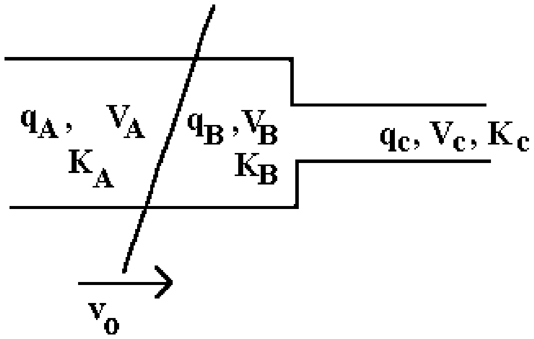
EXERCÍCIO: ONDAS DE CONGESTIONAMENTO

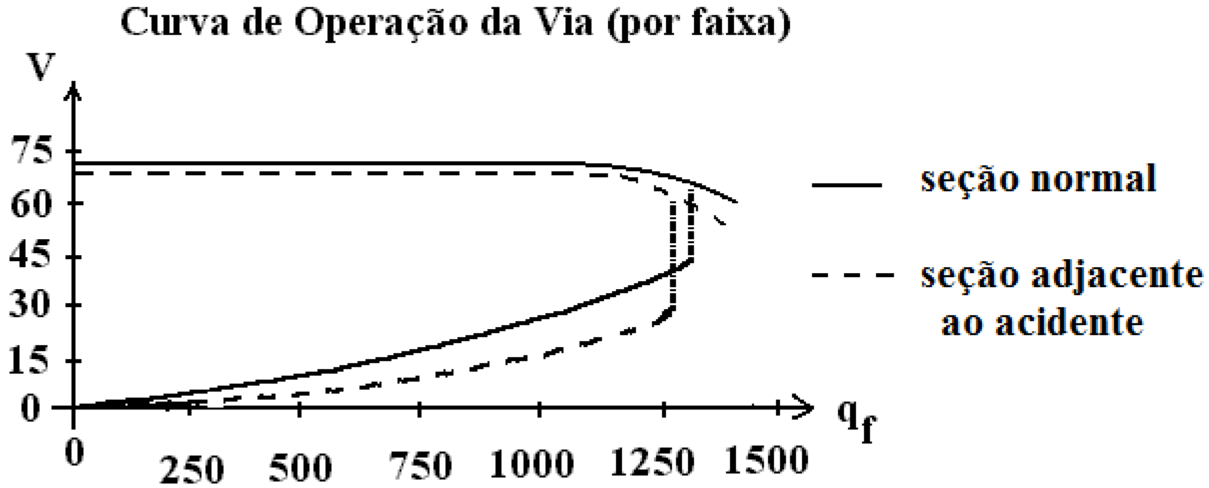
Um acidente na via representada abaixo provocou a obstrução de uma das faixas (gargalo) por 15 minutos. A demanda (fluxo) normal é 2315v/hr.



Parâmetros: antes do acidente: curva de operação (abaixo) para cada faixa ...
depois do acidente (por 15 minutos): de 2 faixas para 1 faixa somente.

Admitindo a eficiência máxima de dissipação da fila após o acidente, determinar:

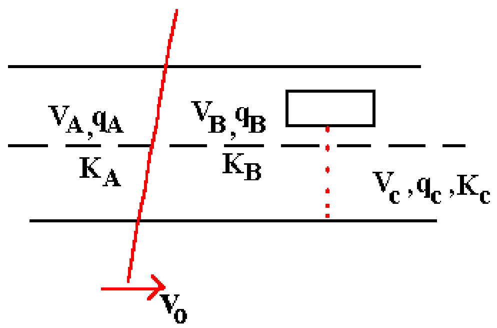
- as velocidades normais e as velocidades no congestionamento;
- a velocidade de propagação do congestionamento;
- a duração do período de congestionamento;
- as filas e atrasos máximos gerados pelo congestionamento.

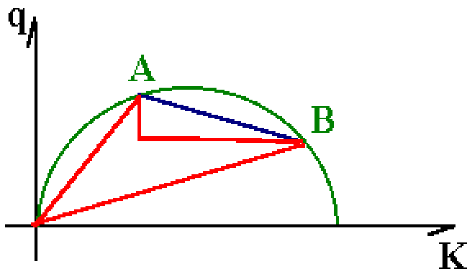


(velocidade de fluxo livre= 71 km/h; capacidade normal= 1450 v/h.fx com velocidade de 60 km/h; fluxo de saturação= 1350 v/h.fx com velocidade de 40 km/h ao sair da fila; com acidente: velocidade de fluxo livre= 69 km/h; capacidade= 1400 v/h.fx com velocidade de 50 km/h; fluxo de saturação= 1300 v/h.fx com velocidade de 35 km/h).

Qual seria a solução obtida com base na aproximação linear de Greenshields? Admita parâmetros medidos ⇒ K_j=151vh/km e V_f=71,4km/hr.

SOLUÇÃO DO EXERCÍCIO





As equações de continuidade na seção móvel que correspondem à onda de congestionamento são:

$\tilde{q}_A = K_A(V_A - w_o)$, não congestionado

$\tilde{q}_B = K_B(V_B - w_o)$, congestionado

$$\therefore \tilde{q}_A = \tilde{q}_B \Rightarrow K_A(V_A - w_o) = K_B(V_B - w_o)$$

$$\Rightarrow w_o = \frac{q_A - q_B}{K_A - K_B} \quad (= \frac{\Delta q}{\Delta K})$$

que é a velocidade da onda de congestionamento.

