidade em salto entre os limites de integração.

Aplicando ao nosso caso

$$\frac{d}{dt} \int_{x_1}^{x_s} k \, dx = \frac{dx_s}{dt} k(x_s^-, t) + \int_{x_1}^{x_s} \frac{\partial k}{\partial t} \, dx$$

$$\frac{d}{dt} \int_{x_s}^{x_2} k \, dx = - \frac{dx_s}{dt} k(x_s^+, t) + \int_{x_s}^{x_2} \frac{\partial k}{\partial t} \, dx$$

teremos então

$$[k] \frac{dx_s}{dt} + \int_{x_1}^{x_s} \frac{\partial k}{\partial t} dx + \int_{x_s}^{x_2} \frac{\partial k}{\partial t} dx = q(x_1, t) - q(x_2, t) \quad (\text{II.73})$$

Esta fórmula (II.73) é válida para todo tempo.

Se $x = x_1$ está infinitamente perto do choque, se $x = x_s$ e $x = x_2$ estão infinitamente perto do choque, ao mesmo tempo, então ambas as integrais na equação (II.73) vão para zero

Assim teremos, como em (II.71)

$$\frac{dx_s}{dt} = \frac{[q]}{[k]}$$

Esta velocidade de choque pode ser determinada graficamente.

Suponha que ocorra um choque entre as concentrações k_1 e k_2 mostradas na Figura II.51.

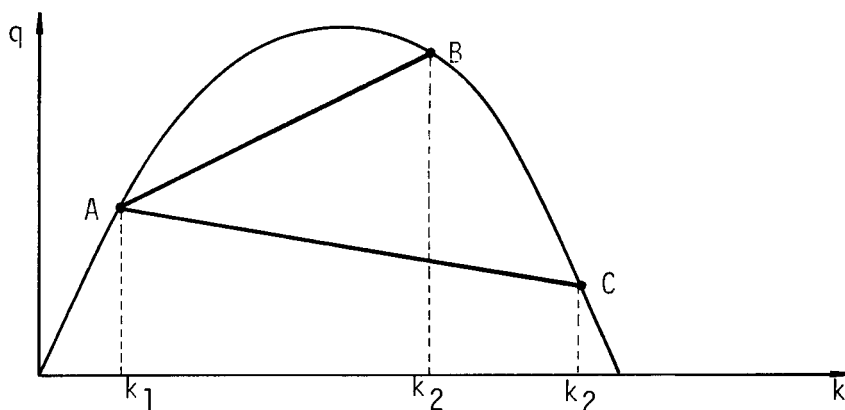


Figura II.51 - \overline{AB} e \overline{AC} fornecem a velocidade do choque

A velocidade do choque \bar{e} é dada pela equação(II.71).

Note que as inclinações das retas \overline{AB} e \overline{AC} têm exatamente o valor da velocidade do choque, Figura II.51.

CAPÍTULO IIICONTRÔLE DE TRÁFEGO E SEGURANÇAIII.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Pesquisadores, estudando o comportamento do fluxo em função da concentração, para diversas rodovias, obtiveram conjuntos de pontos no plano $q \times k$, onde q = fluxo e k = concentração. A partir destes pontos, para dar tratamento analítico ao problema, procuraram ajustar curvas. Estas curvas variam de rodovia para rodovia e até em uma mesma rodovia, sob influências diversas.

Expressões analíticas foram buscadas para representar as curvas obtidas. Destas, as mais conhecidas são as obtidas por Greenshields¹⁰ e Greenberg¹¹.

A de Greenshields¹⁰ apresenta grande facilidade para o tratamento analítico. A de Greenberg¹¹ é inteiramente baseada na teoria hidrodinâmica do fluxo de tráfego, apresentando maior dificuldade no tratamento analítico.

Devido à variação das curvas, o uso das expressões analíticas em um sistema de controle de tráfego apresentaria sérias dificuldades.

Entretanto, o tratamento analítico feito por vários pesquisadores, dentre os quais citamos no capítulo II, Lighthill-Whittam³, Paul I. Richards⁴ e Richard Haberman⁵, põs em evidência um grande número de características comuns a todas.

Foi nessas características que procuramos assentar as bases da estratégia de controle aqui apresentada.

III.2 - OBJETIVO E JUSTIFICATIVA

Nossa atenção está voltada para as condições de tráfego intenso, principalmente quando a demanda se torna maior ou igual à capacidade da rodovia.

Quanto ao tipo de rodovia, voltamos nossa atenção para as vias expressas e túneis, situados em regiões urbanas.

As considerações aqui apresentadas para controle de tráfego neste tipo de rodovia, resultam de observações feitas nos túneis e vias elevadas da cidade do Rio de Janeiro.

Denominaremos "capacidade plena" (C_p), a capacidade mantida, em uma via expressa ou túnel, durante pelo menos uma hora, com ocorrências frequentes, sob as mesmas condições físicas, e que represente o fluxo máximo de tráfego registrado sem obstáculos na via.

Consideremos uma rodovia operando sob condições de fluxo próximas de sua capacidade plena. Se, nessa situação, surgir um obstáculo na rodovia, que reduza a capacidade local a um valor abaixo do fluxo que existia, progressivamente, em toda a extensão da rodovia, o fluxo assumirá um valor não maior que o representado por esta capacidade local (estrangulamento ou gargalo).

Assim a capacidade da rodovia se tornará igual à da seção onde se encontra a obstrução.

Dessa forma, a cada momento, a capacidade de uma rodovia é dada pela seção de menor capacidade.

Neste ponto, vamos introduzir o conceito de "*Transferência*" de veículos de um extremo ao outro de qualquer trecho da rodovia.

Denominaremos *transferência* de veículos entre dois pontos quaisquer de uma rodovia, ao número de veículos que passaram de um ponto ao outro, ao fim de um intervalo de tempo T , independente do comportamento do fluxo entre esses dois pontos durante o intervalo de tempo T .

Veremos mais adiante que, para maximizar a *transferência*, às vezes necessitamos anular, parcial ou totalmente, o fluxo, durante pequenos intervalos de tempo. Isto deixa claro a diferença entre *transferência* e fluxo.

Ao buscarmos maximização da transferência consideramos a possibilidade de modificar o *perfil de capacidades*, pela remoção de obstruções, durante o período considerado. Otimizar a transferência exige, por vezes, sacrificar o fluxo momentaneamente para permitir melhorar o perfil de capacidades da rodovia.

O sistema de controle de tráfego que buscamos, procura maximizar a transferência, visto que sua operação assume a maior importância quando a demanda apresenta valores elevados.

Quando a demanda se torna comparável à capacidade plena da rodovia, qualquer perda na transferência se torna irre recuperável, enquanto perdurar essa condição de demanda.

Se é possível transferir um número máximo N de veículos em um tempo T , sob condições de capacidade plena, então, qualquer perturbação que reduza momentaneamente essa transferência, implicará em um aumento do tempo T para transferir os N veículos.

Introduziremos agora o conceito de "*capacidade média efetiva*", que será definido mais adiante.

Denominaremos "*capacidade média efetiva*" (\bar{C}_{ef}), ao valor médio disponível de capacidade durante um dado intervalo de tempo. $0 \leq \bar{C}_{ef} \leq C_p$.

Esse conceito assume importância quando tratamos com tráfego intenso.

Buscaremos então máxima transferência, qualquer que seja o intervalo de tempo, escolhido arbitrariamente.

Para isso devemos manipular dois elementos: a persistência da capacidade média efetiva e o fluxo de tráfego.

A transferência será tanto maior quanto mais a capacidade média efetiva se aproxime da capacidade plena e o fluxo se aproxime do fluxo máximo relativo àquela capacidade média efetiva.

Para tráfego pesado, o fluxo varia de acordo com as variações da capacidade média efetiva e com o comportamento dos motoristas no rastreamento¹ do veículo à frente.

Observamos nos túneis que a capacidade média efetiva varia também com o desnível do iluminamento, isto é, a forte variação de luz é uma perturbação.

Consideremos uma situação em que a demanda seja maior ou igual que a capacidade plena da rodovia.

Seja C_p a capacidade plena de um trecho uniforme.

Se fosse possível manter estável esse escoamento, teríamos, ao fim de um intervalo de tempo T , transferido de um extremo ao outro do trecho considerado, um número máximo N , de veículos, dado por

$$N = C_p T \quad (\text{III.1})$$

Seja $0 \leq C_{ef} \leq C_p$ a *capacidade efetiva do trecho*, determinada por um obstáculo, isto é, C_{ef} é a capacidade do gargalo (ou estrangulamento).

Suponhamos que esta condição permaneceu durante um intervalo de tempo τ , contido no intervalo de tempo T .

Nessa situação, deixariam de ser transferidos, de um extremo ao outro do trecho, no mínimo, um número ΔN de veículos, durante o intervalo de tempo τ , dado por

$$\Delta N = (C_p - C_{ef})\tau \quad (\text{III.2})$$

Devido a essa perturbação, o tempo necessário à transferência dos N veículos, será agora T^* ; onde $T^* > T$.

Suponha, para facilidade de raciocínio, que esses ΔN veículos ficassem aguardando em um estacionamento, situado no início do trecho, e só entrassem na rodovia no exato instante em que terminasse o intervalo de tempo T .

Os ΔN veículos procurariam se distribuir igualmente em todas as faixas e assim levariam para atravessar o trecho um tempo ΔT , dado por

$$\Delta T = \frac{\Delta N}{C_p} \quad (\text{III.3})$$

Identificamos ΔT como o retardo introduzido pela perturbação na transferência dos N veículos. Logo, devido a essa perturbação, o tempo de transferência dos N veículos passou a ser

$$T^* = T + \Delta T \quad (\text{III.4})$$

Se, durante a transferência dos N veículos, ocorrerem m perturbações, cada uma com duração τ_i e reduzindo a capacidade efetiva a um valor C_{ef_i} , então, durante o intervalo de tempo T , deixarão de ser transferidos, no trecho,

$$\sum_{i=1}^m \Delta N_i = \sum_{i=1}^m (C_p - C_{ef_i}) \tau_i = \sum_{i=1}^m C_p \tau_i - \sum_{i=1}^m C_{ef_i} \tau_i \quad (\text{III.5})$$

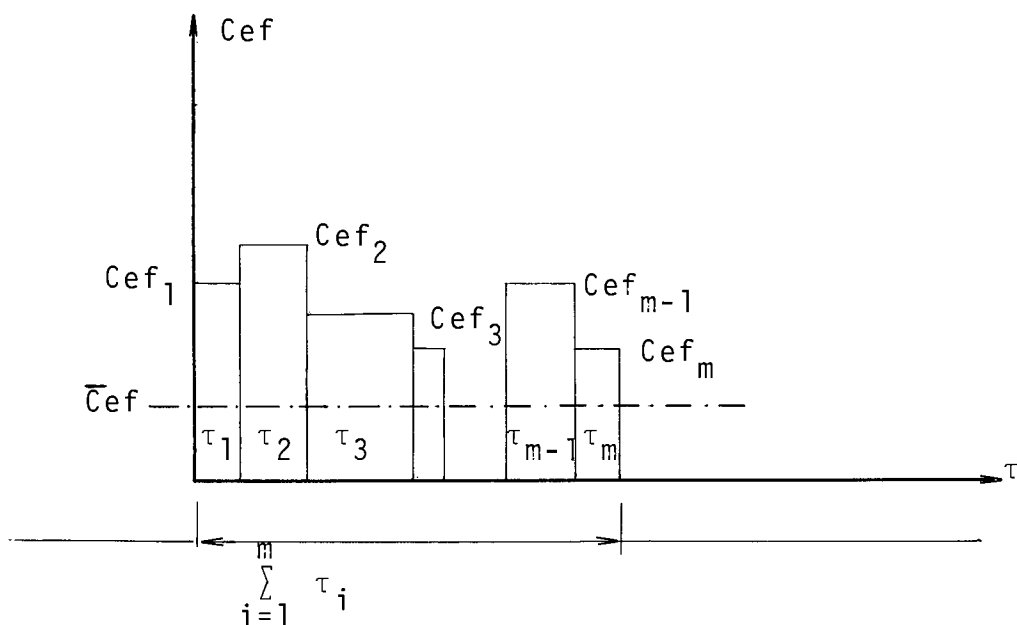


Fig. III.1 - Diagrama mostrando a "capacidade média efetiva", onde Cef_i são as capacidades dos gargalos.

Definimos como "capacidade média efetiva"

$$\bar{Cef} = \frac{\sum_{i=1}^m Cef_i \tau_i}{\sum_{i=1}^m \tau_i} \quad (\text{III.6})$$

Desenvolvendo (III.5) e considerando (III.6)

$$\sum_{i=1}^m \Delta N_i = C_p \sum_{i=1}^m \tau_i - \frac{\sum_{i=1}^m Cef_i \tau_i}{\sum_{i=1}^m \tau_i} \cdot \sum_{i=1}^m \tau_i$$

$$\sum_{i=1}^m \Delta N_i = (C_p - \bar{Cef}) \sum_{i=1}^m \tau_i \quad (\text{III.7})$$

O valor de ΔT para as m perturbações será

$$\Delta T = \frac{\sum_{i=1}^m \Delta N_i}{C_p} \quad (\text{III.8})$$

Levando (III.7) em (III.8) e desenvolvendo

$$\Delta T = \frac{(C_p - \bar{C}_{ef}) \sum_{i=1}^m \tau_i}{C_p} = \left(1 - \frac{\bar{C}_{ef}}{C_p}\right) \sum_{i=1}^m \tau_i$$

Fazendo

$$\sum_{i=1}^m \tau_i = \zeta$$

$$\Delta T = \left(1 - \frac{\bar{C}_{ef}}{C_p}\right) \zeta \quad (\text{III.9})$$

Onde ζ é o tempo total de presença das perturbações durante a transferência dos N veículos, o que equivale dizer durante o intervalo de tempo T^* .

Manipulando (III.9) vem

$$\Delta T = \zeta - \frac{\bar{C}_{ef}}{C_p} \zeta$$

$$\zeta - \Delta T = \frac{\bar{C}_{ef}}{C_p} \zeta$$

$$\bar{C}_{ef} = \frac{\zeta - \Delta T}{\zeta} C_p$$

$$\bar{C}_{ef} = \left(1 - \frac{\Delta T}{\zeta}\right) C_p \quad (\text{III.10})$$

Note que, se a perturbação ocasionar uma obstrução total no trecho, teremos $\bar{C}_{ef} = 0$ e em consequência, como $C_p > 0$,

$$1 - \frac{\Delta T}{\zeta} = 0$$

$$\Delta T = \zeta$$

Isto é, no caso de obstrução total, o retardo introduzido pela perturbação na transferência dos N veículos será igual ao tempo de permanência da obstrução total; para as condições de demanda considerada inicialmente.

Se fizermos um levantamento estatístico do número de obstruções ocorridas em uma rodovia, obteremos um certo valor médio de obstruções por quilômetro da via, em um intervalo de tempo fixado.

Assim vemos que o número de obstruções em uma rodovia é uma função de seu comprimento e do tempo; além das condições do tráfego.

Se imaginarmos, por extremo, uma via bastante longa, poderíamos chegar à condição particular em que, durante o intervalo de tempo T^* , os τ_i se sucedessem ininterruptamente e sem simultaneidade. Assim, teríamos, ao fim de T^* ,

$$\sum_{i=1}^m \tau_i = \zeta = T^*$$

De (III.4) e (III.9) tiramos

$$T^* = T + \left(1 - \frac{\bar{C}_{ef}}{C_p}\right) \zeta \quad (\text{III.11})$$

Impondo a condição $\zeta = T^*$ em (III.11):

$$\zeta = T + \left(1 - \frac{\bar{C}_{ef}}{C_p}\right) \zeta$$

Desenvolvendo

$$T = \frac{\bar{C}_{ef}}{C_p} \cdot \zeta$$

$$T \cdot C_p = \bar{C}_{ef} \cdot \zeta$$

Considerando (III.1)

$$N = \bar{C}_{ef} \cdot \zeta$$

Logo, como $T^* = \zeta$,

$$\bar{C}_{ef} = \frac{N}{T^*} \quad (\text{III.12})$$

Assim, uma via bastante longa teria chance de estar, nas condições de demanda consideradas, permanentemente com sua capacidade média efetiva menor que sua capacidade plena.

Da mesma forma que as obstruções por acidentes ou defeitos, as perturbações devidas ao próprio comportamento dos veículos também concorrem para a redução de \bar{C}_{ef} .

Vejamos agora o caso mais frequente, quando a rodovia sofre obstruções descontinuadas,

Seja

$$T^* = \alpha \zeta, \text{ onde } \alpha \geq 1$$

De (III.11) podemos escrever

$$\alpha \zeta = T + \zeta - \frac{\bar{C}_{ef}}{C_p} \cdot \zeta$$

$$\frac{\bar{C}_{ef}}{C_p} \zeta = T - \alpha \zeta + \zeta$$

$$\bar{C}_{ef} \cdot \zeta = C_p T - (\alpha - 1) \zeta C_p$$

Considerando (III.1)

$$\bar{C}_{ef} \zeta = N - (\alpha - 1)\zeta \cdot C_p$$

$$\bar{C}_{ef} = \frac{N}{\zeta} - (\alpha - 1)C_p \quad (III.13)$$

$$\text{Substituindo } \alpha = \frac{T^*}{\zeta}$$

$$\bar{C}_{ef} \cdot \zeta = N - \left(\frac{T^*}{\zeta} - 1\right)\zeta C_p$$

$$\bar{C}_{ef} \cdot \zeta = N - (T^* - \zeta)C_p$$

$$\bar{C}_{ef} \cdot \zeta + (T^* - \zeta)C_p = N \quad (III.14)$$

Da expressão (III.14) vemos claramente que \bar{C}_{ef} , da do por (III.13) é a capacidade média efetiva durante o intervalo de tempo ζ . Fora deste intervalo de tempo temos a capacidade plena.

No caso de perturbações simultâneas, tomamos a menor C_{ef_i} .

A "capacidade média da rodovia" durante o intervalo de tempo T^* , que chamaremos $\bar{C} = \frac{N}{T^*}$, será, considerando

(III.14)

$$\bar{C} = \frac{\bar{C}_{ef} \cdot \zeta + (T^* - \zeta) C_p}{T^*} = \frac{T^* C_p - (C_p - \bar{C}_{ef}) \zeta}{T^*} \quad \text{logo}$$

$$\bar{C} = C_p - (C_p - \bar{C}_{ef}) \frac{\zeta}{T^*} \quad (\text{III.15})$$

Note que no caso tratado, quando $\zeta = T^*$, a capacidade média coincide com a capacidade média efetiva, isto é, fazendo $\zeta = T^*$ em (III.15),

$$\bar{C} = \bar{C}_{ef}$$

Vemos de (III.15) que, quando há perturbações, tu do se passa como se a capacidade da rodovia fosse \bar{C} e não C_p ; quando se analisa transferência.

Observando a equação (III.15), verifica-se que, um sistema de controle que reduza ζ , agindo sobre cada τ_i , aumentará o valor de \bar{C} , que é o que se deseja.

Note que as ondas de choque de propagação negativa e o comportamento tipo "*para-anda*", reduzem a capacidade ao longo de sua trajetória, funcionando como obstruções que precisam ser removidas.

