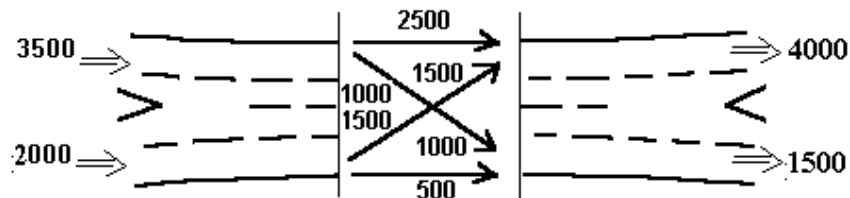


## EXERCÍCIO: ENTRELAÇAMENTO EM VIA EXPRESSA

Analisar a seguinte seção de entrelaçamento (fluxos em veículo-equivalente/hora):



(fluxos em veículo-equivalente/hora, considerando os veículos pesados)

Adotar: configuração mais econômica (menor número de faixas)  
extensão  $L \approx$  até 450m

Discutir: as alternativas de projeto  
a extensão mínima necessária

Considerar: segmento correspondente em nível  
faixas com 3,30m; obstruções de ambos os lados a 0,60m  
trecho isolado e área sem ocupação lindeira  
(considere como trecho de via expressa)

**SOLUÇÃO:**

parâmetros do entrelaçamento: fluxo entrelaçante= $\tilde{q}_w = 1500 + 1000 = 2500$  veq/h  
 razão de fluxo  $VR = 2500/5500 = 0,455$   
 razão de entrelaçamento  $R = 1000/2500 = 0,400$

HCM2010 não distingue tipo de configuração ou define seus parâmetros usuais (o único parâmetro específico é a capacidade de entrelaçamento; os valores adotados são: 2400veq/h para  $N_{WL}=2$ ; 3500veq/h para  $N_{WL}=3$ ;  $N_{WL}=2$  corresponderia ao Tipo A;  $N_{WL}=3$  corresponderia aos Tipos B e C)

- nas versões anteriores: configuração Tipo A usualmente deveria observar uma capacidade de entrelaçamento ou um fluxo máximo entrelaçante (até 1800 veq/h no HCM1985, 2000 veq/h no 1997, 2500 veq/h no 2000) e uma razão de fluxo entrelaçante máxima, função do número de faixas (até 0,45 em 3 fxs, 0,35 em 4 fxs; 0,20 em 5 fxs, 0,22 até o HCM1997), além de de uma taxa de entrelaçamento máxima de 0,50 (é o máximo) ... no HCM1985, o fluxo máximo entrelaçante seria de 3000 veq/h para os Tipos B e C, com razão de fluxo entrelaçante máxima de 0,80 para B e 0,50 para C (limitado a uma taxa de entrelaçamento máxima de 0,40) ..., no HCM1997, foram mantidos os mesmos parâmetros mas o fluxo máximo entrelaçante passaria a ser 3500veq/h para o caso Tipo B ... no HCM2000, o fluxo máximo entrelaçante seria de 4000 veq/h para Tipo B e 3500 veq/h para Tipo C, mesma razão de fluxo entrelaçante máxima de 0,80 para B e 0,50 para C (sem uma taxa de entrelaçamento máxima)

HCM2010 avalia especificamente a influência do entrelaçamento na capacidade considerando a restrição de entrelaçamento e da via ( $Kc=27pc/km/fx$ )

- anteriores: não reconheciam a influência do entrelaçamento na capacidade mas havia o limite geral de fluxo de 1900veq/h/fx no HCM1985, até que o HCM1997 assumiu genericamente uma redução de capacidade de 100veq/h/fx para Tipo A e B e de 200 veq/h/fx para Tipo C e o HCM2000 introduziu a restrição da via ( $Kc=27pc/km/fx$ ; ou 25pc/km/fx em rodovias)

os critérios de capacidade e os limites recomendados são critérios empíricos sem clara fundamentação teórica e baseados na experiência dos USA

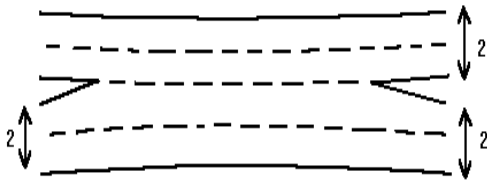
não se pode afirmar que as restrições correspondem a limites físicos ...  
 no entanto, os resultados são provavelmente precários fora dos valores usuais

∴ parâmetros usuais não recomendariam o Tipo A em alguns critérios ...  
 com 4 faixas: fluxo total por faixa  $q_f=5500/4=1375\text{veq/h/fx}$   
 (difícil com 3 faixas: fluxo total por faixa  $q_f=5500/3=1833\text{veq/h/fx}$ )