Note que a velocidade foi considerada positiva para frente, embora usualmente a onda de congestionamento propage-se para trás (isto é, seja negativa). Se for convencionado que a velocidade para trás é positiva, ter-se-ia $w_o = -\frac{\Delta q}{\Delta K}$.

Para a via real cuja curva de operação foi dada graficamente, todas as observações são aplicadas da mesma forma, podendo-se ler diretamente do gráfico os valores que substituem os cálculos baseados na hipótese de Greenshields. A curva de operação fornecida é descontínua e exibe o efeito do fenômeno das duas capacidades, mostrando uma queda da capacidade por faixa de 1400 v/h para 1300 v/h após a formação de filas na via (na seção com o acidente). Esta característica não altera, no entanto, o método de análise da operação e da formação e dissipação das filas.

A capacidade normal da via com 2 faixas é de 2900 v/h. Com saturação, o fluxo máximo escoado com 2 faixas passaria a 2700 v/h e com 1 faixa seria de 1300 v/h.

Na situação inicial (A), tem-se operação em fluxo normal ($Q = 2311\text{v/h} < C$), sendo:

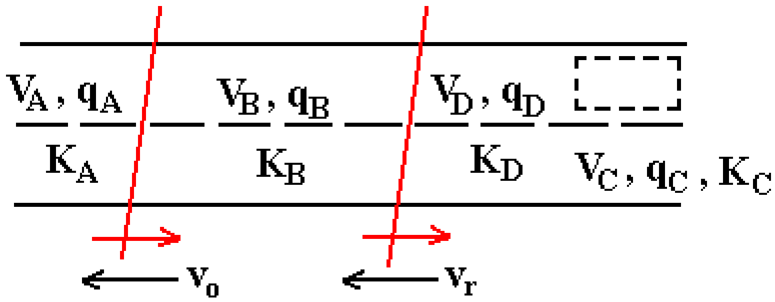
$$q = Q = 2315\text{v/h} \Rightarrow q_f = \frac{2315}{2} = 1157{,}5\text{v/h} \therefore V \cong 70\text{km/h} \Rightarrow K = \frac{2315}{70} = 33\text{v/km}$$

Com uma faixa obstruída pelo acidente, haveria novamente a formação de um gargalo ($Q > C = 1400\text{v/h}$ na seção com o acidente) que provocaria a saturação da via. No gargalo (C), a dissipação da fila com uma faixa ocorreria com:

$$q = C' = S = 1300\text{v/h} \Rightarrow V \cong 30\text{km/h} \Rightarrow K = \frac{1300}{30} = 43{,}3\text{v/km}$$ (em uma faixa).

Na fila formada pelo gargalo, com o fluxo imposto pelo gargalo e duas faixas de tráfego (B), ter-se-ia:

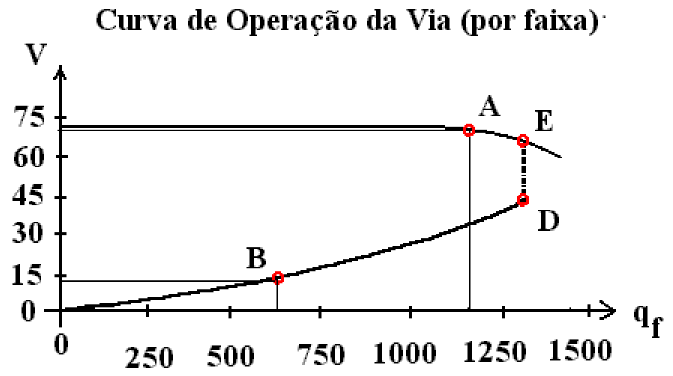
$$q = C' = 1300\text{v/h} \Rightarrow q_f = \frac{1300}{2} = 650\text{v/h} \therefore V \cong 15\text{km/h} \Rightarrow K = \frac{1300}{15} = 86{,}7\text{v/km}.$$

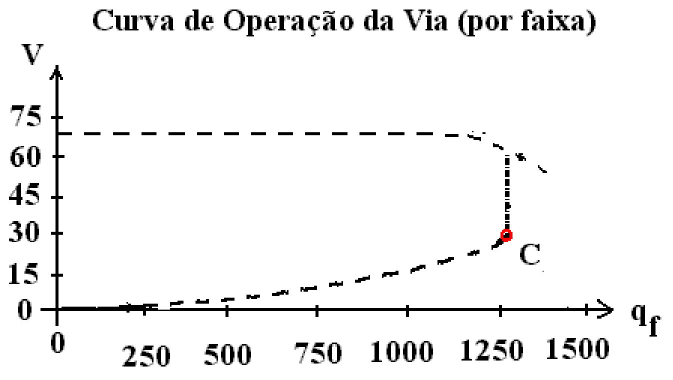


A velocidade de propagação da onda de congestionamento (entre A e B) seria:

$$w_c = \frac{\Delta q}{\Delta K} = \frac{2315 - 1300}{33 - 86{,}7} = -18{,}9\text{km/h}$$ (para trás),

e, em 15 minutos (tempo de remoção do acidente), o congestionamento atingiria uma extensão de 4,7 km e teria n=4,7.86,7=407,5 veículos..