Sua eliminação é feita de forma similar à remoção das obstruções fixas, mas somente pelo controle da concentração de veículos.

Vamos examinar o intervalo de tempo τ , de permanência de uma obstrução fixa.

Entre o instante em que ocorreu a obstrução e o instante em que esta foi completamente removida, identificamos três fontes de retardo.

- 1 - retardo no tempo transcorrido entre o acontecimento e seu conhecimento pela equipe encarregada de removê-lo;
- 2 - retardo introduzido no tempo de deslocamento do equipamento de desobstrução, pelo aumento da concentração de veículos a montante do local obstruído; e
- 3 - mesmo que se controle a concentração de veículos, ainda haverá um retardo devido à incorreta distribuição dos veículos; que formarão uma fila momentânea à frente do equipamento de desobstrução.

Para redução de τ , propomos que o sistema de controle, fazendo uso dos resultados da teoria do fluxo de tráfego, tratada no capítulo II, para cada um dos itens acima, atue, respectivamente:

- 1 - sob condições de tráfego intenso, uma redução da capacidade efetiva (C_{ef}), devido a acidente ou defeito (estrangulamento), produzirá um aumento na concentração de tráfego a montante do local obstruído. Este aumento será inicialmente sen

tido na faixa obstruída e posteriormente se propagará às outras faixas.

Um sistema de controle, suficientemente rápido, detectaria o evento no seu início e informaria a um centro de controle, ou atuaria, em alguns casos, automaticamente.

Assim minimizaríamos o tempo de conhecimento da ocorrência.

- 2 - O aumento da concentração, provocado pela obstrução, reduzirá a velocidade dos veículos a montante do local obstruído. Assim o equipamento de desobstrução se deslocará mais lentamente.

Para evitar isso, o sistema de controle deve limitar o fluxo, a montante do local obstruindo, ao valor da capacidade efetiva no trecho.

Em termos de controle,¹⁹ isso significa que a capacidade é uma variável de estado do sistema e que, se observável, podemos fazer uma realimentação de estado para controlar o fluxo. O fluxo então estará sujeito à lei de controle estabelecida.

- 3 - Sendo o fluxo um vetor, a perturbação poderá agir também sobre sua direção. Devemos portanto exercer controle também sobre ela.

Verificamos frequentemente que é possível aumentar o módulo do fluxo se estabelecermos uma direção adequada.

A partir do momento em que o sistema de controle, por realimentação,¹⁹ limitou o módulo do fluxo ao valor da capacidade efetiva no trecho obstruído, podemos considerar que, a montante deste trecho, a capacidade efetiva seja igual a dele.

Assim, o sistema de controle poderá agir sobre a direção do fluxo, conduzindo todos os veículos para as faixas não obstruídas, sem reduções adicionais no fluxo.

Procedendo desta forma, teremos criado uma "faixa exclusiva momentânea", FEM, utilizando a própria faixa obstruída, que em nada contribui para a capacidade efetiva, possibilitando o deslocamento do equipamento de desobstrução em tempo mínimo, por esta faixa.

Isso é de extrema importância nos casos de acidentes com vítimas ou incêndios no interior de túneis.

A FEM pode ser gerada graças à faixa de valores que, na maioria dos casos, assume a relação entre o espaçamento na velocidade ótima ($\epsilon_{ot} = 1/k_{ot}$) e o espaçamento na velocidade zero ($\epsilon_j = 1/k_j \cong$ comprimento de um veículo), isto é:

$$\frac{\epsilon_{ot}}{\epsilon_j} = \frac{k_j}{k_{ot}} = \frac{1}{\eta_{ot}} = \lambda$$

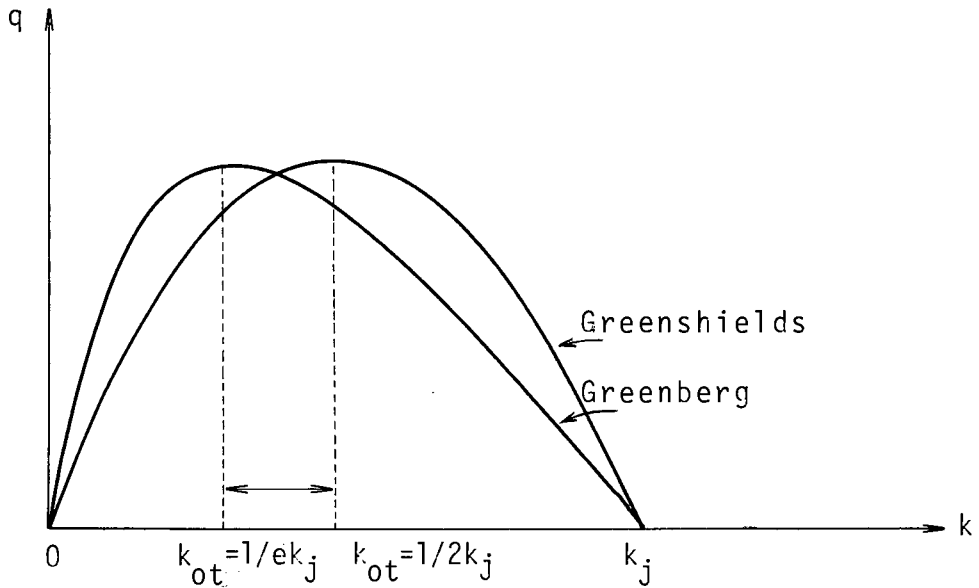


Fig. III.2 - Esbôço das curvas $q \times k$ estabelecidas por Greenshield¹⁰ e Greenberg¹¹.

Os valores de λ mais frequentemente encontrados, se situam na faixa de valores $2 \leq \lambda \leq e$, onde e é a base neperiana.

Assim, ao interrompermos o tráfego, simultaneamente, em várias posições da via, quando este estiver com fluxo máximo, a fila de veículos parados entre dois sinais ocupará, no máximo, metade da distância entre eles. Isto permitirá acomodar, nas faixas adjacentes, os veículos que se encontram na faixa obstruída e assim gerar a FEM.

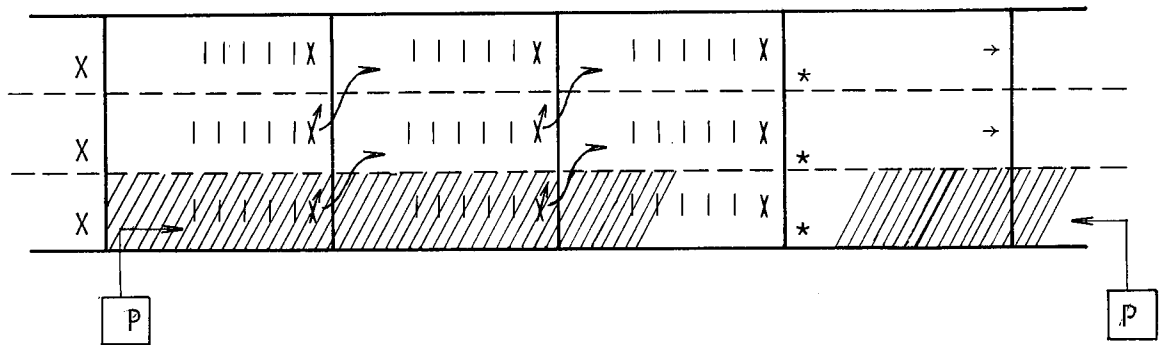


Fig. III.3 - Mesmo na situação mais desfavorável a FEM pode ser gerada pela contração, graças, ao apoio de um circuito fechado de televisão (CCTV).

||||||| = fila de carros parados; // // // // // = FEM;
 [P] = posto de atendimento; * = obstrução.

O objetivo final do sistema de controle é obter o maior fluxo possível nas faixas úteis, aliado a um tempo de desobstrução e atendimento a vítimas mínimo. Isto nos levaria a uma transferência máxima de veículos de um extremo ao outro de qualquer trecho da rodovia.

Será visto adiante que, na busca da transferência máxima, necessitaremos, por vezes, interromper o fluxo parcial ou totalmente; tanto para eliminar obstruções fixas, como para eliminar ondas de choque e comportamento do tipo "para-anda", em tempo mínimo.

Enfim, o que se procura é maximizar o tempo de permanência das condições de fluxo máximo com capacidade plena.

Em uma corrente de tráfego não há uniformidade de comportamento. De um modo geral, os motoristas conduzem seus veículos a velocidades e espaçamentos ditados por sua sensação de segurança. Isto é normalmente decorrente de sua maior ou menor habilidade ao volante.

Assim sendo, não achamos prudente impor velocidades maiores aos motoristas mais lentos, sob pena de o induzirmos a cometer acidentes que resultariam em uma redução da capacidade efetiva, maior e mais demorada, que a representada por sua baixa velocidade.

Normalmente, quando há um veículo lento em uma faixa, os veículos da faixa adjacente procuram ocupar o espaço vazio minimizando assim a perda de capacidade efetiva resultante da ação do veículo lento.

III.3 - ESTRATÉGIA DE CONTRÔLE

Vamos agora estabelecer a estratégia de controle que procurará maximizar a transferência.

A concepção dessa estratégia de controle foi baseada nas observações diárias do comportamento do tráfego nas vias expressas e túneis do Rio de Janeiro, nas experiências relatadas

na bibliografia e nas teorias do fluxo de tráfego e sistemas de controle.

Para realizar o que se propõe, o sistema deverá ser capaz de:

- detectar perturbações na corrente de tráfego, em pontos discretos da rodovia;
- identificar a faixa (ou faixas) em que ocorreu a perturbação;
- qualificar, com auxílio de um circuito fechado de televisão, o tipo de perturbação, nos casos de interrupção da corrente de tráfego;
- após qualificar e quantificar o problema, determinar, através de sinalização, o melhor trajeto a ser seguido pelos veículos, objetivando maximizar a transferência e gerar a FEM;
- quando se tratar de onda de choque ou comportamento "para-anda", quantificar as ações de controle sobre a concentração, para otimizá-la;
- na ausência de perturbações, detectar valores de concentração superiores ao ótimo e reduzir seu valor, para prevenir a ocorrência de perturbações, que essa situação gera (ver capítulo II);

- quando no interior de túneis, controlar a taxa de monóxido de carbono (CO), através de uma atuação econômica da ventilação;
- em casos de incêndio no interior de túneis, onde seja usada ventilação longitudinal, controlar a velocidade da fumaça de modo que não atinja os veículos que se afastam e não acelere a combustão;
- após detectar uma anormalidade e aplicar a lei de controle adequada, prosseguir na varredura de todos os pontos de medição (sensores) ao longo da via para detectar possíveis novas anormalidades.

O sistema procura alcançar seu objetivo percorrendo três etapas distintas:

- Detecção da anormalidade e identificação da faixa;
- Qualificação da anormalidade; e
- Seleção e aplicação da lei de controle adequada.

Ao analisarmos, a seguir, essas etapas, devemos ter presente que o sistema fará uso de um ou mais computadores operando "*ligados*" (on line) e em tempo real.

Dependendo do programa utilizado e do comprimento da rodovia, surgirão exigências quanto a velocidade de processamento do computador, tendo em vista as imposições do tempo de

varredura do sistema de controle.

A determinação da configuração do sistema exige profundos conhecimentos de software e hardware

Para rodovias longas, provavelmente, tenderíamos a usar um "*sistema de controle multi-nível*".

Entende-se por "*sistema de controle multi-nível*", aquele que tem, atuando no processo, uma família de controladores dispostos hierarquicamente.

Por disposição hierárquica entende-se que alguns dos controladores não têm acesso direto ao processo controlado, mas comandam outros controladores segundo uma hierarquia⁶.

Observando as etapas de atuação do sistema, verificamos tratar-se de um "*sistema de controle adaptativo*".

Entende-se por "*sistema de controle adaptativo*" aquele que consegue automaticamente uma resposta desejada na presença de grandes variações nos parâmetros do processo.

São usualmente caracterizados por dispositivos que medem automaticamente a dinâmica do processo, conjugados a outros dispositivos que ajustam automaticamente as características do controlador, baseados em uma comparação dessas medidas com alguma figura de mérito ótima⁷.

III.3.1 - Deteccão da Anormalidade e Identificação da Faixa

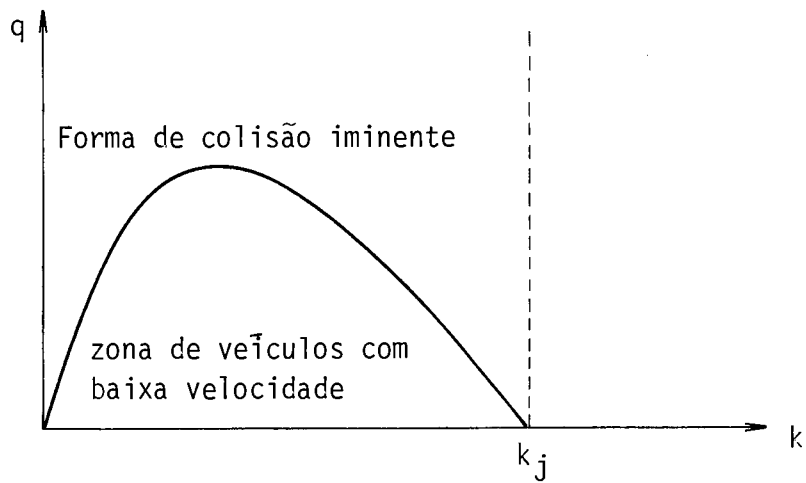


Fig. III.4 - Indica as condições dos veículos fora da curva

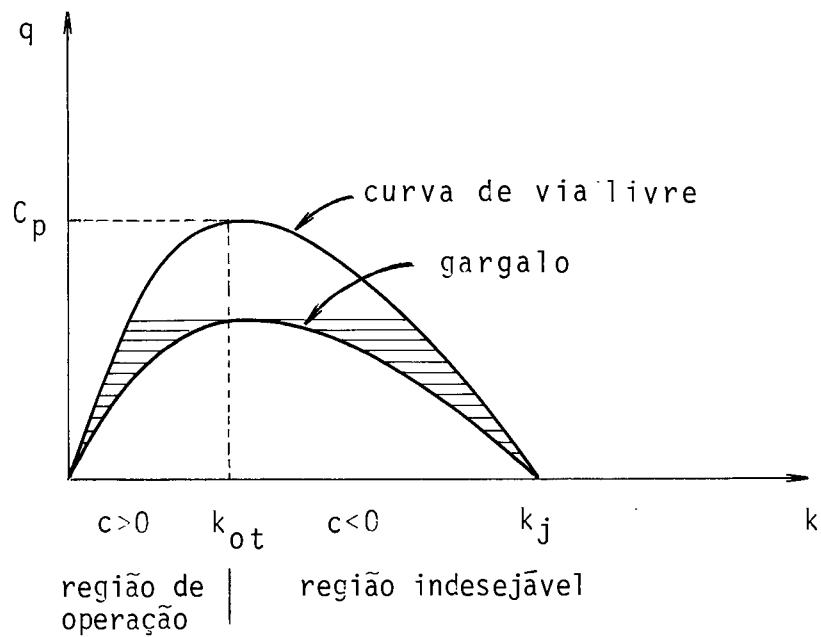


Fig. III.5 - O sistema deve manter o tráfego dentro dos limites da região de operação.

As variações de comportamento da corrente de tráfego surgem sempre como variações na velocidade e na concentração. O mesmo nem sempre ocorre com o fluxo, como mostra a região achurada na figura III.5.

Assim, as melhores indicações de variações no comportamento da corrente de tráfego são dadas pela velocidade e pela concentração.

Usaremos no sistema o valor médio da concentração, obtida através de sensores localizados nas vizinhanças dos sinais de tráfego de cada trecho da rodovia.

Dois valores típicos ficam armazenados na memória do computador e são frequentemente usados pelo sistema: o valor da concentração ótima (k_{ot}) e o valor da concentração máxima (k_j).

Da teoria macroscópica do fluxo de tráfego (ver capítulo II) sabemos que as perturbações na corrente de tráfego propagam-se ao longo da mesma, como uma onda, com velocidade $C = dq/dk$. Os sentidos de propagação dessa onda são mostrados na figura III.5. Para $k = k_{ot}$ a onda permanece estacionária, isto é, $C = 0$.

Para valores de concentração $0 \leq k \leq k_{ot}$, consideramos condições normais da corrente de tráfego e o sistema de controle não interfere; visto que $C \geq 0$ e não há redução no flu-

xo de tráfego, mesmo que o valor de k tenha sido medido durante uma perturbação.

Hã casos esporádicos em que pequenos grupos de veí-
culos (6 veículos já foram registrados) se deslocam a veloci-
dades muito elevadas, guardando insuficiente espaçamento. Isto re-
presenta pontos que se situam na zona de colisão iminente mostra-
da na figura III.4.

Na ocorrência desses casos, o sistema poderia de-
tectar um valor de concentração acima do ótimo, sem que houvesse
problema na corrente de tráfego (*alarme falso*).

Para evitar esse "*alarme falso*", o sistema avalia-
rã o valor de $C = \frac{\delta q / \delta t}{\delta k / \delta t} \doteq \frac{\delta q}{\delta k}$, onde δt é o período de varredura.

Caso o sistema detete $k > k_{ot}$ mas $C_{\delta} \geq 0$, estará havendo "*alarme falso*" e o sistema não interferirá na corrente de tráfego.

A condição para que o sistema interfira é $k > k_{ot}$
e $C_{\delta} < 0$, que define a região indesejável da curva $q \times k$.

Três eventos podem estabelecer essa condição: um
aumento de demanda, um pelotão atrás de carros com velocidade
abaixo da ótima ou uma onda de choque.

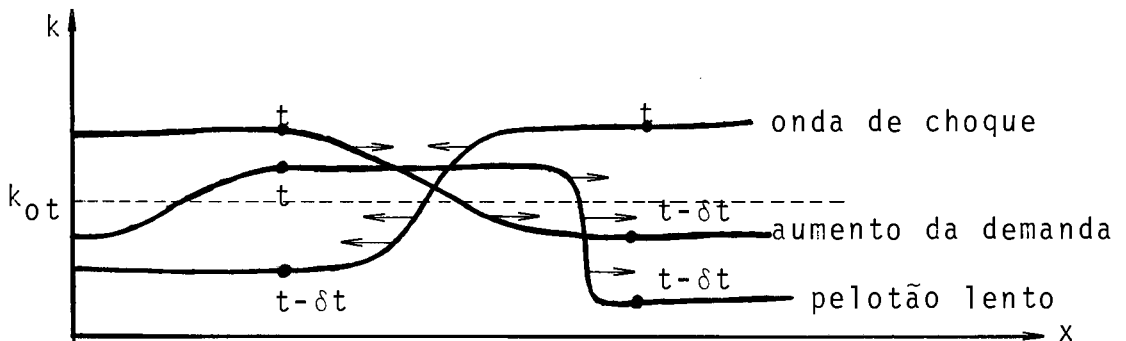


Fig. III.6 - Três perfis de concentrações que acionarão o sistema ao fim do período δt de varredura.

Quando a concentração penetra nesta faixa de valores o fluxo cai e podem ocorrer sucessivas ondas de choques determinando o comportamento típico de "para-anda".