Com a liberação da faixa obstruída pelo acidente, o escoamento da fila poderá utilizar as duas faixas. Admitindo normalização imediata do tráfego, usando a curva normal de operação no regime de fluxo forçado (D), tem-se:

$$q = C'' = S = 2.1350 v/h = 2700 v/h \Rightarrow V \cong 40 km/h \Rightarrow K = \frac{2700}{40} = 67.5 v/km\,.$$

A velocidade de propagação da onda de recuperação do congestionamento (entre B e D) seria:

$$w_s = \frac{\Delta q}{\Delta K} = \frac{2700-1300}{67{,}5-86{,}7} = -72{,}9 km/h$$ (também para trás),

e o tempo necessário para alcançar a onda de congestionamento original, adotando como referência de tempo o início do acidente, seria obtido como

$$w_c.t_r = w_s.(t_r - t_a) \Rightarrow t_r = \frac{w_s}{w_s - w_c}.t_a$$

$$\therefore t_r = \frac{-72{,}9}{-72{,}9-(-18{,}8)}.0{,}25 = 0{,}337h$$ (20,2min após o acidente)

tendo sido afetada uma extensão final de 6,3 km (adotando como referência de tempo o início da recuperação, o tempo necessário para dissipar a fila seria $t_S = t_r - t_a = 0{,}337 - 0{,}25 = 0{,}087h$ =5,2min).

Essa avaliação simples é discutível porque o estado D na saída da fila não é uma situação de equilíbrio (o mesmo ocorre com C na saída da fila; mas não no interior da fila). Adiante da saída fila (inicialmente D, depois acelerando até atingir E), a operação em fluxo normal seria atingida (em E, após a aceleração dos veículos) e ter-se-ia

$$q = 2700 v/h \Rightarrow q_f = \frac{2700}{2} = 1350 v/h \therefore V \cong 65 km/h \Rightarrow K = \frac{2700}{65} = 41{,}5 v/km$$

(que é uma situação de equilíbrio). Outro ponto discutível é ter tomado D na curva normal de operação (e não numa curva afetada, mesmo parcialmente, pelo acidente). Na verdade, a transição para a curva normal decorre de efeitos reais (a remoção do veículo acidentado, a retirada das equipes de atendimento, a limpeza dos detritos, a retirada dos dispositivos de sinalização temporária, dos demais vestígios do acidente, etc ...). São estes elementos reais que determinam a curva de operação. Portanto, a estimativa feita é uma das opções deavaliação simples.

No final da dissipação da fila, quando a onda de recuperação alcança a onda de propagação do congestionamento, há uma nova descontinuidade nas condições de operação (entre A e D). A propagação desta descontinuidade corresponde à volta das condições normais de operação na via (A). A velocidade da onda de normalização de tráfego a D é $w_n = \frac{2700-2315}{67{,}5-33} = 11{,}2 \, {}^{km}\!/_{h}$, desta vez para frente!

Novamente, esta avaliação simples é discutível porque D não é uma situação de equilíbrio. A aceleração de D para E toma apenas alguns segundos e alternativamente a velocidade de propagação da onda de normalização (entre A e E) seria avaliada por:

$$w_n = \frac{\Delta q}{\Delta K} = \frac{2700 - 2315}{41{,}5 - 33} = 45{,}3 km/h$$ (para frente).

(haveria ainda uma onda de homogeinização, incorporação/dispersão do pelotão, que faria o fluxo escoado a partir do gargalo voltar às condições normais, sem o acidente). Na verdade, a situação adiante de D forma um trecho de dispersão e/ou aceleração (o leque de rarefação) que não é bem representada pelos esquemas simples adotados. E a transição A->E é, após poucos segundos, uma melhor descrição que A->D.

Note-se que todas as transições foram consideradas instantâneas (embora, na realidade, tenham de ocorrer com desacelerações e acelerações finitas), incluindo a transição entre D e E (efetivamente, todas estas transições durariam poucos segundos). Note-se também que a velocidade de propagação de todas as transições foi estimada com a mesma expressão de w_o (e interpretada como w_c, w_s ou w_n).

É interessante discutir o uso das fórmulas de estimativa de filas e comparar com os resultados obtidos até aqui. Note a extensão da fila no instante da remoção do acidente (2,6 km) equivale a 338 veículos (a densidade na fila é 130 v/km), enquanto o desbalanceamento entre demanda e fluxo é de $(2315 - 1300).0{,}25 = 253{,}75$ veículos.

A correção da dimensão física, adotando o comprimento médio do veículo igual a 8 metros e utilizando a velocidade de 70 km/h na chegada normal dos veículos, daria:

$$\hat{n} = \frac{\tilde{n}}{1 - Q_m . \ell_v / V} = \frac{253{,}75}{1 - 2315/2 . 0{,}008/70} = 292{,}4v .$$

No entanto, a densidade de veículos na fila foi avaliada em 86,7v/km (43,33v/km/fx) e o espaçamento médio entre veículos na fila é $\bar{e} = \frac{1000}{43{,}33} = 23m$, ao invés do comprimento médio dos veículos adotado, que daria a correção:

$$\hat{n} = \frac{\tilde{n}}{1 - Q_m . \ell_v / V} = \frac{253{,}75}{1 - 2315/2 . 0{,}023/70} = 409{,}5v$$ (o valor anteriormente estimado).

Note que a onda de congestionamento desloca-se a 18,9 km/h na direção contrária ao fluxo, fazendo com que a velocidade e o fluxo de chegada vistos no final da fila sejam majorados, tendo-se $\hat{V}_{rn} = 70 + 18{,}9 = 88{,}9 km/h$ e $\hat{Q}_{rn} = 33.(70 + 18{,}9) = 2933{,}7 v/h$. Este fato não altera este resultado porque $Q/V = \hat{Q}_{rn} / \hat{V}_{rn} = K$ (33 v/km, nos dois casos).

A extensão atingida pela fila ou o tempo de dissipação da fila poderiam também ser corrigidos de forma correspondente à fórmula usual:

$$\tilde{t}_S = \frac{\tilde{n}_b}{S-Q} = \frac{253{,}75}{2700-2315} = 0{,}659\text{h} \text{ ou } \hat{t}_S = \frac{\hat{n}_b}{S-Q} = \frac{409{,}5}{2700-2315} = 1{,}064\text{h} .$$

Estes resultados não são corretos porque, agora, ignorar o movimento da seção de início e fim da fila não é inócuo. A estimativa pode ser melhorada considerando a diferença de densidade e velocidade na dissipação e formação de fila. Com esta consideração, o fluxo de chegada no final da fila seria

$$\hat{Q} = 33.(70+18{,}9) = 86{,}7.(15+18{,}9) = 2933{,}7\text{v/h}$$

e o fluxo de saída no topo da fila seria

$$\hat{S} = 86{,}7.(15+72{,}9) = 67{,}5.(40+72{,}9) = 7620{,}9\text{v/h} ,$$

podendo-se obter uma estimativa melhorada do tempo de dissipação da fila como

$$t_S = \frac{\hat{n}}{\hat{S}-\hat{Q}} = \frac{409{,}5}{7620{,}9-2933{,}7} = 0{,}087\text{h}$$ (ou 0,25+0,0,87=0,337h após o acidente).

Também pode ser notado que, considerando o tempo de normallzação após a dissipação $t_p = z_m / w_n$ com $w_n = 11{,}2\,\text{km/h}$ tem-se $t_p = 6{,}3/11{,}2 = 0{,}5625\text{h}$ e um tempo total de limpeza do acidente igual a $t_\ell = 0{,}087 + 0{,}5625 = 0{,}645\text{h}$, similar ao tempo de dissipação estimado com o modelo de fila vertical (não se verifica com $w_n = 45{,}3\,\text{km/h}$, uma estimativa mais adequada da velocidade da onda de normalização).

Há um caso, entretanto, em que as correções usuais são parciais: a estimativa da extensão máxima atingida pela fila z_m (ou da fila máxima “fictícia” correspondente n_m).

A fórmula usual é $n_m = \dfrac{n_b}{1-Q/S}$ (que adiciona as chegadas durante o tempo de dissipação t_S). No exemplo, a estimativa seria $n_m = \dfrac{n_b}{1-Q/S} = \dfrac{407{,}5}{1-2311/2700} = 2828\text{v}$ (1414v/fx ou 11,3km com 8m/v) ou $\hat{n}_m = \dfrac{n_b}{1-\hat{Q}/\hat{S}} = \dfrac{407{,}5}{1-2930{,}4/7620.9} = 662\text{v}$ (331v/fx ou 7,65km com 23,1m/v), ambos diferentes do valor anteriormente estimado (6,3km). No caso, as estimativas são distintas porque são medidas com conceitos distintos. A fórmula correspondente é $n_m = \dfrac{n_b}{1 - w_r/w_o} = \dfrac{n_b}{1-(Q - q_B)/(S - q_B).(1-K_S/K_B)/(1-K_Q/K_B)}$, corrigindo pelas densidades consideradas (o que exigiria obter estes valores).

Pode-se ver que a aplicação criteriosa dos termos de correção chega a resultados similares à análise da propagação e dissipação das filas.

A análise demonstra, portanto, quais aspectos teriam de ser considerados para melhorar a precisão da estimativa obtida, se necessário.

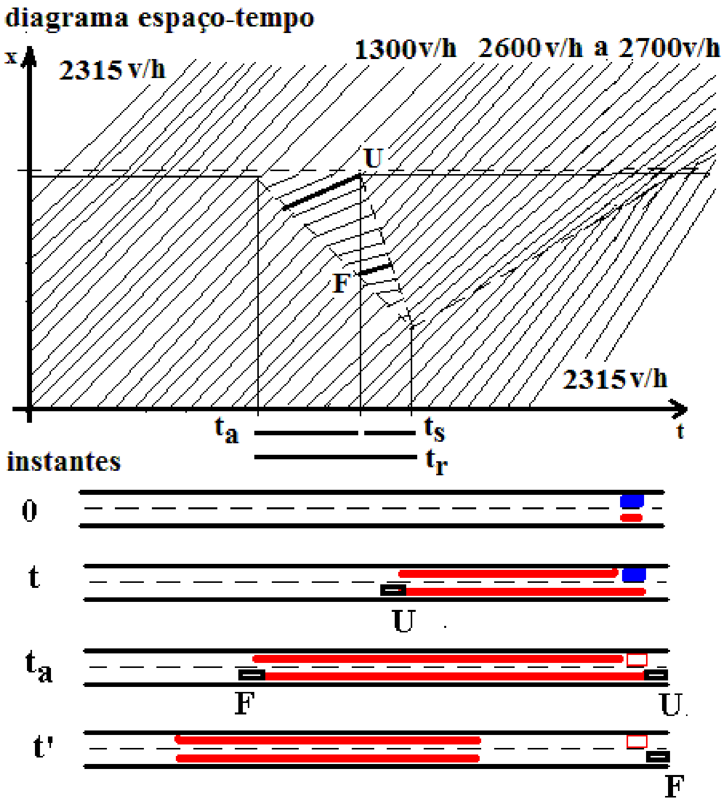
Para estimativa das filas, apenas a correção física usando o espaçamento médio entre veículos seria suficiente. Quando a fila é compacta (como nas filas de semáforos), usar o comprimento do veículo é uma aproximação em geral suficiente.