O comportamento indesejável, característico dessa faixa de valores de concentração, é devido à insuficiência de distância entre veículos consecutivos.

Isso ocorre porque cada motorista conduz seu veículo para rastrear o veículo à sua frente (teoria microscópica do fluxo de tráfego¹), ajustando seu espaçamento em função da velocidade do veículo à sua frente e do gradiente da concentração à frente, segundo sua sensação pessoal de segurança. Isto é mostrado esquematicamente no diagrama de bloco da fig. III.7.

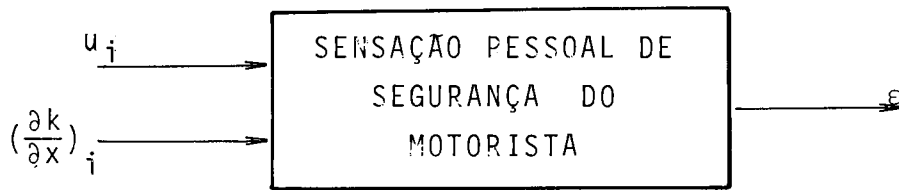


Fig. III.7 - Diagrama de blocos mostrando como o motorista escolhe o espaçamento ϵ .

Quando o gradiente $\bar{\epsilon} \partial k / \partial x \leq 0$ o motorista sente um comportamento estável da corrente de tráfego e adota para espaçamento o valor $\epsilon = 1/k_1$, onde k_1 é o valor na curva $q \times k$ correspondente à velocidade u_1 do veículo à sua frente.

Quando o gradiente $\bar{\epsilon} \partial k / \partial x > 0$ o motorista experiente e atento pressente uma configuração propícia a problemas e adota um espaçamento maior, no qual sinta segurança. Isto é possível quando $k < k_{ot}$ e, no capítulo II, vimos que Richards⁴ mostrou ser finito o tempo de retorno (t_r) da corrente de tráfego às suas condições originais.

Entretanto, quando $k \geq k_{ot}$, isso não é possível e a perturbação se propaga indefinidamente.

Uma outra maneira de ver é a seguinte.

No julgamento de sua segurança, o motorista considera, instintivamente, vários elementos, tais como: gradiente da concentração à sua frente, estado de conservação e umidade da pista, condições de iluminação, oscilações da corrente de tráfego, habilidade do motorista à sua frente, sua própria habilidade, condições mecânicas de seu veículo, etc.

Desses elementos, alguns entram no chamado tempo de reação do conjunto motorista-automóvel.

Para que o motorista possa compensar, parcial ou totalmente, uma perturbação introduzida por um dos veículos à sua frente, é necessário que disponha de uma distância para o veículo à frente, tal que, na velocidade que está, seja maior que a necessária ao tempo de reação do conjunto motorista-automóvel. Se esta distância existe, então os primeiros carros que sucedem o que introduziu a perturbação agirão como um sistema integrador da forma de onda da perturbação e a eliminarão em um tempo finito. Se, ao contrário, a distância não for suficiente para essa filtragem, a perturbação se propagará no sentido contrário ao da corrente de tráfego.

A fronteira entre essas duas situações é exatamente o valor ótimo da concentração (k_{ot}).

Por esses motivos escolhemos o valor k_{ot} como fronteira de ação do sistema de controle.

Na detecção de anormalidade o sistema procederá da seguinte forma:

- armazena na memória o valor da concentração lido na varredura anterior, isto é, o valor $k(t - \delta t)$ naquele sensor;
- lê o valor da concentração, no mesmo sensor, na varredura atual $k(t)$;
- compara os valores $k(t)$ e $k(t - \delta t)$:
 - se $k(t) \leq k(t - \delta t)$, o sistema não interfere;
 - se $k(t) > k(t - \delta t)$, o sistema compara os valores $k(t)$ e k_{ot} ;
 - se $k(t) \leq k_{ot}$, o sistema não interfere;
 - se $k(t) > k_{ot}$, o sistema calcula C_δ :
 - se $C_\delta \geq 0$, o sistema não interfere (alarme falso);
 - se $C_\delta < 0$, o sistema detectou anormalidade, a corrente de tráfego entrou na zona indesejável.

Para melhor entendermos a função de C_δ observemos a figura III.8.

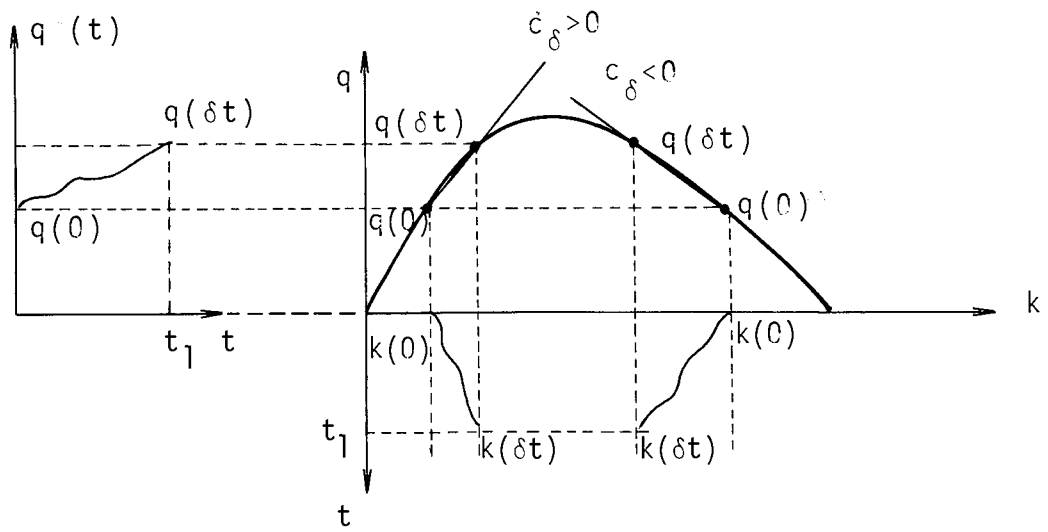


Fig. III.8 - Significado de C_δ e seu sinal

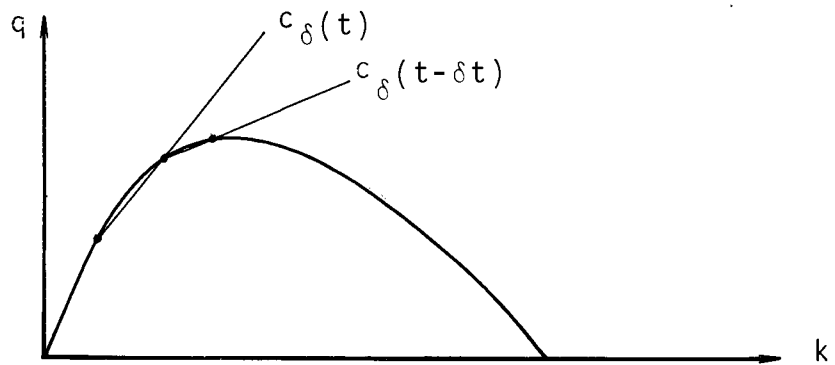


Fig. III.9 - A comparação de valores sucessivos de C_δ pode nos fornecer novos elementos de comportamento, como rapidez de variação do fluxo com $C_\delta(t) - C_\delta(t-\delta t)$.

III.3.2 - Qualificação da Anormalidade

Uma vez que o sistema detetou que a corrente de tráfego penetrou na "zona indesejável", isto é, foi detetado um valor de concentração $k > k_{ot}$ e $C_\delta < Q_0$ o próximo passo será identificar (qualificar) a anormalidade. Só após isto o sistema poderá aplicar a lei de controle adequada.

Em alguns casos o sistema poderá realizar toda a tarefa automaticamente, em outros terá que recorrer a um operador situado no centro de controle observando um circuito fechado de televisão (CCTV).

A introdução do CCTV no sistema tem dois objetivos: o primeiro é responder ao computador do sistema de forma confiável, se se trata de incêndio, acidente, defeito ou uma forte onda de choque, quando este detetar $k \geq k_j$; o segundo é observar ocorrências na rodovia quando a concentração for tão baixa (tráfego leve) que não supere o valor k_{ot} , em consequência da perturbação.

O sistema ao detetar uma anormalidade deve agir sobre o CCTV de modo a apresentar no monitor do centro de controle a imagem correspondente àquela posição.

Por outro lado quando a concentração for muito baixa e o sistema for insensível à ocorrência, o CCTV é o principal elemento de observação da via. Neste caso, ao ocorrer uma anomalia

lidade o operador do CCTV deve ser capaz de chamar a lei de controle adequada e esta ser aplicada automaticamente ao ponto que está sendo observado no momento.

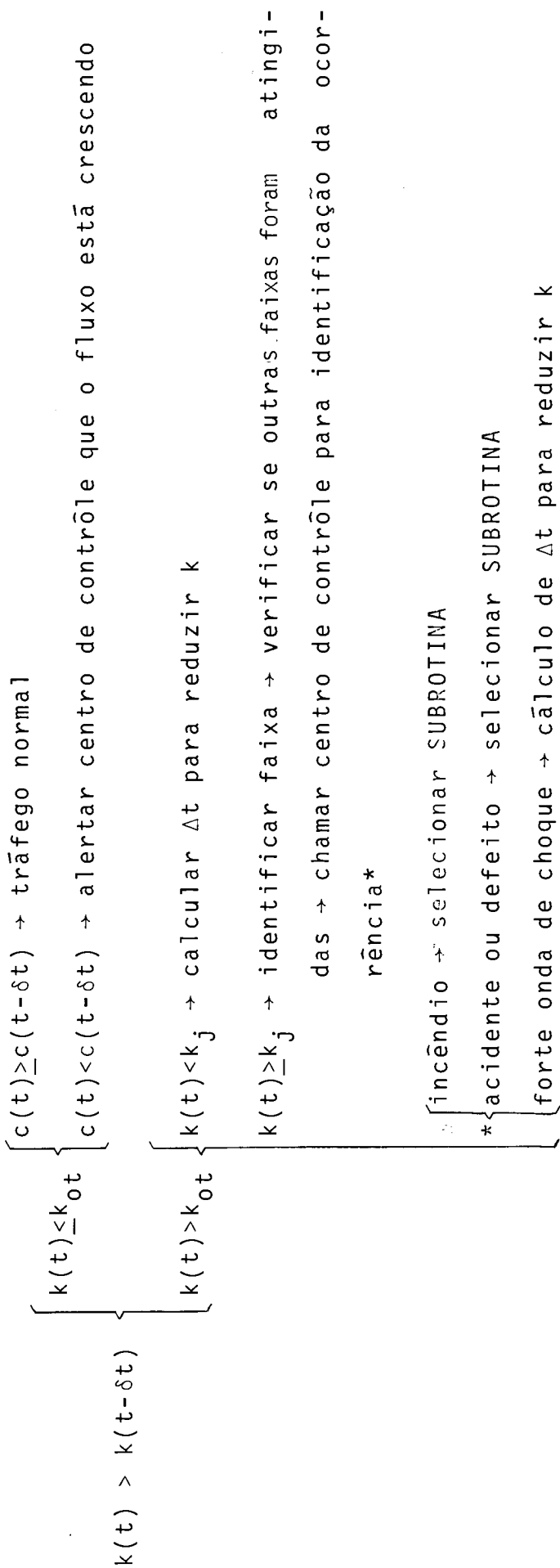
Diremos aqui que o tráfego é "*intenso*" quando for tal que o sistema seja sensível a uma perturbação na via, isto é, quando da perturbação resultar, em um sensor, o registro de $k(t) > k_{ot}$.

Para tráfego intenso a ocorrência será detetada pelo sistema em sua varredura e para tráfego não intenso será detetada pelo operador do CCTV.

O sistema, para tráfego intenso, procederá, em sua varredura, da forma mostrada no esquema abaixo, onde: $k(t-\delta t)$ é a concentração lida no sensor na varredura anterior; $k(t)$ é a concentração lida, no mesmo sensor, na varredura atual; k_{ot} é o valor ótimo da concentração; k_j é um valor prático, ligeiramente menor que a concentração máxima; e $C(t) = \frac{q(t)-q(t-\delta t)}{k(t)-k(t-\delta t)}$

Esquema de detecção e qualificação: (ver página seguinte).

$k(t) \leq k(t-\delta t) \rightarrow$ tráfego normal



Se na varredura ocorrer $k(t-\delta t) > k_{ot}$, isto significa que o sistema está saindo de uma intervenção. Isto não altera o processo.

III.3.3 - Seleção e Aplicação das Leis de Contrôles

Antes de tratarmos da seleção e aplicação das leis de controle adequadas a cada situação, devemos saber quais são estas leis.

As leis de controle a serem aplicadas pelo sistema são:

- (a) Controle da concentração para maximizar a "transferência";
- (b) Controle do trajeto da corrente de tráfego para maximizar a "*transferência*" e gerar a "FEM";
- (c) Controle para limitar a taxa de monóxido de carbono em uma faixa de valores préfixados com mínimo consumo de energia; e
- (d) Controle da velocidade e sentido da fumaça, resultante de incêndio em túnel dotado de ventilação longitudinal.

O processo de seleção dessas leis de controle é que dá caráter "*adaptativo*" ao sistema de controle; conforme foi definido em III.3.

A aplicação dessas leis será feita por sistemas periféricos de controle, que podem ser outros computadores. Este tipo de estrutura caracteriza um sistema "multi-nível" ou "hierarquizado"; conforme foi definido em III.3.

(a) Controle da concentração para maximizar a transferência:

Para o caso particular em que $u(k)$ é linear, Richards⁴ mostrou que o tempo de retorno da densidade à condição normal é uma função da densidade inicial e do tempo de permanência da perturbação.

Mostrou ainda que, para valores da densidade iguais ou maiores que o ótimo, eq. (II.26) do capítulo II, a onda de choque se propagaria indefinidamente, não retornando ao seu ponto de partida.

É sabido que, para valores de densidades maiores que o ótimo, as ondas de choque se propagam no sentido contrário da corrente de tráfego e há ocorrência da situação "para-anda". Isto se reflete no fluxo como um gargalo.

Assim, para maximizar a "transferência" é necessário exercer controle sobre essa situação.

Para minimizar esses efeitos, propomos acelerar a propagação da onda de choque, tanto quando estiver instalada como quando nos anteciparmos a ela, isto é, quando for possível

detetar as condições que levam à sua formação.

Para nos anteciparmos a essa formação devemos ter em vista o que mostrou Richards⁴ e Haberman⁵: uma onda de choque se forma sempre que o gradiente da densidade é positivo ($\frac{\partial \eta}{\partial x} > 0$).

Quando a variação da densidade se iniciar nas proximidades de um sensor, será possível nos anteciparmos à formação da onda de choque; quando se iniciar entre dois sensores consecutivos, ou por uma ocorrência na rodovia, a detetaremos já instalada.

Para acelerarmos a sua propagação e a sua eliminação, vamos interromper a corrente de tráfego em vários pontos ao longo da faixa. Isto equivale a gerar várias ondas de choque ao longo da mesma, a montante da onda original, propagando instantaneamente a onda de choque original até o início da via.

Este mesmo procedimento será adotado no caso de crescimento da demanda além dos limites da capacidade efetiva da via, o que acarreta um valor de densidade superior ao ótimo.

Como o sistema se interferirá na corrente de tráfego quando $k > k_{ot}$, concluímos que se interferirá no caso em que Richards⁴ mostrou que a onda de choque se propagaria indefinidamente. No nosso caso isto significa que a onda de choque se propagaria até o ponto de entrada da rodovia, com velocidade c .

Como nas vizinhanças do valor ótimo a velocidade da onda de densidade é muito pequena, concluimos que um gargalo poderia permanecer na via durante um tempo bastante grande.

Analiseemos o que resulta da interrupção da corrente de tráfego em vários pontos, frente à determinação de Richards⁴ relativa ao tempo de retorno às condições originais da densidade.

Esse tempo de retorno é função da fila de veículos, parados ou em movimento lento, decorrente do tempo de permanência da perturbação. O tempo de permanência da perturbação e a concentração original determinam a extensão da fila.

Ao interrompermos a corrente em vários pontos estamos limitando o comprimento dessa fila, reduzindo portanto o tempo de retorno às condições originais neste trecho.

O tempo de retorno é função também da densidade original, isto é, função do número de veículos por trecho da via.

Para reduzir essa densidade, como não podemos reduzir o número de veículos nem alongar o trecho da via, atuaremos de uma forma que produz resultado equivalente.

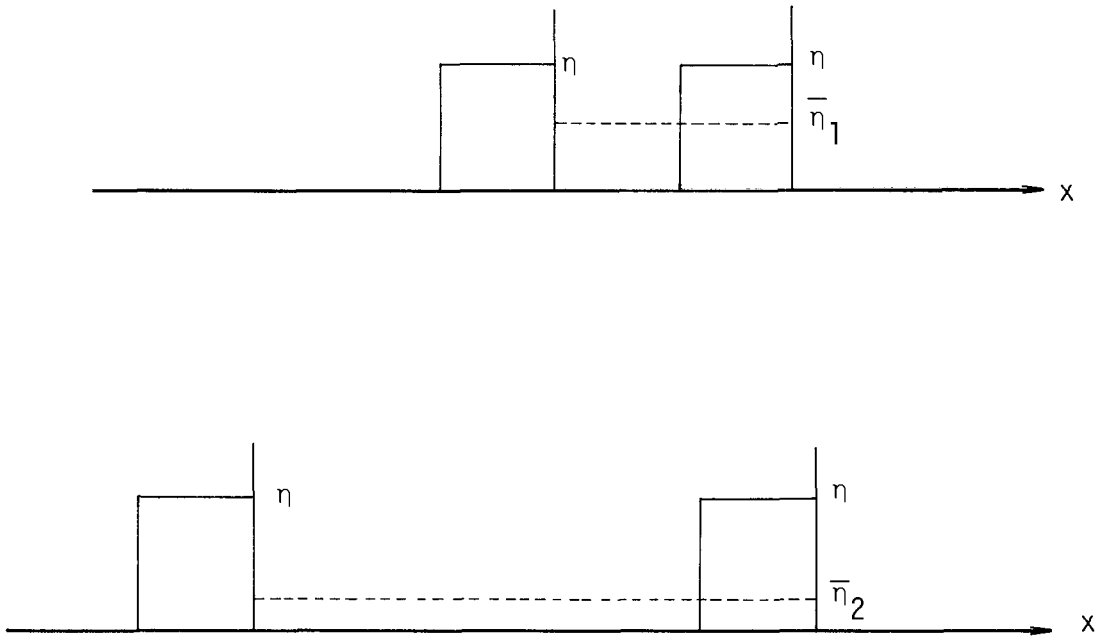


Fig. III.10 - Devido a diferença das distâncias entre os sinais, vemos que, para a mesma fila temos $\eta_2 < \eta_1$

Um procedimento equivalente ao alongamento das distâncias entre sinais seria introduzir um retardo na abertura do sinal de montante, em relação ao instante de abertura do sinal de jusante. Este retardo é calculado em função da densidade original e da que se deseja obter em regime.

Vemos portanto que, interrompendo momentaneamente a corrente de tráfego em vários pontos da faixa, ou faixas, e

liberando as filas sequencialmente, a intervalos prēdeterminados, restabeleceremos as condiçōes de regime ōtimo do fluxo.