Para os demais casos, a análise usual é uma aproximação menos precisa e não é possível melhorar as estimativas sem avaliar as velocidades das ondas de congestionamento e de recuperação e as condições de operação do tráfego.

Da mesma forma, é possível avaliar o “atraso”

atraso=diferença entre o tempo normal e o tempo com congestionamento.

Uma representação detalhada em que se vê as trajetórias de cada veículo em condições normais (sem congestionamento) e percorrendo as filas (com congestionamento) pode ser feita utilizando o diagrama espaço-tempo (ver representação abaixo, ignorando a aceleração adiante do gargalo). O atraso é obtido comparando uma trajetória normal e uma trajetória com congestionamento.



O atraso máximo é mais difícil de avaliar. Identificar qual veículo tem atraso máximo depende dos valores das velocidades do fluxo e das ondas formadas ...

O veículo F que chega no instante de fila máxima percorrerá uma extensão no congestionamento menor, dado que há dissipação de fila durante seu movimento, enquanto que o veículo U que passa pela seção obstruída no instante da remoção do acidente teve todo o percurso congestionado mas chegou com uma extensão de fila menor. Uma análise genérica teria de comparar casos como estes.

Para o veículo U que é o último a passar pela seção com o acidente (qualquer veículo anterior tem atraso menor), o veículo percorre uma distância x_U com V_B, tem-se

$$x_U = V_B.t_U = w_c.(t_a - t_U) \Rightarrow t_U = \frac{w_c}{V_B + w_c}.t_a = \frac{18{,}9}{15+18{,}9}.0{,}25 = 0{,}1391\,\text{hr}$$

$$\therefore\ x_U = 15.0{,}1391 = 2{,}0858\,\text{km} \Rightarrow d_U = {}^{x_U}\!/_{V_B} - {}^{x_U}\!/_{V_A} = 0{,}109 \text{ hr } (= 6{,}56\text{min}).$$

Para o veículo F que chega no instante de fila máxima (qualquer veículo posterior percorrerá uma extensão em fila menor), existe uma dissipação de fila enquanto o veículo percorre uma distância x_F na fila (com V_B). Neste caso, tem-se

$$\therefore\ x_F + x_{sF} = L_B \Rightarrow V_B.t_F + w_r.t_F = L_B \Rightarrow t_F = \frac{L_B}{V_B + w_r} = \frac{4{,}7}{15+72{,}9} = 0{,}0535\text{h}$$

$$\therefore\ x_F = 15.0{,}0535 = 0{,}802\text{km} \Rightarrow d_F = {}^{x_F}\!/_{V_B} - {}^{x_F}\!/_{V_A} = 0{,}0420 \text{ hr } (= 2{,}52\text{min})$$

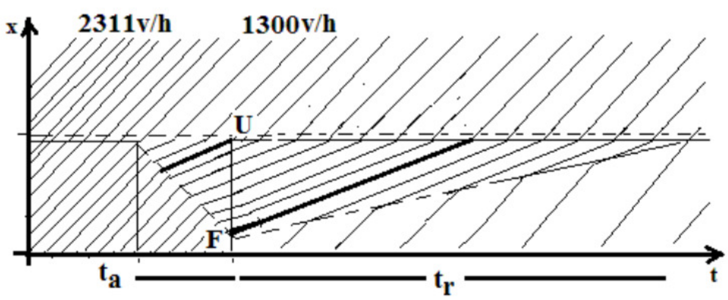
(com t_F referido ao instante da remoção do acidente).

No entanto, note que mesmo quando o trecho mais criticamente congestionado (B) desaparece, a velocidade ainda é menor que a prevalecente antes do acidente e contribuiria para o atraso experimentado pelos veículos (fora do congestionamento).

Tanto as medidas de “atraso” quanto de “fila” poderiam ser mais exigentes ...

Outros aspectos são, entretanto, mais interessantes. Primeiro, os veículos na fila anterior ao veículo U escoaram com o fluxo determinado pelo acidente (1300v/h) enquanto os veículos na fila anterior ao veículo F escoaram com o fluxo na dissipação da fila (admitido como 2700v/h). Segundo, durante o escoamento da fila anterior ao veículo U tinha-se a frente da fila parada no local do acidente enquanto durante o escoamento da fila anterior ao veículo F tinha-se a frente da fila dissipando-se com velocidade 72,9km/h. A fila anterior a U é $x_U = 2{,}0858.86{,}7 = 180{,}4\text{v}$ e, portanto, tem-se $t_U = \frac{180{,}4}{1300} = 0{,}1388\text{h}$. A fila anterior a F é $x_F = n_B = 407{,}5\text{v}$ e escoa com $\hat{S} = 86{,}7.(15+72{,}9) = 7620{,}9\text{v/h}$, tendo-se então $t_F = \frac{407{,}5}{7620{,}9} = 0{,}0535\text{h}$. Estes são os valores obtidos anteriormente e mostram que o tempo em fila pode ser calculado como $t_n = \frac{n}{q_n}$ somente se a frente da fila é estacionária ou considera-se a velocidade da onda correspondente à dissipação da frente da fila (usando $\hat{q}_n$ então, na frente da fila).

A fila também pode diminuir pela redução da demanda (caso usual nos gargalos estruturais, com redução normal da fila) ou por uma combinação de ambos os efeitos.