Procedimento para reduzir o valor da concentraçō, quando esta, em qualquer posiçō da rodovia, exceder o valor ōtimo.

Sejam:

k_j , a concentraçō máxima;

k , a concentraçō atual medida atravēs de um sensor;

k_{ot} , a concentraçō ōtima para as condiçōes atuais da via;

$\Delta k = k - k_{ot}$, o excesso na concentraçō;

q , o fluxo atual, para a concentraçō k ;

ℓ , distância entre dois sensores consecutivos.

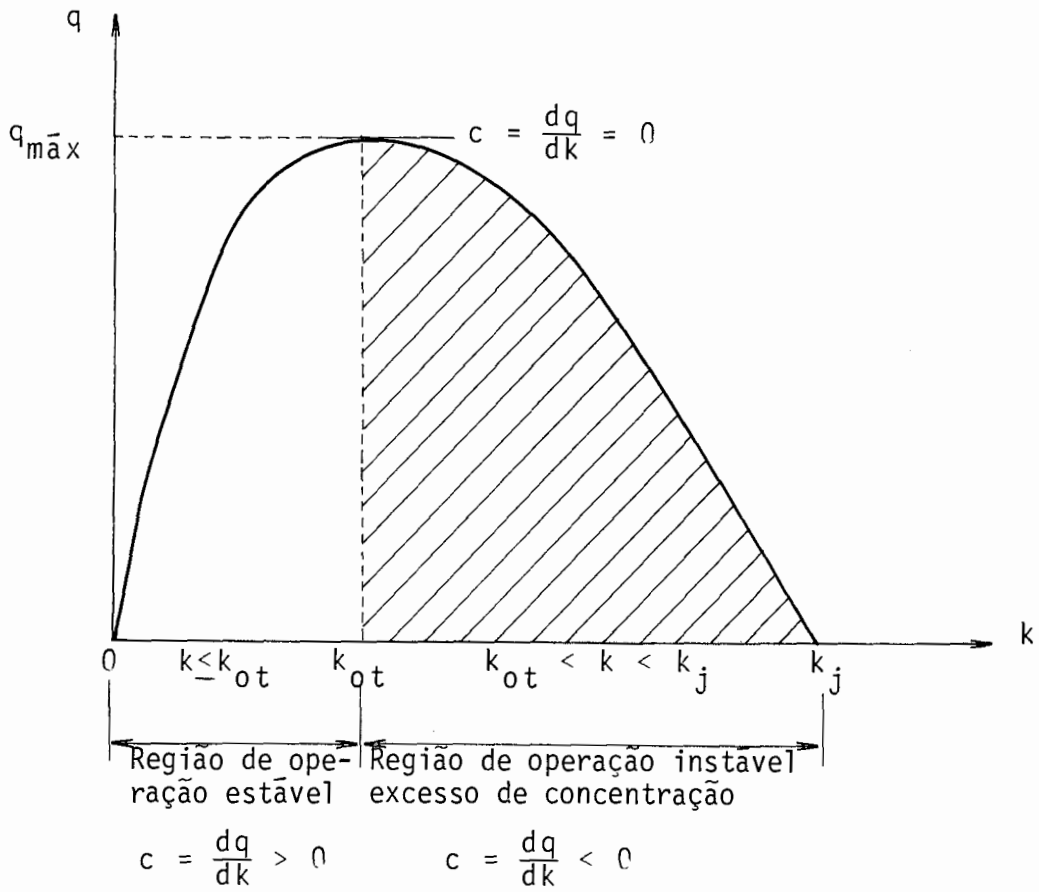


Fig. III.11 - Curva fluxo x concentração

O excesso de concentração, em relação ao valor \bar{k}_{ot} mo, provoca uma queda do fluxo, tornando-o também instável.

A instabilidade verificada (para - anda) decorre da insuficiência de espaçamento médio entre os veículos, anulando a possibilidade do motorista neutralizar os efeitos de uma perturbação que ocorra à sua frente.

Esse comportamento é tratado pela teoria microscópica do fluxo de tráfego e está diretamente ligado ao tempo de reflexo do motorista.

Para eliminar o excesso e restabelecer o valor de concentração ótima, vamos agir sobre o fluxo, procurando fornecer condições no tempo para que ele retorne ao máximo.

Calculemos o excesso de veículos por quilômetro de rodovia:

$$\Delta k = k - k_{ot} \quad (\text{III.16})$$

O excesso de veículos por metro será:

$$\delta k = \frac{\Delta k}{1000} \quad (\text{III.17})$$

O excesso entre dois sensores, distantes entre si ℓ metros, será:

$$n = \ell \cdot \delta k$$

Substituindo δk por seu valor em (III.17)

$$n = \frac{\Delta k}{1000} \cdot \ell \quad (\text{III.18})$$

Com um fluxo de $q_{\text{máx}}$ veículos por hora, n veículos ultrapassariam um ponto da via em Δt segundos, dados por:

$$q_{\bar{m}ax} \text{ ve\u00edculos/hora} = \frac{q_{\bar{m}ax}}{3.600} \text{ ve\u00edculos/segundo}$$

Logo,

$$\frac{q_{\bar{m}ax}}{3.600} = \frac{n}{\Delta t}$$

donde tiramos

$$\Delta t = 3.600 \frac{n}{q_{\bar{m}ax}} \quad (\text{III.19})$$

Substituindo n por sua express\u00e3o em (III.18):

$$t = \frac{3.600}{1.000} \cdot \frac{\ell \cdot \Delta k}{q_{\bar{m}ax}}$$

e finalmente

$$\Delta T = 3,6 \frac{\ell \cdot \Delta k}{q_{\bar{m}ax}} \quad (\text{III.20})$$

ℓ , medido em metros

Δk , medido em ve\u00edculos por quil\u00f4metro

q , medido em ve\u00edculos por hora

Δt , medido em segundos

Note que estamos usando k_{ot} e $q_{\bar{m}ax}$ por ser a condi\u00e7\u00e3o que desejamos atingir em regime.

Ao ser detetada a condição $k_{ot} < k < k_j$, o sinal correspondente àquele ponto da faixa, e todos os de montante, na mesma faixa, devem ser fechados simultâneamente e um cronômetro acionado.

Transcorrido os Δt segundos, o primeiro sinal deve abrir e assim, sequencialmente, todos ou outros, a intervalos de Δt segundos, até que toda a faixa fique liberada.

Para aumentar a velocidade de processamento do sistema, a sequenciação da abertura dos sinais deve ser comandada por um periférico. Este periférico poderá ser interrompido, a qualquer momento, sob comando do sistema, se nova configuração da sinalização for necessária, devido a novas perturbações surgidas na via.

Nos casos em que se fizer necessário o fechamento simultâneo de sinais, seria aconselhável que fosse realizado também por periféricos. Isto permitiria não só aumentar a velocidade de processamento como também impediria o aumento da concentração entre sensores de montante, decorrente do retardo existente em um fechamento sequencial.

Desta forma teríamos mais precisão no cálculo de Δt .

Para que o fluxo seja otimizado em toda a extensão da via, o valor de Δt deve ser calculado para cada situação \bar{a} montante da posição em que se verificou a condição $k(t) > k_{0t}$ e a partir dos valores $k(t)$ de cada trecho. Assim, cada trecho teria o seu Δt adequado.

Nos trechos em que $k(t) \leq k_{0t}$, não haveria necessidade de introduzir retardo na abertura do sinal do trecho. Neste caso teríamos

$$\Delta k = k(t) - k_{0t} \leq 0$$

e da expressão (III.20) resultaria $\Delta t \leq 0$.

Desta forma o computador, ao testar Δt , só introduziria retardo na abertura do sinal do trecho se $\Delta t > 0$.

Cada Δt é contado a partir do instante em que o sinal do trecho \bar{a} jusante é aberto.

(b) Contrôles do trajeto da corrente de tráfego para maximizar a "transferência" e gerar a "FEM".

Na lei de controle da concentração, vista anteriormente, agimos apenas no módulo do vetor fluxo, isto é, apenas sobre um escalar.

A lei de controle do trajeto agirã sobre o vetor fluxo, mudando seu módulo e sua direção, objetivando maximizar a transferência. É portanto uma transformação vetorial.^{1.9}

Na figura III.12 esboçamos o comportamento típico da corrente de tráfego na presença de uma obstrução em uma de suas faixas

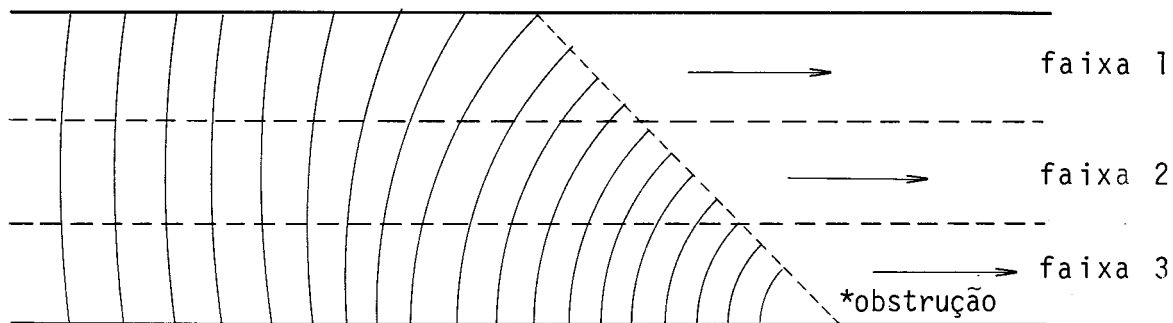


Fig. III.12 - Propagação da onda de choque, progressivamente ocupando todas as faixas.

Na figura III.13 está representado, um trecho típico de uma rodovia, onde são mostradas as posições dos sensores, dos sinais e a sequência de sinalização para gerar a "FEM" adequada e orientar o fluxo.

Nas seções A, B, C e D estão situados, em cada faixa, os sinais e os sensores.

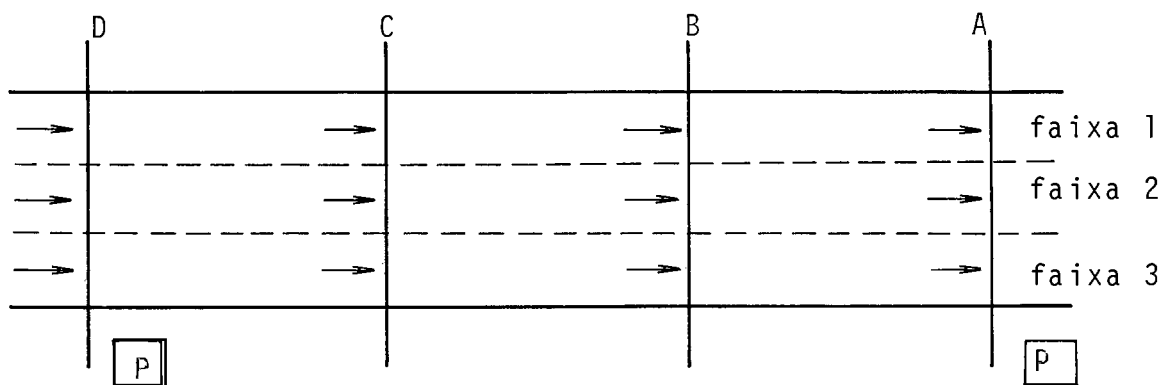


Fig. III.13(a) - Trecho de via livre, mostrando as posições dos sensores e sinais (A, B, C, D) e os postos de atendimento em seus extremos P, de onde partirá o equipamento.

Simbologia da sinalização:

(→) faixa livre

(X) faixa interditada

(↙) faixa interditada com desvio à esquerda

(↘) faixa interditada com desvio à direita

(↔) faixa interditada com desvio à esquerda ou direita

* local da obstrução

[P] posto de atendimento.

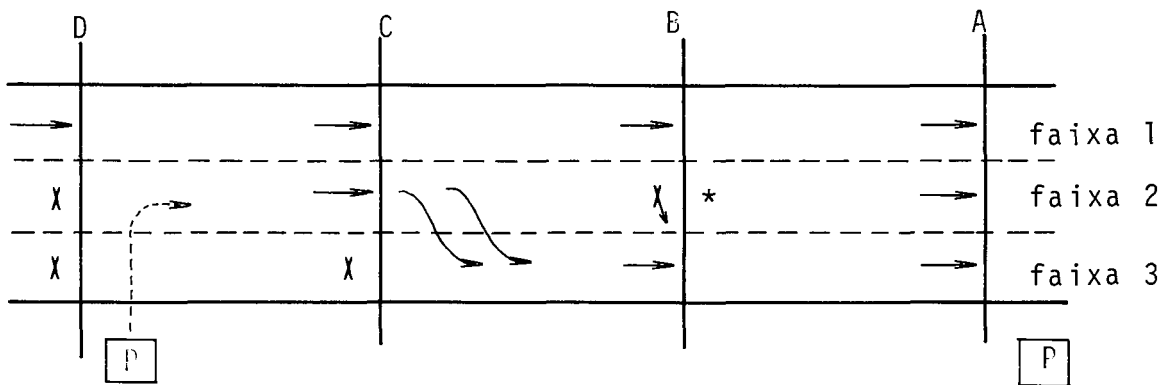


Fig. III.13(b) - Sinalização inicial visando rápido escoamento na faixa 2 para gerar a "FEM", bem como acesso rápido do equipamento de desobstrução.

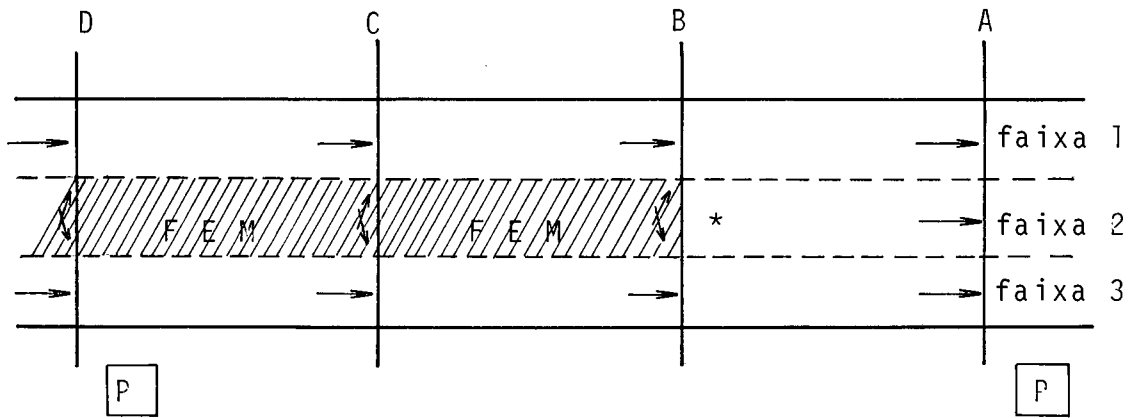


Fig. 13 III.13(c) - FEM instalada na faixa obstruída, com as outras faixas operando a plena carga.

As figuras III.13, (b) e (c) mostram a ação dos sinais sobre a corrente de tráfego para dar-lhe a trajetória adequada e gerar, simultaneamente, a FEM.

Note que a faixa 1 não foi interrompida e a faixa 3 só o foi momentaneamente.

Um outro caso a considerar é quando houver a presença de dois obstáculos em trechos e faixas diferentes.

Nesse caso as FEM serão parciais, só a do obstáculo de montante atingirá o início da via.

A FEM do obstáculo de jusante terminará antes do obstáculo de montante, permitindo assim que duas faixas sejam

utilizadas, como mostra a figura III.13 (d). Neste caso poderia ser introduzido um sinal amarelo intermitente, à montante do obstáculo de jusante.

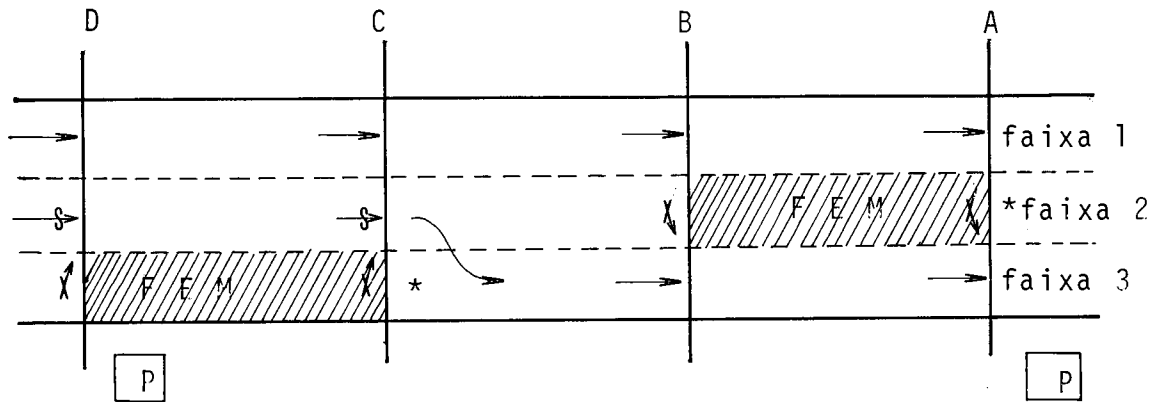


Fig. III.13 (d) - Se os obstáculos não estiverem muito próximos, podem ser geradas várias FEM, uma para cada obstáculo, limitando a redução de capacidade ao valor de uma faixa. —§— = amarelo intermitente.

Sempre que possível, deve ser removido em primeiro lugar o obstáculo de jusante, reduzindo-se assim os riscos em caso de incêndio no trecho situado entre os dois obstáculos; no caso de túneis.

(c) Controle para limitar a taxa de monóxido de carbono em uma faixa de valores préfixados, com mínimo consumo de energia.

A taxa de monóxido de carbono varia com a concentração de veículos no interior do túnel, com o comprimento da galeria do túnel e, em menor escala, varia também com o sentido da

corrente de ar natural que existiria no interior do túnel na ausência de tráfego.

O fluxo de tráfego no interior do túnel cria também uma corrente de ar cuja vazão tem uma curva de comportamento, vazão x concentração, muito parecida com a curva fluxo x concentração da corrente de tráfego. Os pontos de máximo destas duas curvas são muito próximos. Apenas para melhor compreensão da semelhança entre as duas curvas, podemos imaginar que cada veículo arrastasse consigo um volume de ar constante, assim, ao fluxo máximo de veículos corresponderia a vazão máxima de ar.