As estimativas são também diferentes das obtidas com a fórmula de fila regular (no caso nula) e sobre-fila (que inclui o efeito da aleatoriedade na demanda e capacidade). Com o período de sobre-demanda correspondente à duração do acidente, ter-se-ia:

$$X = \frac{2315}{1300} = 1{,}78\,;\ A = 1{,}78 - 1 = 0{,}78\,;\ B = \frac{8.1.1{,}78}{1300.0{,}25} = 0{,}0438$$

$$\Rightarrow n_f = \frac{1300.0{,}25}{2}.\left(0{,}78 + \sqrt{0{,}78^2 + 0{,}0438}\right) = 258\text{v}$$

(superior à estimativa determinística, de 253,5v, pelo efeito da aleatoriedade; note que este resultado implicaria na necessidade de admitir que o fluxo escoado foi 1282v/h, pelo efeito da aleatoriedade, menor que 1300v/h). Este valor seria corrigido para

$$\hat{n} = \frac{\tilde{n}}{1 - Q_m.\ell_v/V} = \frac{258}{1 - 2315/2 . 0{,}008/70} = 297\text{v}.$$

(em função dos parâmetros admitidos), menor que o obtido com a propagação do congestionamento. No entanto, a análise anterior identifica o maior erro na estimativa: a densidade de veículos na fila ($K_n = 86{,}7\ \text{v}/\text{km}$) corresponde a um espaçamento de 23m (ao invés do valor assumido de 8m que corresponde a filas paradas), tendo-se

$$\hat{n} = \frac{\tilde{n}}{1 - Q_m.\ell_v/V} = \frac{258}{1 - 2315/2 . 0{,}023/70} = 416\text{v}$$

(um valor bastante mais próximo da estimativa original de 408v, novamente maior por incorporar um efeito adicional devido à aleatoriedade). Pode-se verificar que, algebricamente, as estimativas são iguais, assumindo os mesmos parâmetros e fluxos.

A vantagem deste esquema alternativo é a simplicidade (não a precisão). Pode-se com facilidade ter uma estimativa da fila e do atraso médios no período (incluindo a propagação e a dissipação das filas geradas pela sobre-demanda) de forma simples:

$$\bar{n} = \frac{1300.0{,}25}{4}.\left(0{,}78 + \sqrt{0{,}78^2 + 0{,}0438}\right) = 129\text{v} \ \text{e}$$

$$\bar{d} = \frac{0{,}25}{4}.\left(0{,}78 + \sqrt{0{,}78^2 + 0{,}0438}\right) = 0{,}099\text{h} = 5{,}95\,\text{min}.$$

Estes comentários são interessantes porque normalmente as estimativas serão obtidas com as fórmulas de fila regular e sobre-fila e, se tanto, com as correções usuais.

Deve-se, portanto, ter consciência do nível de precisão dos resultados que obtidos com os procedimentos simplificados (e, eventualmente, de situações em que é importante utilizar procedimentos mais trabalhosos mas, no entanto, mais precisos).

Por fim, admitindo a hipótese linear de Greenshields, os resultados quantitativos são diferentes, embora os fenômenos qualitativos sejam similares. Nesta análise, será admitida a mesma curva de operação sem e com o acidente.

Com fluxo normal (A): $q_A = 2315$ v/hr , não congestionado, tem-se

$$C_A = \frac{V_f K_j}{4} = 2695{,}4\ {}^{v}\!/_{hr} \Rightarrow \frac{q_A}{C_A} = 85{,}9\%$$ (com fluxo <u>estável</u>)

$$V_A = \frac{V_f}{2}.(1 + \sqrt{1 - {}^{q_A}\!/_{C_A}}) = 49{,}1\ {}^{km}\!/_{h} \text{ e } K_A = \frac{q_A}{V_A} = 47{,}1\ {}^{v}\!/_{km} = 23{,}57\ {}^{v}\!/_{km.fx}.$$

Com acidente, a seção <u>C</u> é o gargalo operacional (com 1 faixa a seção <u>C</u> é a limitante para o fluxo na via) tendo-se:

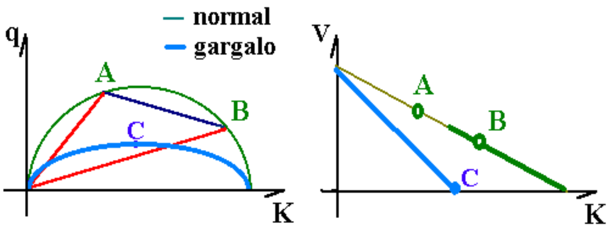
1 faixa: $V_f' = V_f\ ,\ K_j' = \frac{K_j}{2} = 75{,}5\ {}^{v}\!/_{km} = 75{,}5\ {}^{v}\!/_{km.fx} \Rightarrow C' = \frac{V_f'.K_j'}{4} = 1347{,}7\ {}^{v}\!/_{h}$

$\therefore\ q_C = C' \Rightarrow q_B = q_C = C' < C_B$ (em fluxo forçado).

Na hipótese de Greenshields, com fluxo igual à capacidade (C'), tem–se:

$$V_C = \frac{V_f}{2} = 35{,}7\ {}^{km}\!/_{h}\quad ;\quad K_C = \frac{K_j'}{2} = 37{,}75\ {}^{v}\!/_{km} = 37{,}75\ {}^{v}\!/_{km.fx}$$

com operação livre a partir da fila formada pelo congestionamento.



A seção C é o gargalo de capacidade mas, no entanto, as seções com operação congestionada estão os trechos anteriores, afetados pela onda de congestionamento que é formada entre (B) e (A)!