Na figura III.14 apresentamos um esboço grosseiro dessas curvas

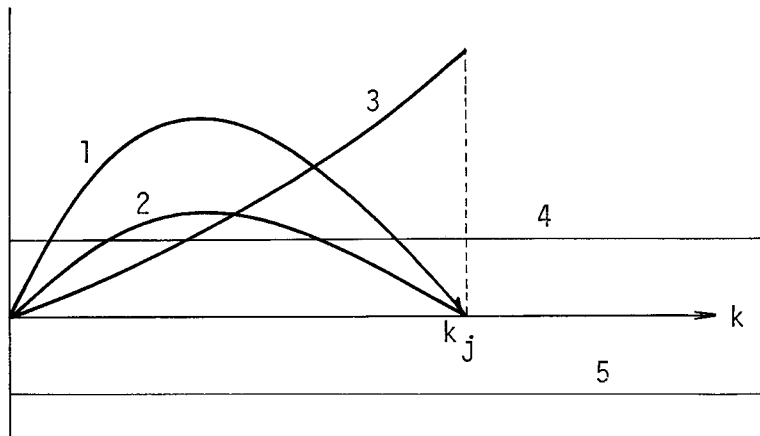


Fig. III.14 - 1 curva fluxo x concentração
 2 curva vazão x concentração
 3 curva da taxa de monóxido de carbono
 4 curva do fluxo natural de ar no mesmo sentido do fluxo de tráfego
 5 curva do fluxo natural de ar no sentido contrário do fluxo de tráfego.

Como sabemos, da química e da termodinâmica, o monóxido de carbono é um subproduto da queima incompleta de um combustível. A queima completa daria como subprodutos CO_2 e água.

Assim, a regulagem do motor determina maior ou menor produção de CO.

Logicamente, os motores de maior cilindrada produzem também maior quantidade de CO.

A posição do acelerador do motor também determina a quantidade de CO produzido pelo motor, visto que, para fornecer maior potência, precisa consumir mais combustível.

Assim, todas as vezes que exigirmos mais potência do motor, a produção de CO crescerá. Este é o caso das rampas, condição de "para-anda", etc.

Cada veículo é portanto uma fonte variável de monóxido de carbono.

O CO produzido é diluído no ar e medido em partes por milhão (ppm).

Dependendo das condições do fluxo de tráfego, do tipo de veículos que compõem a corrente, do comprimento do túnel e da corrente de ar natural, por vezes é necessário introduzir

ventilação forçada.

Na maioria dos túneis, devido ao seu comprimento, é usada ventilação forçada do tipo longitudinal. Neste tipo de ventilação são usados ventiladores de fluxo axial, com direção e sentido do fluxo de ar coincidentes com os da corrente de tráfego. Estes ventiladores são distribuídos ao longo do túnel como mostra a figura III.15.

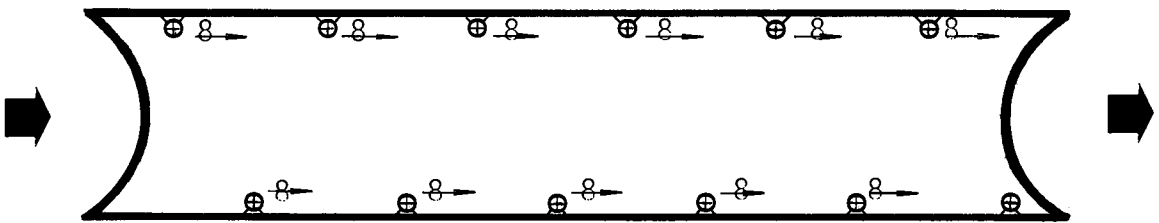


Fig. III.15 - Distribuição de ventiladores axiais em um túnel com ventilação longitudinal.

Para economia de sua instalação elétrica, são os ventiladores acionados em pequenos grupos e de forma sequencial.

São ligados em pequenos grupos alimentados por subestações rebaixadoras (alta tensão/baixa tensão), situadas no interior do túnel, o que permite uma grande economia em cabos elétricos.

São acionados de forma sequencial para evitar grandes valores de corrente elétrica em uma partida simultânea, o que levaria a um custo elevado em cabos e chaves, além de reduzir a sensibilidade e dificultar a hierarquização⁶ dos elementos da proteção elétrica.

Devido a essas imposições da instalação elétrica, a injeção forçada de ar é feita em degrau, como mostra a figura III.16.

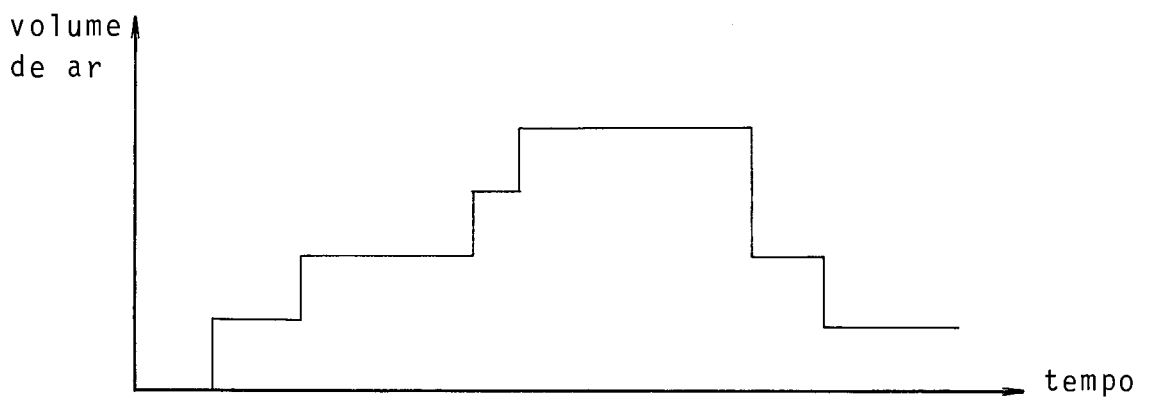


Fig. III.16 - Degraus no volume de ar insuflado devido à montagem em grupos de ventiladores.

O sistema de ventilação sob controle, deve insuflar um volume de ar que dilua o volume de CO existente no interior do túnel, regulando o teor de monóxido de carbono no ar dentro de uma faixa de segurança.

Para exercer esse controle o sistema deve agir como regulador da taxa, medindo o valor atual, comparando-o com a faixa desejada e corrigindo o erro através da ativação ou desativação de grupos de ventiladores; como mostra o diagrama de blocos da figura III.17.

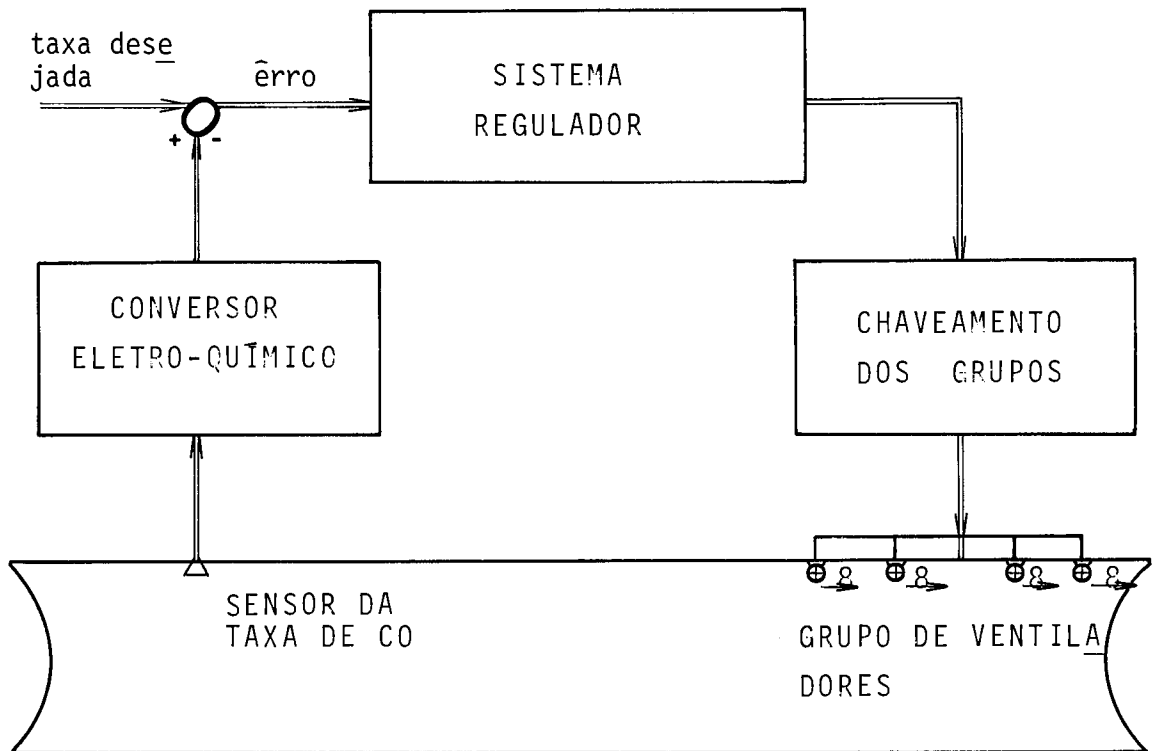
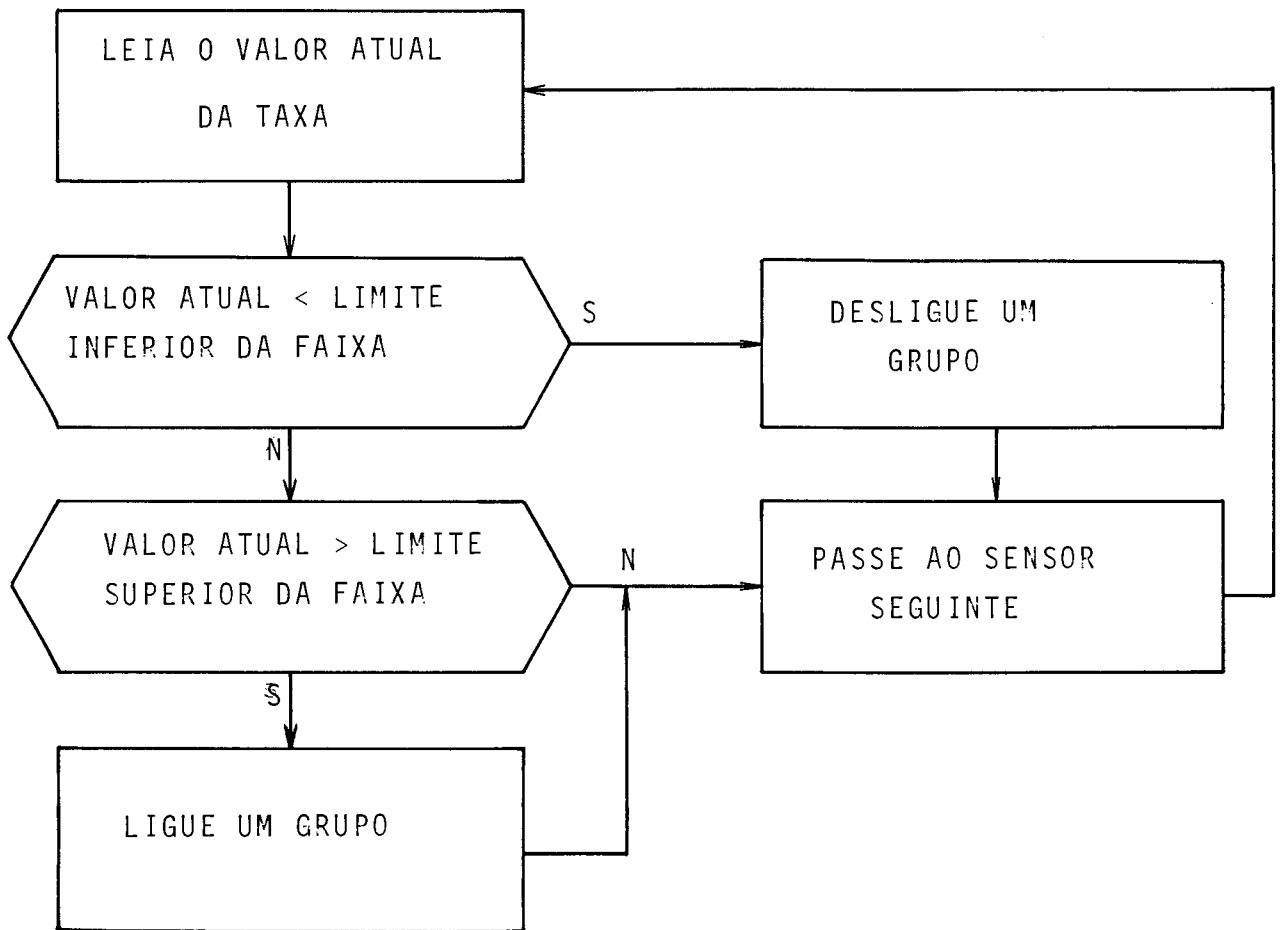


Fig. III.17 - Regulação da taxa de CO.

O computador do sistema de controle de tráfego pode desempenhar essa tarefa com um programa extremamente simples.



Através de experiências com o sistema deve-se determinar o intervalo de tempo mais adequado entre duas ações do sistema, visto que, entre o grupo ser ligado, ou desligado, e a nova taxa ser atingida, há um retardo.

Note-se que o controle da concentração de veículos para otimizar a transferência contribui também para minimizar o consumo de energia com a ventilação forçada.

A figura III.18 mostra a correlação entre o teor de monóxido e o tempo de exposição⁸.

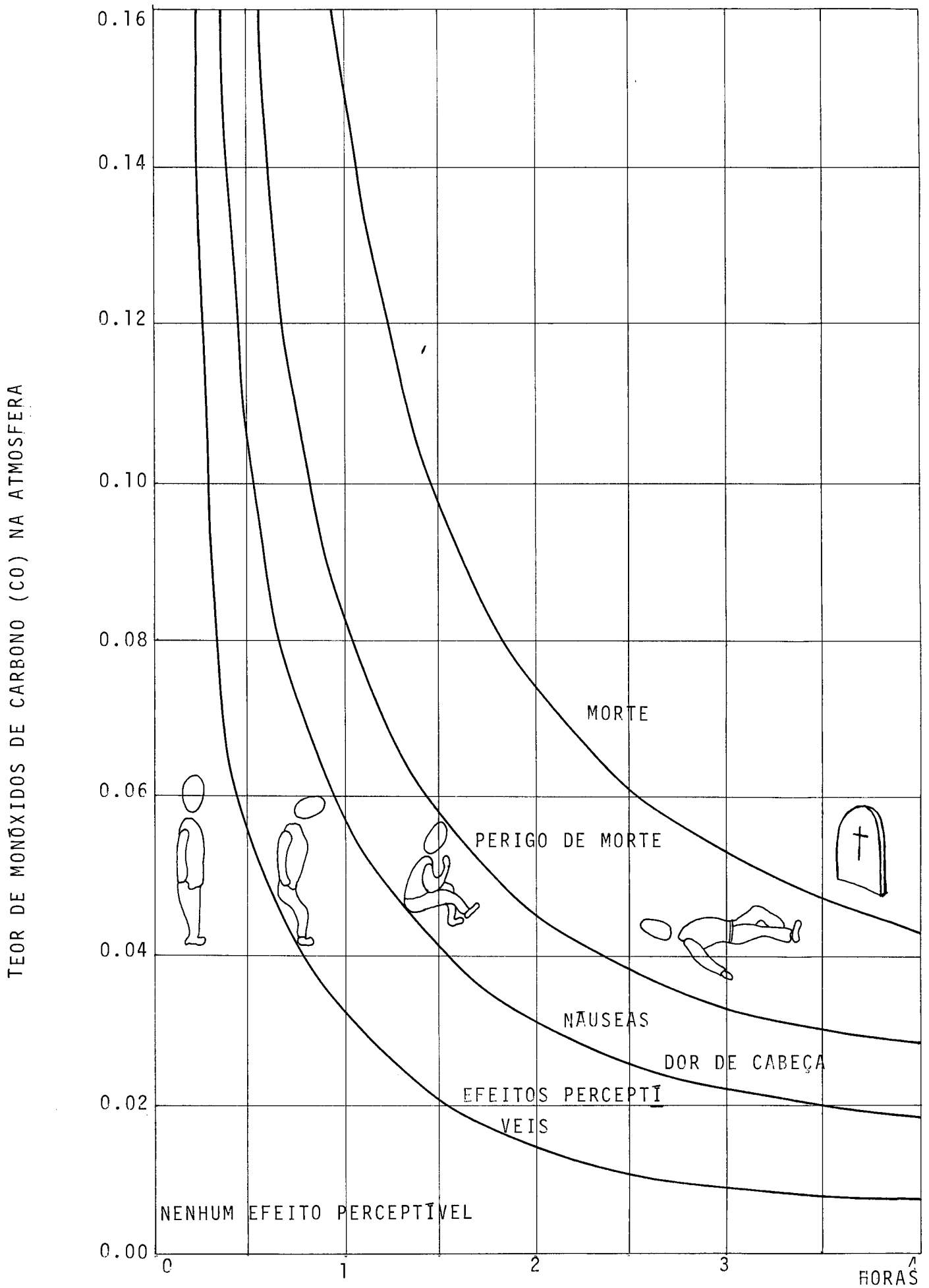


Fig. III.18 - Duração da exposição na atmosfera viciada

(d) Contrôles da velocidade e sentido da fumaça, resultante de incêndio em túnel dotado de ventilação longitudinal.

Quando ocorre um incêndio no interior de um túnel, duas preocupações surgem imediatamente; proteger as pessoas que se encontram no interior do túnel e minimizar a propagação do fogo.

Proteger as pessoas, impõe: dar-lhes sensação de segurança para evitar o pânico, impedir que a fumaça as atinja e socorrer possíveis vítimas em tempo mínimo.

Minimizar a propagação do incêndio, impõe: chegar ao local em tempo mínimo com os recursos necessários, criar condições ambientes que minimizem a velocidade da combustão e permitam aos motoristas dos veículos retidos dar o primeiro combate ao incêndio.

Para atendermos essas imposições é necessário que:

- (1) à jusante do incêndio haja fluidez do tráfego;
- (2) a fumaça seja forçada a se deslocar no sentido do fluxo de tráfego, com velocidade mínima;
- (3) a velocidade da fumaça seja menor que a dos veículos que se afastam à jusante;
- (4) à montante do incêndio o tráfego seja interrompido e a FEM gerada;

- (5) a capacidade da via, à jusante, seja muito maior que a da seção onde se situa o incêndio; e
- (6) haja um alarme para, no caso de veículo lento ou parado, à jusante, serem avisados seus ocupantes no sentido de permanecerem no interior do mesmo, com os vidros fechados.

Proteção da pessoas:

A sensação de segurança para as pessoas retidas à montante, dentro do túnel, é conseguida com a implantação do item (2); para as pessoas que ocupam os veículos que se afastam, à jusante, dentro do túnel, é conseguida com a implantação dos itens (1), (3) e (4); para as pessoas que ocupam veículos defeituosos, parado à jusante, dentro do túnel, é conseguida com um alarme que os avise para que se mantenham dentro do veículo com os vidros fechados.

Para impedir que a fumaça atinja as pessoas, é necessário que se implantem os itens (1), (2), (3), (4), (5) e (6).

Para socorrer possíveis vítimas em tempo mínimo é necessário que se implantem os itens (2) e (5).

Minimização da propagação do incêndio:

Para chegar ao local em tempo mínimo com os recursos necessários, é necessário que se implantem os itens (1),(2),

(4) e (5).

Para criar condições ambientes que minimizem a velocidade da combustão e permitam aos motoristas dos veículos retidos dar o primeiro combate ao incêndio, é necessário que se implante o ítem (2).

Vejamos agora como podemos implantar os ítems (1) a (7).

Ítem (1) - é realizado pela lei de controle da concentração, já vista.

Ítem (2) - é realizado com o auxílio de um anemômetro e do sistema de ventiladores.

Ítem (3) - é realizado comparando-se a velocidade do ar, dada pelo anemômetro, com a velocidade média dos veículos de jusante, dada por um sensor de velocidade ou pela obtenção de forma indireta, a partir dos valores médios do fluxo de tráfego e da concentração disponíveis na memória do computador para uso no controle da concentração.

Ítem (4) - é realizado interrompendo-se toda a corrente de tráfego à montante do incêndio e gerando a FEM.

Ítem (5) - é realizado pela aplicação simultânea dos ítems (1) e (4).

Ítem (6) - o alarme será acionado sempre que a lei de controle da concentração ou do trajeto do tráfego, já vistos, estiverem sendo aplicadas, ao surgir o incêndio.

O sistema de controle para atender o ítem (2) é mostrado no diagrama de blocos de fig. III.19

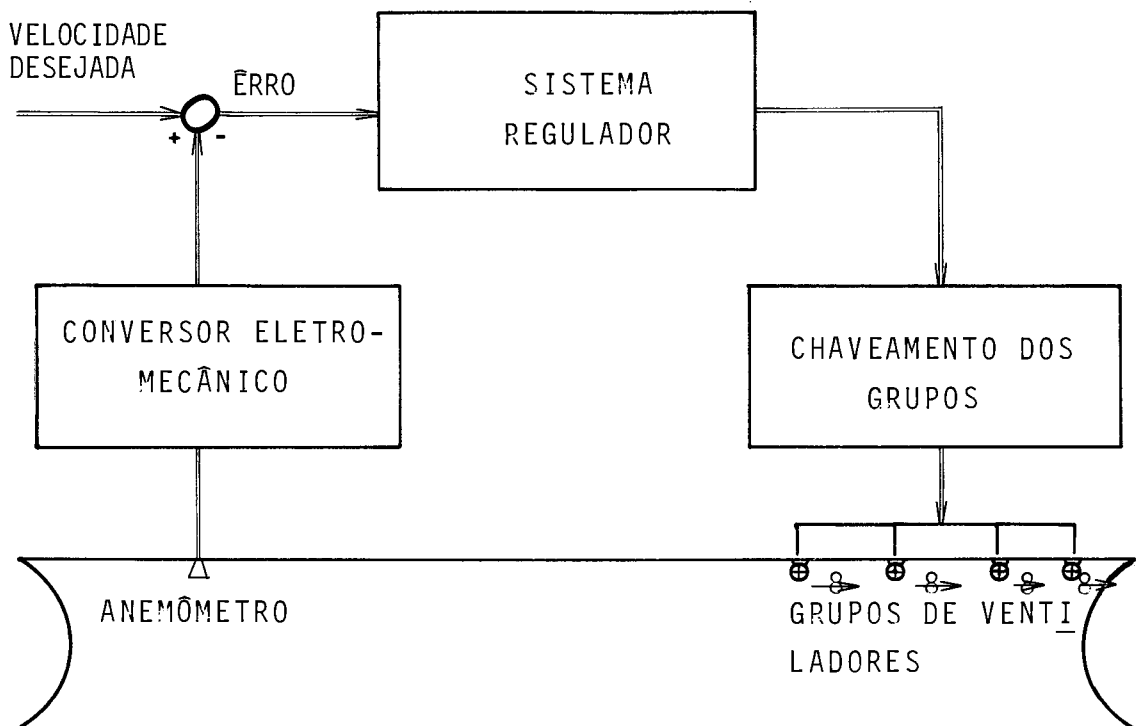


Fig. III.19 - Limitação da velocidade da fumaça

Na figura III.20 mostramos a configuração da sinalização para realizar o ítem (4).

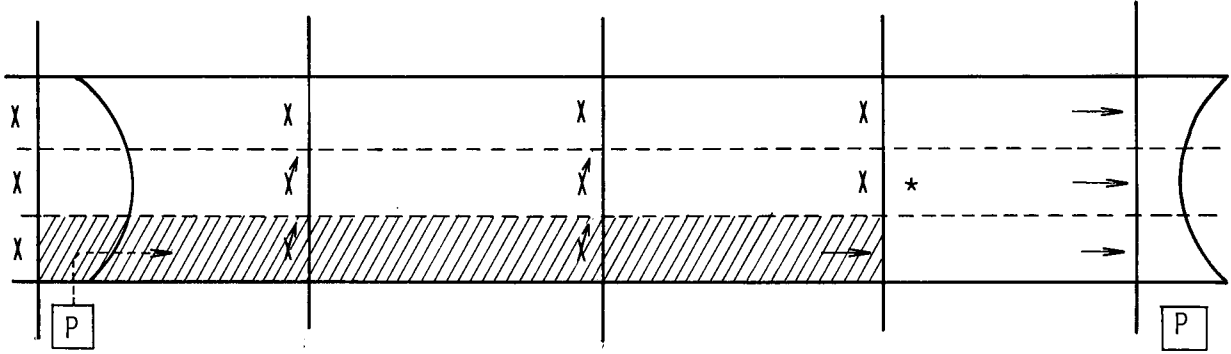
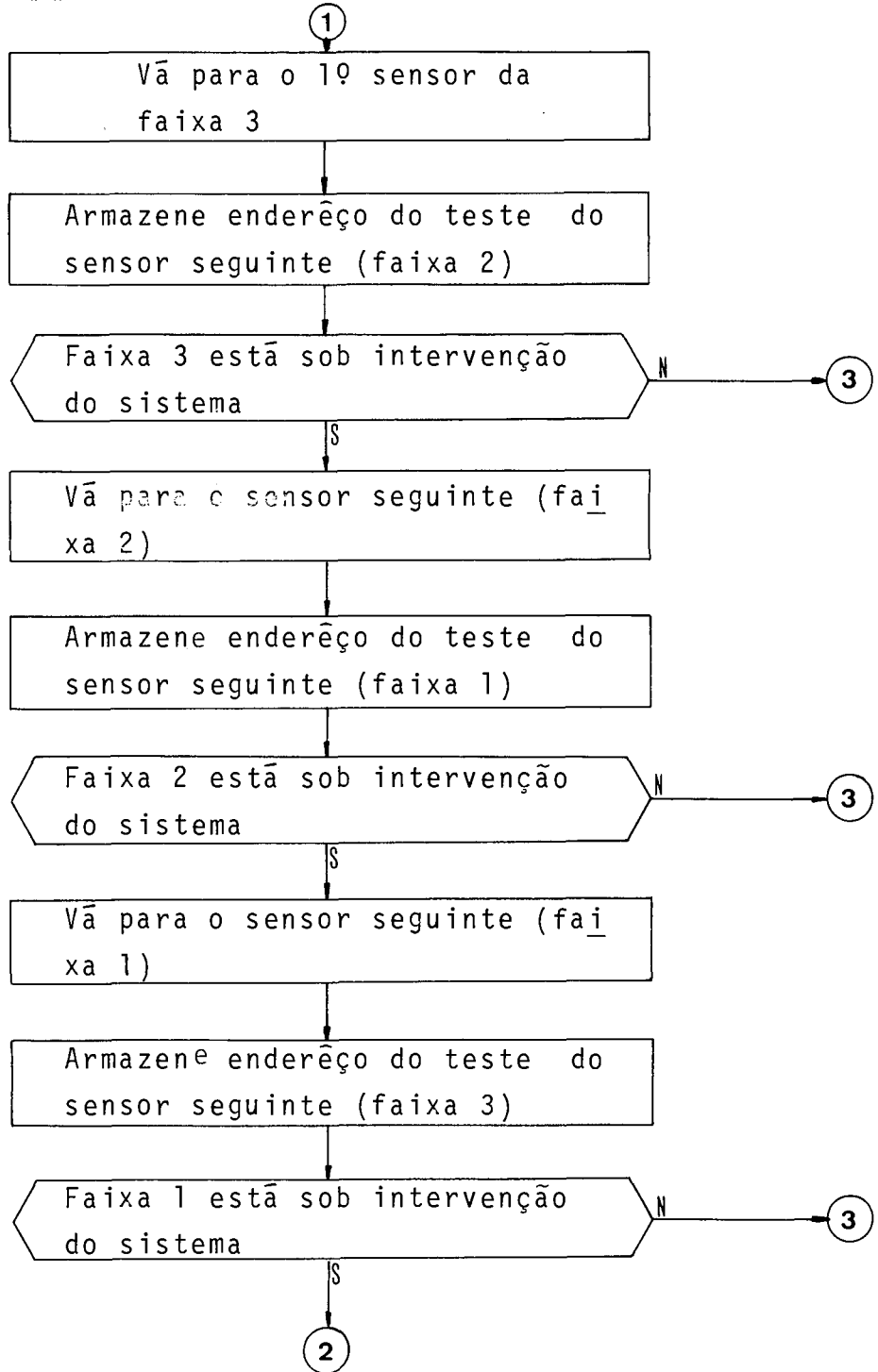
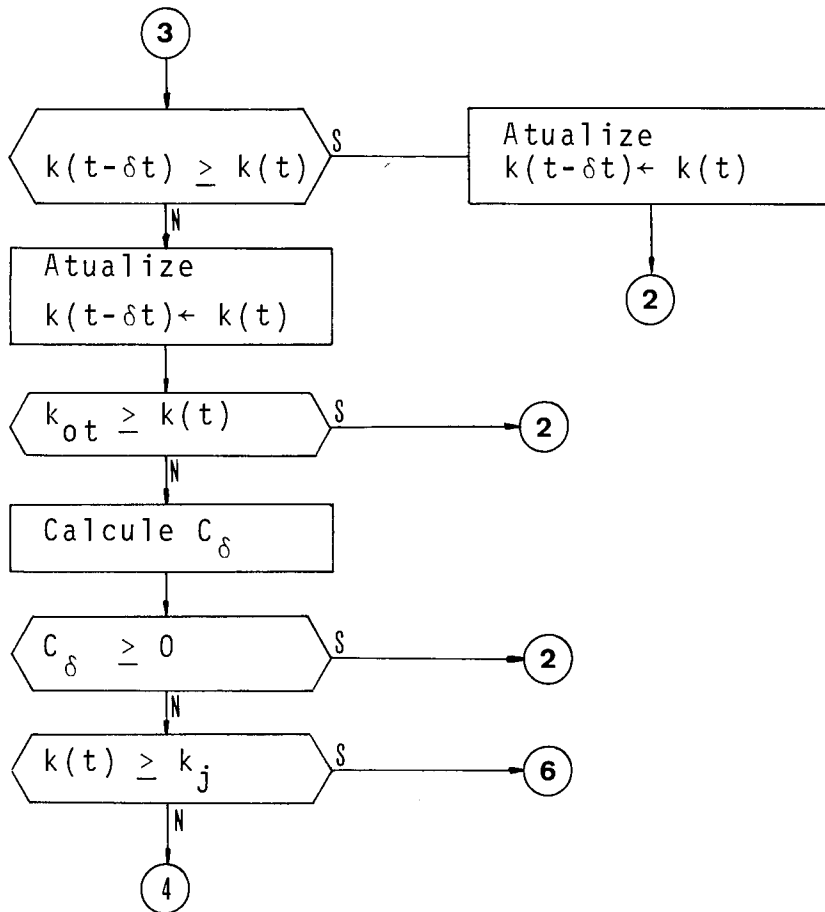
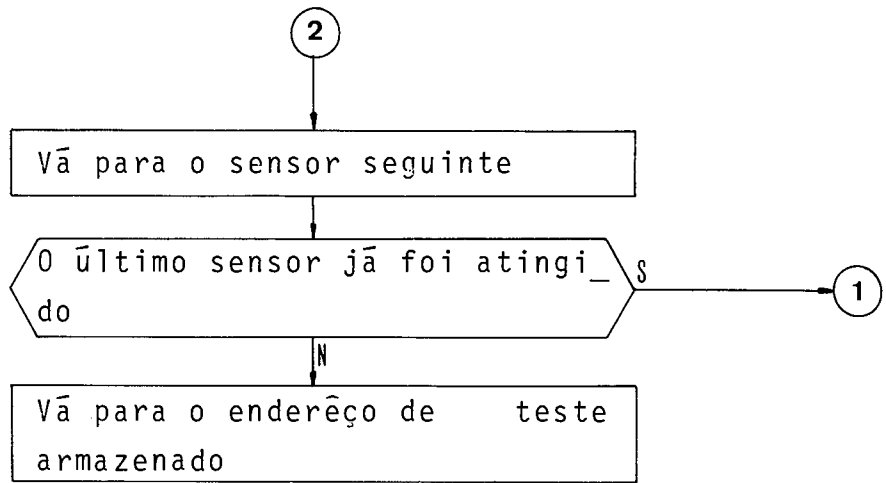
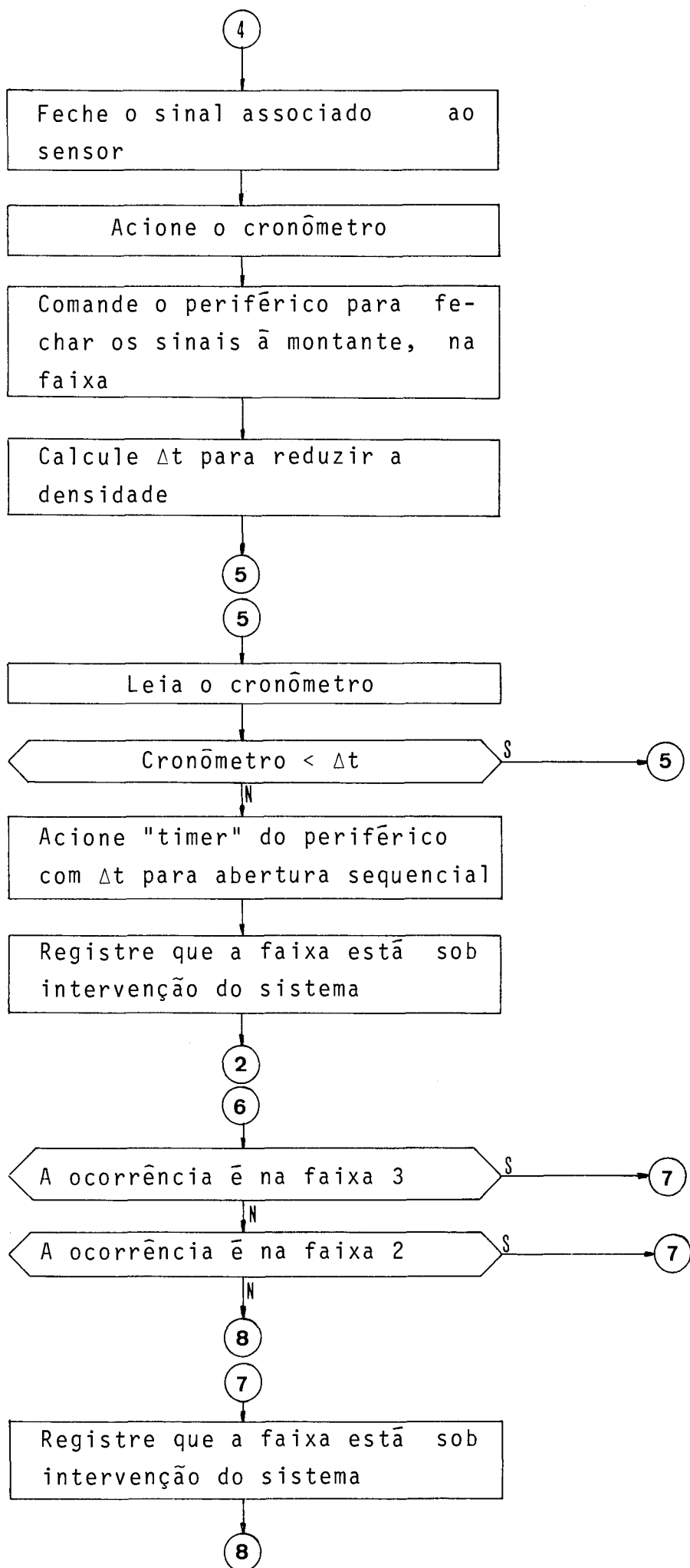


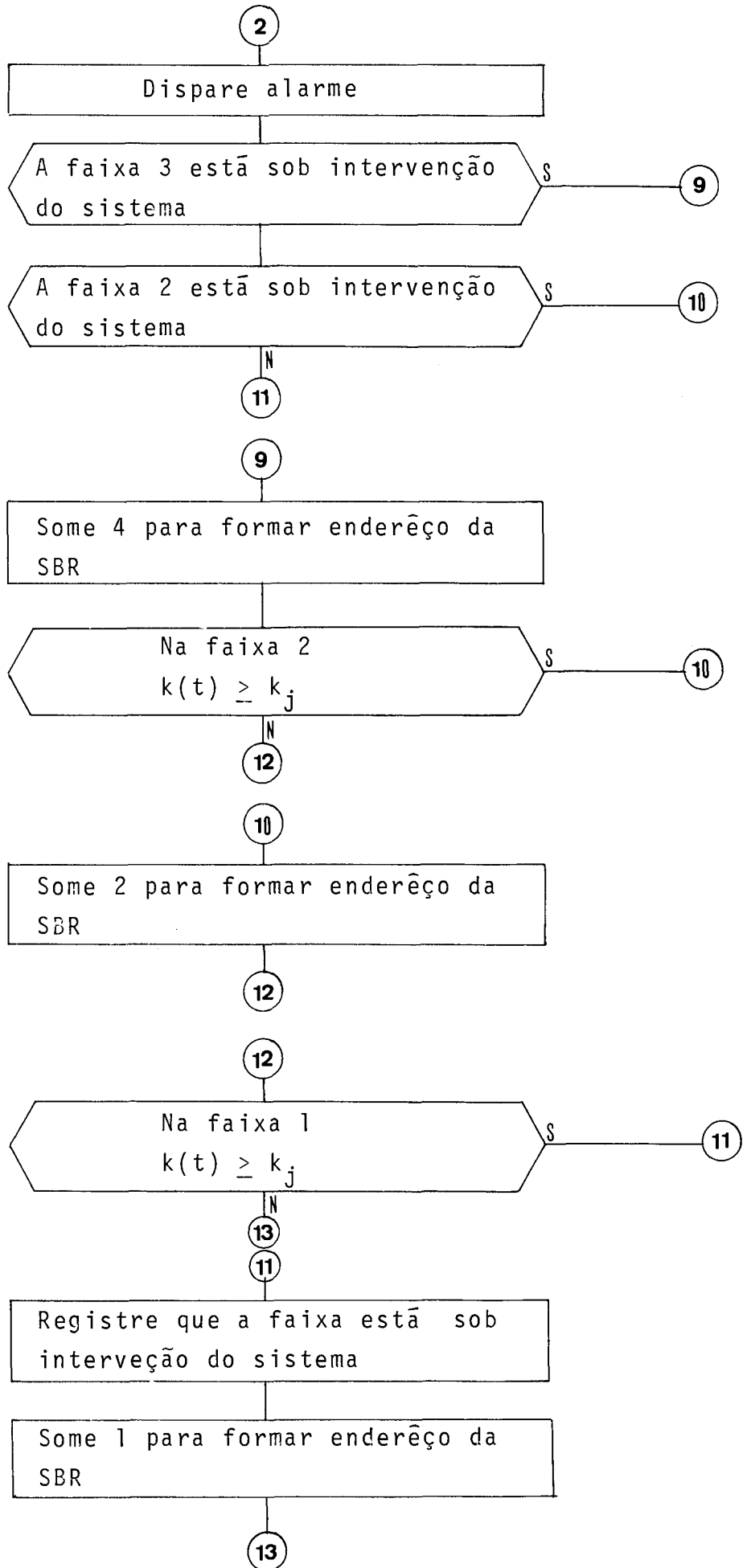
Fig. III.20 - Sinalização para um caso de incêndio na faixa central de um túnel com três faixas de rolamento.