Com congestionamento em (B): $q_B = 1347{,}7$ v/h , em fluxo forçado, tendo-se

$C_B = C_A = 2695{,}4$ v/h $\therefore\ q_B/C_B = 50\%$

$$V_B = \frac{V_f}{2}(1 - \sqrt{1 - {}^{q_B}\!/_{C_B}}) = 10{,}5\ {}^{km}\!/_{h} \text{ e } K_B = \frac{q_B}{V_B} = 128{,}4\ {}^{v}\!/_{km} = 64{,}2\ {}^{v}\!/_{km.fx}.$$

A velocidade de propagação da onda de congestionamento, portanto, é

$$w_o = \frac{1347{,}7 - 2315}{128{,}4 - 47{,}1} = -11{,}9\ {}^{km}\!/_{h}\ \text{(para montante)}$$

(enquanto não houver liberação, o congestionamento cresce ...).

A perda de "capacidade" em <u>C</u>, em função da existência do gargalo operacional (fila à montante) e dos eventos ocorridos (motoristas partem de uma situação em baixa velocidade e reduzem velocidade para observar acidente), não é neste caso considerada (C' 5 a 15% menor que a capacidade normal da seção com bloqueio).

Efeito semelhante ocorrerá quando houver a liberação da faixa ocupada pelo veículo acidentado (C' 5 a 15% menor que a capacidade normal da seção original) e também é ignorado. Após 15min há liberação da faixa obstruída pelo acidente, novamente

$K''_j = K_j = 151$v/km

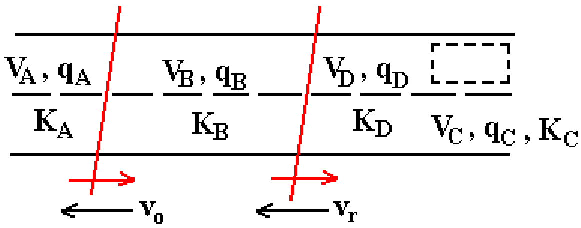
na seção onde anteriormente havia o bloqueio de uma faixa pelo acidente. Na hipótese de Greenshields, com fluxo igual à capacidade em (D), então:

$q_D = 2695{,}4$ v/km

tendo–se $V_D = \frac{V_f}{2} = 35{,}7\ ^{km}/_{h}$ e $K_D = \frac{K''_j}{2} = 75{,}5\ ^{v}/_{km}$

Uma onda de recuperação é formada entre (D) e (B) com velocidade:

$$w_s = \frac{1347{,}7 - 2695{,}4}{128{,}4 - 75{,}5} = -25{,}5\ ^{km}/_{h}\ \text{(para montante)}.$$



A distância percorrida pela onda de congestionamento é

$x_o = w_o.t$

e a distância percorrida pela onda de recuperação é

$x_r = w_r.(t - t_a)$

onde t_a= tempo necessário para liberar a faixa.

Portanto, o congestionamento acaba quando $x_o = x_r$

$$\therefore w_o.t_r = w_s.(t_r - t_a) \Rightarrow (w_s - w_o).t_r = w_s.t_a \Rightarrow t_r = \frac{w_s}{w_s - w_o}.t_a$$

sendo $t_a = \frac{15}{60} = 0{,}25h \Rightarrow t_r = \frac{-25{,}5}{-25{,}5 - (-11{,}9)}.0{,}25 = 0{,}468h\ \ (= 28\ \ \text{min})$.

A "extensão" afetada pelo congestonamento é de

$11{,}9.0{,}468 = 5{,}57$km

e o número de veículos afetados é

$2315.0{,}468 = 1083$ vh.

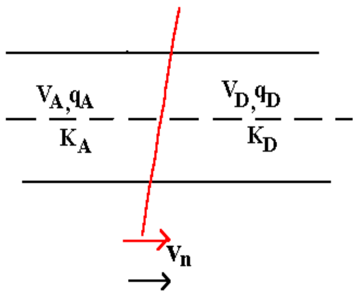
A fila é máxima quando ocorre a liberação do acidente (pois $w_s > w_o$) tendo-se

$L_{Bmax} = v_o.t_a = 11{,}9.0{,}25 = 2{,}975$ km (extensão)

$\therefore\ n_{max} = L_{Bmax}.K_B = 2{,}975.128{,}4 = 382$v (veículos).

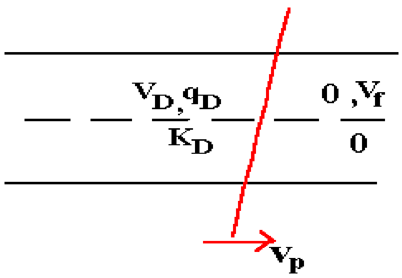
Deve–se observar também os dois outros fenômenos anteriormente analisados:

• quando o trecho B desaparece, ainda não ocorre a normalização total das condições de tráfego e haverá ainda uma onda, no caso, de normalização com



$$w_n = \frac{2695{,}4 - 2315}{75{,}5 - 47{,}1} = +13{,}4\ \mathrm{km/h}$$

• quando houver um pelotão a deslocar-se sem interferência de fluxo adiante, as mesmas fórmulas avaliam que velocidade da onda de progressão será