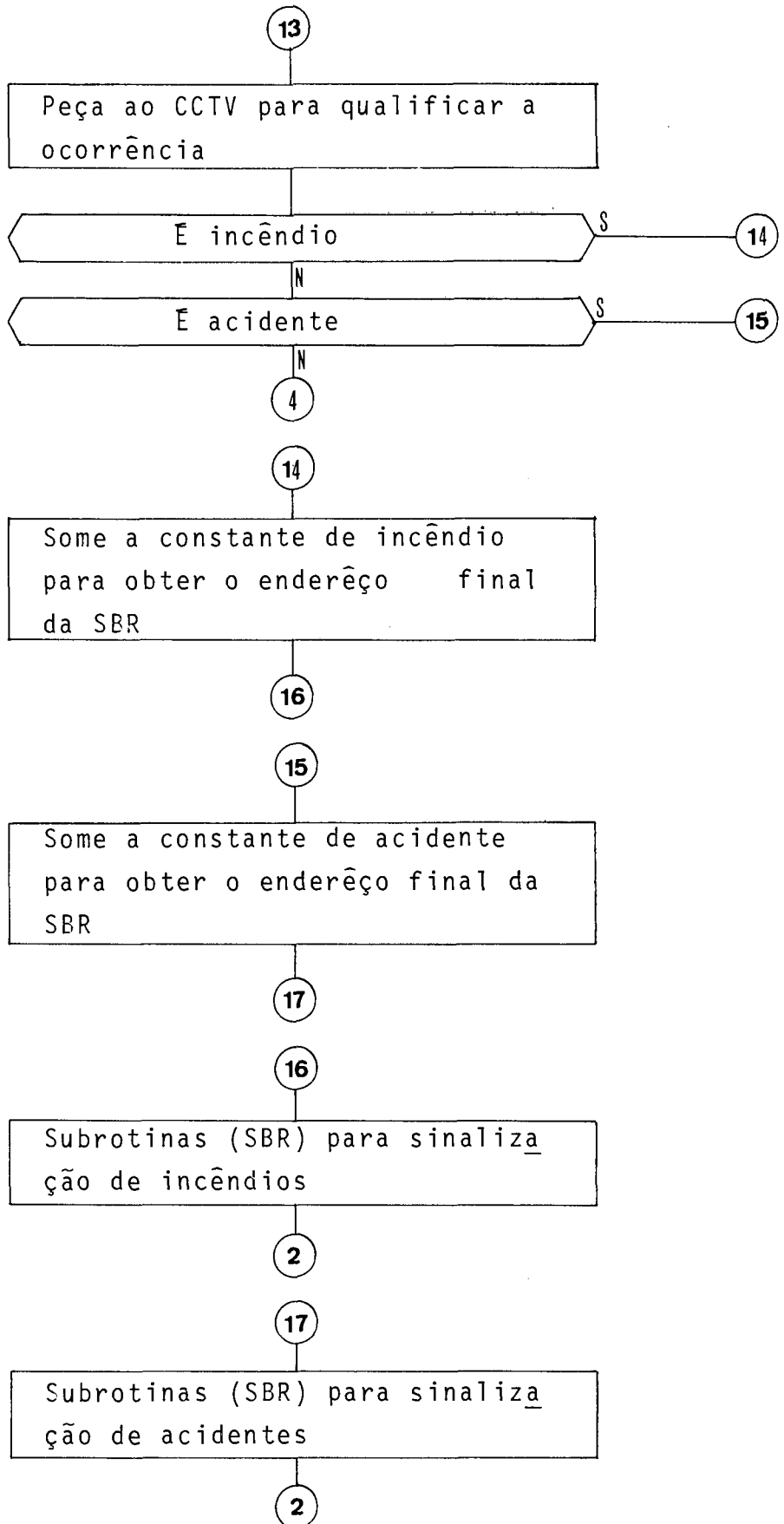
III.3.4 - FLUXOGRAMA SIMPLIFICADO PARA VIA COM TRÊS FAIXAS











III.4 - Conclusão e Comentários

O sistema de controle de tráfego em vias expressas e túneis, que aqui se propõe, é destinado fundamentalmente ao trato das situações de tráfego intenso. Nesta situação necessitamos oferecer a maior capacidade possível juntamente com recursos que protejam os ocupantes dos veículos, quando surgir um defeito em um deles. Isto exigiria a presença de um acostamento.

Como é fácil verificar, necessidade do uso de capacidade plena simultaneamente com acostamento, são exigências contraditórias.

Além disso, um acostamento só é eficaz para os veículos que trafegam na faixa adjacente a ele.

Para que o acostamento fosse solução em todos os casos, seria necessário prover um acostamento para cada faixa; o que é um absurdo.

O sistema proposto apresenta as seguintes vantagens:

- 1 - Na ausência de obstáculos, a via oferece a maior capacidade possível, pois toda a largura pode ser utilizada para tráfego;
- 2- O "acostamento" só existe no momento em que se faz necessário;

- 3 - Tudo se passa como se houvesse um "acostamento" para cada faixa;
- 4 - O "acostamento" ocupa apenas o trecho necessário à operação;
- 5 - Por ter a largura de uma faixa, o "acostamento" permite que o equipamento de socorro se desloque em tempo mínimo;
- 6 - Qualquer tipo de ocorrência é detetada e atendida em tempo mínimo;
- 7 - Os riscos de novos acidentes são minimizados;
- 8 - O fluxo remanescente, quando há obstáculo, é maximizado;
- 9 - Os efeitos danosos do monóxido de carbono são minimizados;
- 10 - O custo de ventilação é minimizado;
- 11 - As vítimas de acidentes são prontamente atendidas;
- 12 - Os incêndios são prontamente atacados.

Em fim, neste sistema, ao contrário do habitual, quem procura o carro é o acostamento, que aqui denominamos FEM (faixa exclusiva momentânea).

O fluxo estará permanentemente otimizado.

A aplicação do sistema, pelo que acabamos de expor, trará fluidez e segurança ao tráfego.

CAPÍTULO IVCONSIDERAÇÕES PARA IMPLEMENTAÇÃO E
PERSPECTIVAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Tomaremos como exemplo o "*Sistema Rebouças*", denominação dada ao trecho da "*linha vermelha*" (RJ-071), formado pelo túnel Rebouças e as vias expressas elevadas Paulo de Frontin e Rufino Pizarro; na cidade do Rio de Janeiro.

A figura IV.1 mostra um esboço do sistema Rebouças, na configuração atual.

Até o terceiro trimestre de 1979, as galerias do túnel ofereciam ao tráfego duas faixas de rolamento e um acostamento.

A partir do quarto trimestre, a título experimental, no denominado sentido de tráfego 1, foi eliminado o acostamento e a pista dividida em três faixas de rolamento. Isto resultou em um aumento no fluxo de tráfego e na transferência. Em contrapartida aumentou os riscos de acidentes decorrentes de um obstáculo na via.

Nota-se também que um obstáculo, em qualquer das faixas, após um pequeno intervalo de tempo, provoca reflexos nas outras faixas; reduzindo a capacidade efetiva a valores inferiores ao ótimo.

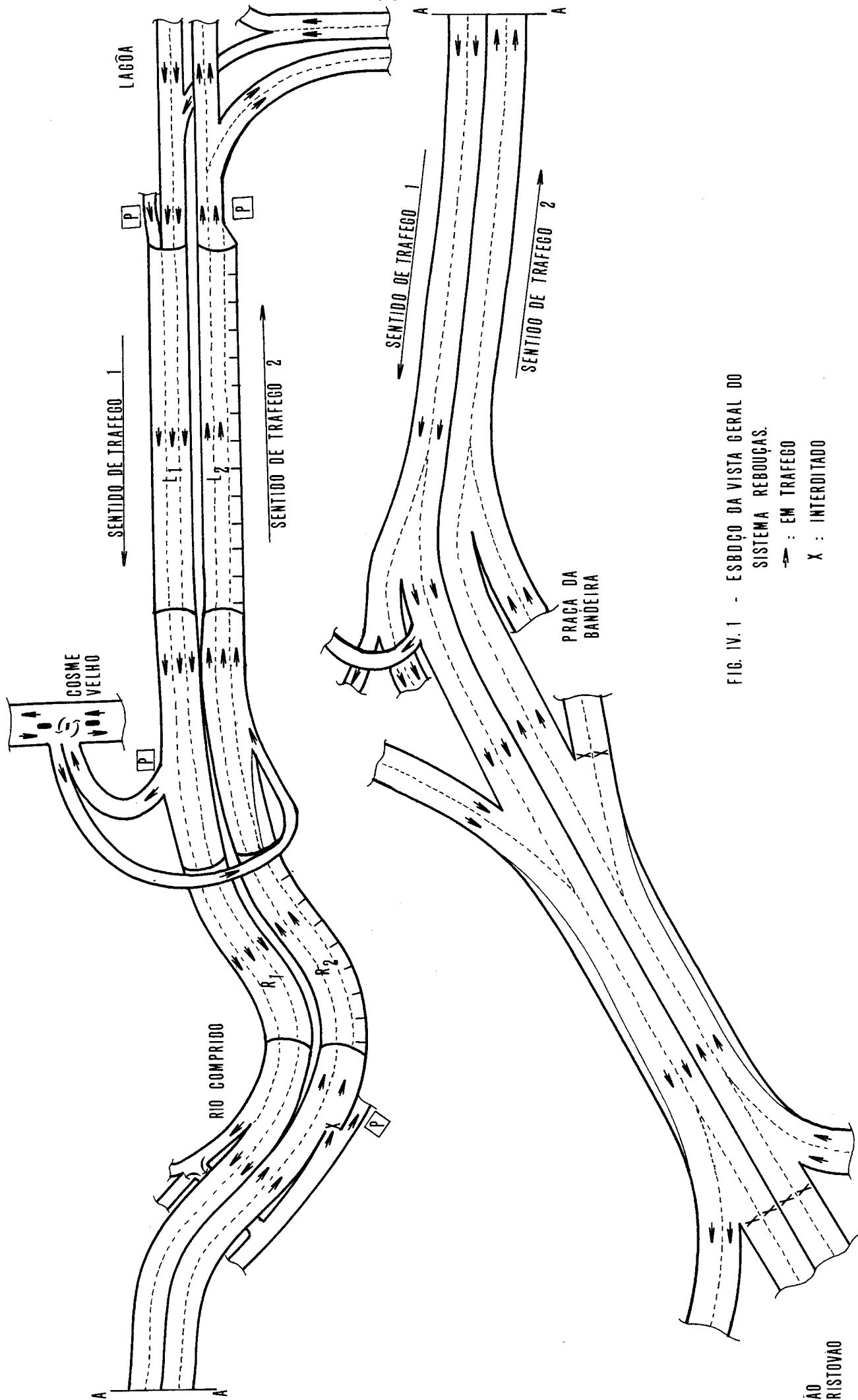


FIG. IV. 1 - ESBOÇO DA VISTA GERAL DO SISTEMA REBOUÇAS.

— : EM TRAFEGO
 X : INTERDITADO

O tempo de atendimento a uma ocorrência na via também ficou aumentado.

Essas duas constatações mostram que a transferência não está otimizada, embora tenha aumentado.

Por outro lado, quando havia acostamento, embora fosse menor a transferência, havia mais segurança e menor tempo de atendimento, quando o obstáculo surgia na faixa adjacente ao acostamento.

Uma análise comparativa entre as duas configurações mostra que, na ausência de obstáculos, a via funciona melhor com três faixas, mas, quando o obstáculo se situava na faixa adjacente ao acostamento, a via funcionava melhor com a configuração original.

Na rápida análise que faremos a seguir, mostraremos que o sistema de controle de tráfego e segurança, proposto no capítulo III, poderá associar as vantagens das duas configurações, além de oferecer outras.

Dentre essas citamos a segurança que o sistema introduz no caso de dois acidentes em posições diferentes da via. Neste caso, os veículos que saem do gargalo imposto pelo acidente de montante encontram uma região de baixa concentração e aumentam consideravelmente suas velocidades, assim aumentando o risco de colidirem com o obstáculo de jusante.

Os problemas no Sistema Rebouças e as vantagens que o sistema proposto no capítulo III oferece

Façamos esta análise examinando a figura IV.1.

Vejamos primeiro o sentido de tráfego 1.

Trecho Lagôa-Cosme Velho

Temos aí a galeria L1 operando com três faixas, sem acostamento, com aclive maior que 2%, desembocando em curva, lombada a céu aberto, na qual existe uma rampa de saída à direita. Esta curva prossegue no interior da galeria R1.

1º Problema:

Obstáculos, após pequeno intervalo de tempo, prejudicam o escoamento nas faixas restantes,

Solução:

O sistema detetará o obstáculo e sinalizará a faixa, oferecendo na entrada da galeria (Lagôa) apenas a capacidade efetiva máxima do momento.

Se a faixa obstruída for a da direita, como no seu início existe uma rampa de entrada de apenas uma faixa, o sistema, alternativamente, dará passagem aos veículos da rampa ou da

faixa que lhe é adjacente. A faixa da esquerda permanecerá com tráfego livre.

2º Problema:

Obstáculo logo após a lombada da curva leva sério risco de colisão aos carros que se aproximam, pela falta de visibilidade.

Solução:

Sensores posicionados na região crítica permitiriam sinalizar toda a faixa, à montante do obstáculo. Isto é particularmente importante para o tráfego em pelotões ou demandando de um obstáculo à montante do que nos referimos.

3º Problema:

Obstáculo na rampa de saída (Cosme Velho) se reflete como um obstáculo na faixa da direita.

Solução:

Só a rampa é interditada e um posto de atendimento, estrategicamente situado ao lado, providencia imediata remoção.

No caso de obstáculo de difícil remoção ou de retenção proveniente da malha de saída, um aviso específico indica

rã à entrada da via (Lagôa) a interdição daquela rampa.

Trecho Cosme Velho - Rio Comprido

É o trecho compreendido, na figura IV.1, entre a entrada da galeria R1 e o corte A-A.

Neste trecho temos a galeria R1, com três faixas, em curva reversa, desembocando em curva a céu aberto, no fim da qual há uma bifurcação. De um lado o elevado Paulo de Frontin com duas faixas de rolamento e do outro uma rampa de saída, com uma faixa e acostamento.

1º Problema:

Idêntico ao 1º problema do trecho Lagôa-Cosme Velho.

Solução:

A que foi dada para o trecho Lagôa-Cosme Velho, acrescida de uma sinalização amarelo intermitente próximo e à montante da entrada da rampa situada na curva do Cosme Velho, na faixa da direita, nos casos de obstrução nesta faixa. Isto permitirá aos carros que trafegam na faixa central terem acesso ao Cosme Velho.

Para uma melhor solução, deve-se conhecer o fluxo médio na rampa de saída do Cosme Velho.

2º Problema:

Gargalo devido à bifurcação logo após uma forte curva sem visibilidade.

Solução:

O posicionamento de sensores nesta região permitirá ao sistema controlar a concentração por faixa, oferecendo à montante a capacidade efetiva no gargalo.

Além disso uma sinalização adequada indicaria que a faixa da direita se destina aos carros que demandam ao Cosme Velho e Rio Comprido.

Trecho Rio Comprido - Praça da Bandeira

Compreende o elevado Paulo de Frontin que termina em uma bifurcação, tendo à esquerda o elevado Rufino Pizarro e à direita a rampa de saída para a Praça da Bandeira, ambos com duas faixas de rolamento.

1º Problema:

Por ser uma via com duas faixas recebendo tráfego de uma via de três faixas, nas condições de tráfego intenso, um obstáculo provoca retenção que, por vezes, obstrui a saída da galeria R1. Isto se torna muito perigoso no caso de incêndio no interior da galeria.

Solução:

O sistema de controle, ao limitar a capacidade efetiva à montante e criar a FEM, minimizará os riscos.

2º Problema:

Obstrução na rampa de saída para a Praça da Bandeira.

Solução:

O sistema de controle atuará sobre a concentração, gerará a FEM e sinalizará no início da via que o acesso está obstruído.

Trecho Praça da Bandeira - São Cristóvão

Devido às baixas concentrações permanentes, nos dois sentidos de tráfego, não apresenta problemas.

O sistema de controle seria apenas constituído de um circuito fechado de televisão.

Vejamos agora o sentido de tráfego 2.

Trecho Praça da Bandeira - Rio Comprido

Neste trecho se situa o elevado Paulo de Frontin, para onde convergem, no seu início, o tráfego procedente da Praça da Bandeira, pela rampa de entrada, e o tráfego procedente de São Cristovão, pelo elevado Rufino Pizarro.

1º Problema:

Embora, hoje, o tráfego procedente de São Cristovão seja insignificante, frente ao procedente da Praça da Bandeira, nota-se, no horário de pico, um gargalo resultante da redução de quatro para duas faixas na confluência das duas correntes de tráfego.

Solução:

O sistema de controle poderá disciplinar o acesso ao elevado Paulo de Frontin, limitando a demanda ao valor da capacidade efetiva.

Trecho Rio Comprido - Cosme Velho

Este trecho se estende do corte A-A, da figura IV.1, até a entrada da galeria L2, contendo a galeria R2.

1º Problema:

Atualmente o acesso à via pelo Rio Comprido está interditado devido ao gargalo que provocava na entrada da galeria R2.

O gargalo surgia nas horas de tráfego intenso, devido à falta de espaçamento suficiente entre os veículos procedentes do elevador Paulo de Frontin. Isto ocorria porque a galeria R2 oferece apenas duas faixas de tráfego.

Solução:

Se forem mantidas duas faixas e acostamento nas galerias R2 e L2, o sistema de controle disciplinará a entrada de veículos procedentes do Rio Comprido, introduzindo-os na faixa adjacente. Para a via elevada Paulo de Frontin, tudo se passará como se houvesse um obstáculo momentâneo na faixa da direita.

Se, a exemplo do sentido de tráfego 1, o acostamento for eliminado e a pista dividida em três faixas, os veículos procedentes do Rio Comprido terão acesso direto à faixa da

direita. O sistema de controle atuará periodicamente neste acesso em função do acesso que existe no Cosme Velho, que veremos a seguir.

2º Problema:

Experiências realizadas na rampa descendente de acesso à galeria L2 do túnel demonstraram que, controlando-se este acesso com um sinal que interrompa momentaneamente a saída do acesso, obtém-se maior fluxo e menor número de acidentes. Isto foi feito com um sistema de controle de malha aberta.

Solução:

O sistema de controle, proposto no capítulo III, sendo de malha fechada e considerando as condições de tráfego ao longo de toda a via, realizará esta função com melhores resultados.

Trecho Cosme Velho - Lagoa

Neste trecho estão a galeria L2 e, à sua saída, uma bifurcação, com rampa ascendente à esquerda (viaduto) e rampa descendente, em curva, à direita.

Problema:

Devido às condições de geometria, as retenções provenientes da rampa descendente provocam fortes ondas de choque, com constantes colisões, à saída da galeria L2.

Solução:

O sistema de controle, ao surgir a origem da retenção, sinalizará toda a faixa à montante, controlando a concentração e evitando as colisões.

CONSIDERAÇÕES PARA IMPLEMENTAÇÃO(a) Quanto aos elementos para computação:

- 1.- Levantar as curvas q_{xk} dos trechos uniformes.
- 2 - Fazer este levantamento para condições de pista seca, molhada e outras condições físicas que possam determinar mudanças na curva q_{xk} .
- 3 - Tomar para base do sistema de controle, em cada condição, a curva do trecho que apresentar menor capacidade.
- 4 - Anotar, destas curvas, os valores de k_{ot} , k_j e $q_{m\grave{a}ximo}$.
- 5 - Verificar a melhor distância entre sensores, visto que, para definir a faixa com precisão, os sensores não devem estar muito distantes e, para que, na abertura dos

sinais, durante a regulação da concentração, o primeiro carro do sinal de montante s̄o alcance o ūltimo da fila do sinal de jusante quando este estiver ā velocidade ōtima, os sinais nāo devem estar muito prōximos.

(b) Quanto ā posiçāo de sensores e semāforos:

- 1 - Prover sensores e semāforos juntos ās malhas de trāfego situadas em todas as saídas da via (malhas receptoras). Os sensores fornecerāo elementos para controlar o fluxo de trāfego na via, em funçāo da absorçāo da malha receptora. Os semāforos permitirāo agir sōbre a malha receptora no sentido de dar prioridade ao escoamento da via, quando houver necessidade. Por exemplo, no caso de incēndio no interior de um tūnel.
- 2 - Prover sensores e semāforos em todas as entradas da via. Os sensores informarāo as condiçōes de demanda. Os semāforos atuarāo na regulaçāo ou interrupçāo do fluxo.
- 3 - Prover sensores e semāforos ao longo da via. Os sensores detetarāo as ocorrēncias que levem a corrente de trāfego ā regiāo indesejāvel da curva qxk. Os semāforos sinalizarāo as faixas, de acōrdo com a subrotina em uso pelo computador do sistema.

(c) Quanto à operação da via:

1 - Uma via expressa, ou túnel, envolvem altos custos de construção e manutenção, sendo destinados a reduzir espaço e/ou tempo. Assim devem estar, o mais possível, em condições ótimas de transferência. Não devem ser usados, portanto, como "*caixas de acumulação*" para o excesso de veículos que a malha receptora não teve capacidade de absorver; de outra forma, a eficiência da via estaria prejudicada.

Isso significa que os gargalos impostos nas saídas da via sob controle devem ser imediatamente transferidos para as suas entradas, de modo a manter as condições de concentração ótima ao longo da via.

O sistema aqui proposto limita a demanda ao valor da capacidade efetiva.

2 - A admissão de veículos pelas rampas distribuídas ao longo da via, quando o tráfego for intenso, será feita interrompendo-se momentaneamente o tráfego na faixa da via que lhes é adjacente. Esta admissão representará, para a faixa adjacente, um obstáculo; sendo tratada como tal pelo sistema. Ao abrir o sinal para a rampa, será interrompido o tráfego na faixa adjacente.

Este tratamento, na admissão de veículos procedentes das

das rampas, se justifica por que o sistema de controle, procurando manter a concentração no valor ótimo, não permite a existência de espaçamento suficiente para a penetração de veículos na corrente de tráfego da via. Nessas condições, qualquer veículo que penetrasse na corrente de tráfego, sem que essa fosse interrompida, ocasionaria um aumento da concentração, levando-a à região indesejável da curva $q \times k$.

PERSPECTIVAS PARA TRABALHOS FUTUROS

- (1) Aperfeiçoamento no algoritmo do sistema;
- (2) Estudo dos retardos necessários à otimização da admissão de veículos pelas rampas.
- (3) Influência do sistema, como parâmetro, no dimensionamento do número mínimo de faixas, em vias expressas e túneis; tendo em vista que sua eficiência é maior para vias com três faixas ou mais.
- (4) Otimização da distância entre conjuntos sensores - semáforos para evitar ondas de choque ao serem abertos os semáforos e permitir rápida detecção de ocorrência com identificação da faixa. A primeira condição limita a distância mínima, a segunda limita a distância máxima.

Na segunda condição deve ser analisado o compri-

mento médio da fila que se forma atrás de um obstáculo, até que os motoristas, na fila, percebam que se trata de uma obstrução e comecem a procurar sair da fila. A partir deste momento, as outras faixas começarão a ser atingidas e o sistema não poderá identificar, com precisão, qual a faixa obstruída; só sendo en tão isto possível através do CCTV.

APÊNDICE A

Um programa simplificado para controle de uma via com uma entrada e uma saída.

Este programa foi escrito e testado na TI-59 (Texas-Instruments).

	000	2	20 Lb1 "GT0"	
	002	4	12 ST0 R _S *	(00)
c	006	5	016 ST0 R _V *	(40)
	011	3	<20 If flg 3, "1/x">	
	014	2	GT0 "lnx"	
a	016	5	026 ST0 R _V *	(40)
	021	3	<20 If flg 2, "1/x">	
	024	2	GT0 "lnx"	
b	026	5	006 ST0 R _V *	(40)
	031	3	<20 If flg 1, "SUM">	
	034	2	GT0 "lnx"	
	036	2	20 Lb1 "1/x"	
	038	7	RCL R _S *-1=ST0 R _S *	(00)
	045	2	GT0 20 ind R _V *	(40)

047	2	20 Lbl "EE"	
049	2	RCL 20 ind R_k^*	(26)
051	2	STO 20 ind R_D^*	(25)
053	2	20 Lbl "SUM"	
055	1	20 CP	
056	7	RCL $R_S^*-1=STO R_S^*$	(00)
063	2	<20 x=t, "GTO">	
065	2	GTO 20 ind R_V^*	(40)
067	2	20 Lbl "lnx"	
069	6	RCL $R_S^*+12 \underline{\Delta}$	(00)
075	2	STO R_D^*	(25)
077	4	+ 33 $\underline{\Delta}$	
081	2	STO R_k^*	(26)
083	2	RCL 20 ind R_k^*	(26)
085	1	x $\overset{\rightarrow}{\neq}$ t	
086	2	RCL 20 ind R_D^*	(25)
088	2	<20 x \geq t, "EE">	
090	2	RCL 20 ind R_k^*	(26)
092	2	STO 20 ind R_D^*	(25)
094	2	RCL R_{OT}	(27)
096	2	<20 x \geq t, "SUM">	
098	2	RCL R_J	(28)
100	1	x $\overset{\rightarrow}{\neq}$ t	
101	2	<20 x \geq t, "÷">	
103	2	20 Lbl "20 Nop"	
105	3	1 STO 20 ind R_S^*	(00)
α_3 108	5	389 STO R_3	(32)

α_2	113	5	394 STO R ₂	(31)
α_1	118	5	399 STO R ₁	(30)
	123	2	GTO "✓ x"	
	125	2	20 Lbl "CE"	
	127	2	RCL R _L	(36)
	129	18	3,6x(RCL 20 ind R _k [*] -RCLR _{OT})xRCLR _L ÷RCLR _Q	(26) (27) (36) (29)
	147	2	STO R _{OT}	(45)
	149	1	x $\vec{\neq}$ t	
	150	2	20 Lbl "20 Prd"	
	152	2	RCL R _C	(38)
	154	3	<INV 20 x $\underline{\geq}$ t, "20 Prd">	
	157	2	STO R _{TIMER}	(39)
	159	2	20 Nop	
	161	2	GTO "SUM"	
	163	2	20 Lbl "✓ x"	
	165	2	RCL R _V [*]	(40)
	167	1	x $\vec{\neq}$ t	
	168	5	016 STO R _T	(37)
	173	3	<20x=t,20 ind R ₃ >	(32)
	176	5	026 STO R _T	(37)
	181	3	<20x=t,20 ind R ₂ >	(31)
	184	2	GTO 20 ind R ₁	(30)
	186	2	20 Lbl "÷"	
β_3	188	5	404 STO R ₃	(32)
β_2	193	5	408 STO R ₂	(31)
β_1	198	5	412 STO R ₁	(30)
	203	2	GTO "✓ x"	

205	2	20 Lbl "x \vec{z} t"	
207	3	1 STO R _{AL}	(42)
210	3	0 STO R _F *	(41)
213	2	20 St flg 0	
215	3	<20 If flg 3, "INV">	
218	3	<20 If flg 7, "X">	
221	2	GTO "20 fix"	
223	2	20 Lbl "INV"	
225	3	4 STO R _F *	(41)
228	2	20 Lbl. "20 cos"	
230	7	RCL R _S *-1=STO R _S *	(00)
237	2	RCL R _J	(28)
239	1	x \vec{z} t	
240	7	RCL R _k *-1=STO R _k *	(26)
247	2	RCL 20 ind R _k *	(26)
249	2	<20 x $\underline{\geq}$ t, "+">	
251	3	<20 If flg 0, "20 tg">	
254	2	GTO "20 sen"	
256	2	20 Lbl "X"	
258	2	20 St flg 2	
260	7	RCL R _F *+2=STO R _F *	(41)
267	2	GTO "20 tg"	
269	2	20 Lbl "+"	
271	3	<20 If flg 0, "X">	
274	2	GTO "20 fix"	

276	2	20 Lbl "20 tg"	
278	3	INV 20 St flg 0	
281	2	GTO "20 cos"	
283	2	20 Lbl "20 fix"	
285	2	20 St flg 1	
287	7	RCL $R_F^*+1=STO R_F^*$	(41)
294	2	20 Lbl "20 sen"	
296	3	<20 If flg 7, "20 Eng">	
299	3	<20 If flg 3, "20 Exc">	
302	1	R/S	
303	2	GTO "20 Op"	
305	2	20 Lbl " "20 Eng"	
307	7	RCL $R_S^*+1=STO R_S^*$	(00)
314	7	RCL $R_k^*+1=STO R_k^*$	(26)
321	3	INV 20 St flg 7	
324	1	R/S	
325	2	GTO "20 Op"	
327	2	20 Lbl "20 Exc"	
329	7	RCL $R_S^*+2=STO R_S^*$	(00)
336	7	RCL $R_k^*+2=STO R_k^*$	(26)
343	1	R/S	
344	2	GTO "20 Op"	

	346	2	20 Lbl "20 Op"	
	348	3	<20 If flg 5, "STO">	
	351	3	<20 If flg 6, "RCL">	
	354	3	20 Nop	
	357	2	GTO "20 Nop"	
	359	2	20 Lbl "STO"	
	361	8	RCL R_F^{*} + RCL $R_i =$ STO R_F^{*}	(41) (43) (41)
	369	3	SBR 20 ind R_F^{*}	(41)
	372	2	GTO "SUM"	
	374	2	20 Lbl "RCL"	
	376	8	RCL R_F^{*} + RCL $R_a =$ STO R_F^{*}	(41) (44) (41)
	384	3	SBR 20 ind R_F^{*}	(41)
	387	2	GTO "SUM"	
α_3	389	3	1 STO R_{per_3}	(35)
	392	2	GTO "CE"	
α_2	394	3	1 STO R_{per_2}	(34)
	397	2	GTO "CE"	
α_1	399	3	1 STO R_{per_1}	(33)
	402	2	GTO "CE"	

β_3 404 2 29 St flg 3

406 2 GT0 "x $\vec{\leftarrow}$ t"

β_2 408 2 29 St flg 7

410 2 GT0 "x $\vec{\leftarrow}$ t"

β_1 412 2 GT0 "x $\vec{\leftarrow}$ t"

414 Subrotina incêndio

" "

" "

" "

" "

" "

" "

421 " "

422 Subrotina Acidente

" "

" "

" "

" "

" "

" "

429 " "

DEFINIÇÃO DOS REGISTROS DE MEMÓRIA USADOS
NO PROGRAMA DE CONTRÔLE

D	C	E	A	
1/13	4/16	7/19	10/22	faixa 1
2/14	5/17	8/20	11/23	faixa 2
3/15	6/18	9/21	12/24	faixa 3
P			P	

Na figura A.1 as frações representam R_S/R_D associadas a cada conjunto sensor/sinal.

SIMBOLOGIA:

R = registro de memória

$R_{\text{índice}}$ = define o conteúdo do registro no programa

$R_{\text{índice}}^*$ = contém um endereço indireto

$R_{\text{índice}}()$, $R_{\text{índice}}^*()$ = o parêntesis contém o endereço do registro escolhido para a função que o índice e o asterisco definem.

Os índices dos registros foram escolhidos de forma a sugerir a variável ou constante que o registro representa.

A seguir apresentamos a relação dos registros (1ª coluna), seu conteúdo (2ª coluna) e os valores do conteúdo (3ª coluna).

REGISTRO	CONTEÚDO	VALORES DO CONTEÚDO
R _S [*] (00)	enderêço indireto dos registros R _S	01 a 12
R _S (01-12)	algarismo correspondente a cada código luminoso dos semáforos	0 = sinal aberto 1 = sinal fechado 2 = sinal fechado com seta \bar{a} direita 3 = sinal fechado com seta \bar{a} esquerda 4 = sinal fechado com seta \bar{a} esquerda e \bar{a} esquerda 5 = sinal amarelo intermitente (obstáculo na faixa)
R _D (13-24)	valores da concentração na varredura anterior $K(t-\delta t)$	$0 \leq k(t-\delta t) \leq k_j$
R _D [*] (25)	enderêço indireto dos registros R _D	13 a 24
R _K [*] (26)	enderêço indireto dos registros R _K	46 a 57
R _{OT} (27)	valor ótimo da concentração, k_{ot}	depende da curva q_{xk} da via.
R _J (28)	valor máximo da concentração, k_j	depende da curva q_{xk} da via.
R _Q (29)	valor do fluxo que se deseja obter com o controle da concentração. No nosso caso é $q_{m\bar{a}x}$.	depende da curva q_{xk} da via
R ₁ (30)	enderêço indireto auxiliar no programa	no programa 399, 412
R ₂ (31)	enderêço indireto auxiliar no programa	no programa 394, 408
R ₃ (32)	enderêço indireto auxiliar no programa	no programa 389, 404

REGISTRO	CONTEÚDO	VALORES DO CONTEÚDO
R_{per1} (33)	idêntico ao de R_S . 0 periférico sinalizará a faixa 1	idênticos aos de R_S
R_{per2} (34)	idêntico ao de R_S . 0 periférico sinalizará a faixa 2	idênticos aos de R_S
R_{per3} (35)	idêntico ao de R_S . 0 periférico sinalizará a faixa 3	idênticos aos de R_S
R_L (36)	distância entre semáforos (consideramos iguais no programa)	procurar na via o valor ótimo
R_T (37)	valores auxiliares no processamento dos dados	depende do processamento
R_C (38)	tempo lido no cronômetro (simulação)	variável (da ordem de segundos)
R_{TIMER} (39)	valor do retardo fixado no timer do periférico	variável (da ordem de segundos)
R_V^* (40)	endereço indireto do teste da faixa seguinte (auxiliar)	006, 016 e 026 no programa
R_F^* (41)	valor de definição da subrotina a usar	1, 2, 3, 4, 5, 6 e 7 no programa
R_{AL} (42)	dispara alarme, após resposta do CCTV (simulação)	1 no programa
R_i (43)	constante de incêndio a ser somada a R_F^*	414 no programa
R_a (44)	constante de acidente a ser somada a R_F^*	422 no programa
$R_{\Delta t}$ (45)	retardo calculado para corrigir concentração	dado pela expressão (III.20)

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. GAZIS, D. C. - Traffic Science, New York, John Wiley & Sons, 1965.
2. GAZIS, D. C., HERMAN, R., POTTS, R. B. - Car-Following Theory of Steady-State Traffic Flow, Oper. Res., 7: 4, 499-505, 1959.
3. LIGHTHILL, M. J., WHITHAM, G. B. - On Kinematic Waves II. A Theory of Traffic Flow on Long Crowded Roads, London, Proc., Royal Soc., Series A, 229: 1178, 317-345, 1955.
4. RICHARDS, P. I. - Shock Waves on the Highway, Oper. Res., 4: 1, 42-51, 1956.
5. HABERMAN, R. - Mathematical Models, Prentice-Hall, 1977.
6. MESAROVIC, M. D., MACKO D., TAKAHARA, Y., Two Coordination Principles and their Application in Large Scale Systems Control, Great Britain, Pergamon Press, Automatica, 6: 261-270, 1970.
7. SHINNERS, S. M. - Techniques of System Engineering, McGraw-Hill Book Company, 1967. 21-22 pp.
8. Monde Souterrain, 118: 63 p.

9. PIPES, L. A. - An Introduction to Traffic Flow Theory, Washington, Highway Research Board, Special Report, 79: 3-35, 1964.
10. GREENSHIELDS, B. D. - A Study of Traffic Capacity, Proc., Highway Research Board, 1935. 14 p.
11. GREENBERG, H. An Analysis of Traffic Flow, Oper. Res., 7: 1, 79-85, 1959.
12. NEWELL, G. F. - Instability in Dense Highway Traffic, a Review, London, Joyce Almond, Proceedings of the Second International Symposium on the Theory of Traffic Flow, 73-83, 1963.
13. Manual de Capacidade das Rodovias, Rio de Janeiro, Departamento de Estradas de Rodagem do Estado da Guanabara, tomo I, 1973.
14. EDIE, L. C., FOOTE, R. S. - Experiments of Single-Lane Flow in Tunels, Theory of Traffic Flow, Amsterdam, R. Herman, Elsevier, 1961.
15. GAZIS, D. C., Traffic Control: From Hand Signals to Computers, Proceedings of the IEEE, 59(7): 1090-1099, 1971.
16. DUCKSTEIN, L., Control of Traffic in Tunels to Maximize Flow, Highway Research Record, 154: 1-23, 1966.

17. FOOTE, R. S., Single Lane Traffic Flow Control, London, Joyce Almond, Proceedings of the Second International Symposium on the Theory of Traffic Flow, 1963.
18. FOOTE, R. S., CROWLEY, K. W. - Developing Density Controls for Improved Traffic Operations, Highways Research Record, 154: 24-37, 1966.
19. CHEN, C. T. - Introduction to Linear System Theory, Holt, Rinchart and Winston, Inc., 1970.
20. Contrôle de Tráfego Urbano Através de Computador, Rio de Janeiro, Informativo COBRA (circulação interna), ano 3, 27: 7, 1980.
21. MELLO SAD., M. R. - Freeway ou Via Expressa, Rio de Janeiro, Revista SEAERJ, ano VIII, 11: 12-17, 1978.
22. Fases na Implantação do Sistema de Computador para Contrôle de Tráfego Urbano, Rio de Janeiro, Informativo COBRA (circulação interna), ano 3, 29: 7, 1980.