$$v_p = \frac{q_D - 0}{k_D - 0} = V_D \text{ sem tráfego adiante}$$

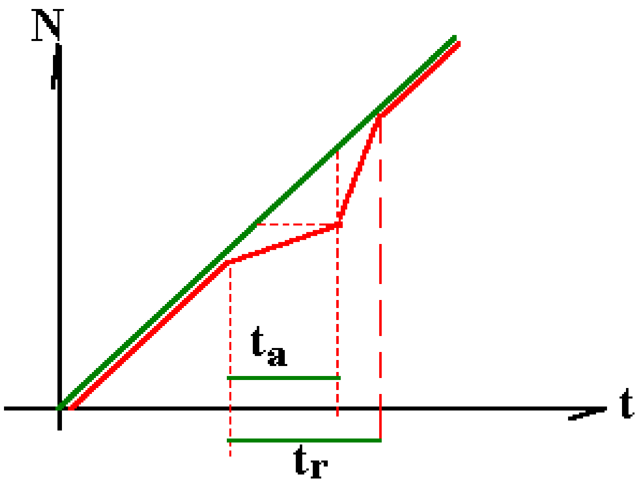
Este segundo caso não corresponde ao que realmente ocorre, porque os veículos mais rápidos podem destacar-se do pelotão (é o fenômeno da dispersão dos pelotões, que vai desaparecendo ao longo do percurso). Se não houve interrupção do tráfego, o fluxo adiante não é nulo (é o fluxo escoado no período anterior).

A representação da dispersão dos pelotões exigiria, no entanto, uma teoria mais complexa (que será discutida posteriormente).

Pode-se ver que todas as conclusões qualitativas são mantidas. A substituição da hipótese de Greenshields pela curva de operação real deve, no entanto, melhorar a precisão das estimativas (o que é um aspecto prático fundamental).

O ponto mais interessante (a comparação dos resultados obtidos com o acompanhamento da propagação e dissipação das filas e as estimativas de filas e atrasos calculadas com as fórmulas teóricas correspondentes) é similar.

O resultado de fila é diferente do calculado no gráfico de chegadas e partidas:



$$"n_{máx}" = q_A.t_a - q_B.t_a =$$

$$= (2315 - 1347{,}7).0{,}25 = 242v$$

$$"d_{máx}" = t_a - \frac{q_B}{q_A} \cdot t_a =$$

$$= 0.25 - \frac{1347.7}{2315} \cdot 0.25 = 0.10h\ (6min);$$

Estes resultados são diferentes por serem calculados sem considerar a dimensão dos veículos e o espaçamento entre eles (representado pelo inverso da densidade K).

Os resultados também admitem que a dissipação da fila ocorre para frente (como ocorreria se sobre-demanda fosse eliminada pela diminuição da demanda, no final da fila, e não pelo aumento da capacidade, no inicio da fila).

Para ambos os efeitos, existem as fórmulas de correção usuais que correspondem aos termos de correção pela dimensão física dos veículos e pela dissipação de filas.

Por exemplo, a correção da dimensão física, adotando o comprimento médio do veículo igual a 8 metros e utilizando a velocidade de 49,2 km/h, daria:

$$\hat{n} = \frac{\tilde{n}}{1 - Q_m . {\ell_v}/{V}} = \frac{242}{1 - {2315}/{2} . {0{,}008}/{49{,}1}} = 298{,}51 .$$

Novamente, a principal diferença de estimativa decorre do fato de ter assumido um espaçamento médio entre veículos igual ao comprimento médio dos veículos, ao invés de $\bar{e} = \frac{1000}{64{,}2} = 15{,}6m$ (na fila), que daria a correção:

$$\hat{n} = \frac{\tilde{n}}{1 - Q_m . {\ell_v}/{V}} = \frac{242}{1 - {2315}/{2} . {0{,}0156}/{49{,}1}} = 382{,}3v .$$

Considerando o movimento da seção de início e fim da fila e a diferença de densidade e velocidade na dissipação e formação de fila, o fluxo de chegada no final da fila seria

$$\hat{Q} = 47{,}1.(49{,}1 + 11{,}9) = 2873{,}1\text{v/h}$$

e o fluxo de saída no topo da fila seria

$$\hat{S} = 128{,}4.(10{,}5 + 25{,}5) = 4622{,}4\text{v/h} \; ,$$

podendo-se obter uma estimativa melhorada do tempo de dissipação da fila como:

$$t_s = \frac{\hat{n}}{\hat{S} - \hat{Q}} = \frac{382{,}3}{4622{,}4 - 2873{,}1} = 0{,}2185\text{h} \;\; (t = 0{,}25 + 0{,}2185 = 0{,}4685\text{h})$$

Pode-se ver, novamente, que a aplicação criteriosa dos termos de correção chega a resultados similares à análise da propagação e dissipação das filas.

A estimativa obtida com a fórmula de sobre-fila (que inclui o efeito da aleatoriedade na demanda e capacidade) é também distinta. Com o período de sobre-demanda correspondente à duração do acidente, tem-se:

$$X = \frac{2315}{1347{,}7} = 1{,}718 \; ; \;\; A = 1{,}718 - 1 = 0{,}718 \; ; \;\; B = \frac{8.1.1{,}718}{1347{,}7.0{,}25} = 0{,}0408$$

$$\Rightarrow n_f = \frac{1347{,}7.0{,}25}{2}.\left(0{,}718 + \sqrt{0{,}718^2 + 0{,}0408}\right) = 246{,}6\text{v}$$

Pode-se também calcular a fila e o atraso médios no período (incluindo a propagação e a dissipação das filas geradas pela sobre-demanda) por

$$\bar{n} = \frac{1347{,}7.0{,}25}{4}.\left(0{,}718 + \sqrt{0{,}718^2 + 0{,}0408}\right) = 123{,}3\text{v} \;\; \text{e}$$

$$\bar{d} = \frac{0{,}25}{4}.\left(0{,}718 + \sqrt{0{,}718^2 + 0{,}0408}\right) = 0{,}092\text{h} = 5{,}52\,\text{min}\, .$$

Pode-se também aplicar as correções usuais para obter maior precisão.