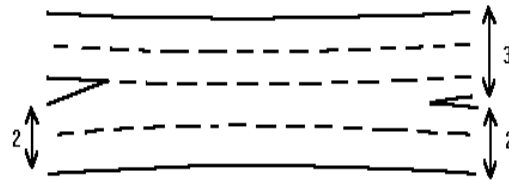
**configuração mais econômica**

⇒ Tipo A ( $N_{WL}=2$ )

⇒ Tipo B ( $N_{WL}=3$ )



$N_T=4; LC_{FR}=1; LC_{RF}=1$

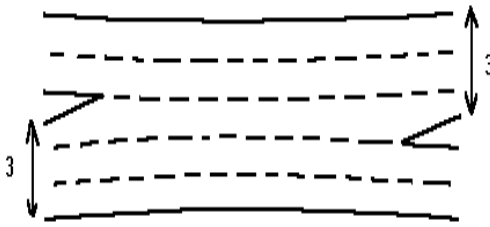


$N_T=4; LC_{FR}=1; LC_{RF}=0$

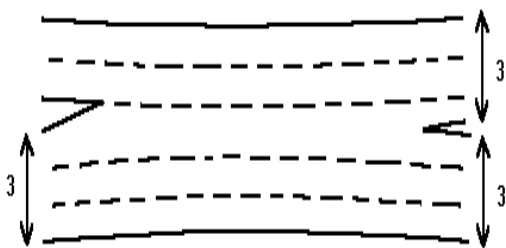
**alternativas imediatas**

⇒ Tipo C ( $N_{WL}=3$ )

⇒ Tipo B ( $N_{WL}=3$ )  $N_w^{\text{máx}}$



$N_T=5; LC_{FR}=2; LC_{RF}=0$



$N_T=5; LC_{FR}=1; LC_{RF}=0$

a análise da operação deve ser capaz de selecionar a configuração eficaz

note que as propostas favorecem o maior fluxo do entrelaçamento ( $1500\text{veq/h}$ )  
 (outro critério seria favorecer o fluxo entrelaçante da via principal)

etapa preliminar: obtenção da velocidade de fluxo livre (máxima)!

novo critério:  $\tilde{V}_{FL}$  no trecho (seção/segmento) com o entrelaçamento

critério anterior:  $\tilde{V}_{FL}$  baseada nos segmentos básicos anteriores,

$$\text{adotando-se } \tilde{V}_{FL} = \frac{\tilde{q}_A \cdot \tilde{V}_{FLA} + \tilde{q}_B \cdot \tilde{V}_{FLB}}{\tilde{q}_A + \tilde{q}_B}$$

recomendação: sempre que possível deve ser medida ...  
(não há discussão específica sobre estimativa ...)

admitindo o mesmo procedimento dos segmentos básicos:

$$\tilde{V}_{FL} = \tilde{V}_{FL0} - F_{LV} - F_{OL} - F_{DR} \text{ no trecho com entrelaçamento}$$

sendo  $\tilde{V}_{FL0} = 75,4 \text{ mph} = 120,6 \text{ km/h}$

$$F_{LV} = 1,9 \text{ mph} = 3,1 \text{ km/h} \text{ para faixas com } 3,30 \text{ m}$$

(o efeito do número de faixas seria desprezado)

$$F_{OL} = 0,8 \text{ mph} = 1,3 \text{ km/h} \text{ para obstrução a } 0,60 \text{ m à direita}$$

(o efeito de obstrução à esquerda seria desprezado)

e  $F_{DR} = 3,22 \cdot \text{TRD}^{0,84} \text{ mph} = 7,65 \cdot \text{DRK}^{0,84} \text{ km/h}$  para o efeito dos ramais  
desprezado em um trecho isolado, sem ocupação lindeira  
(a densidade de ramais teria de considerar 9,6km, ao redor do  
ponto médio do segmento; pode-se preferir  $\text{DR} = 1/\bar{e}_R$  no trecho).

portanto:  $\tilde{V}_{FL} = 120,6 - 3,1 - 1,3 - 0,0 = 116,2 \text{ km/h}$

na densidade de ramais, o HCM2010 considera ramais de entrada e saída, incluindo incorporações e divergências; (até o HCM2000: densidade de interconexões com ramal de entrada) e desconsidera a velocidade e o fluxo de tráfego nos ramais (claramente uma visão simplificada).

entre os aspectos discutíveis da estimativa, foi desprezado o efeito das obstruções laterais à esquerda e do reduzido número de faixas

se estes aspectos forem tratados de forma conservativa, pode-se admitir que:

- as obstruções à esquerda produzem um efeito similar às da direita

$$F_{OL} = 0,8 \text{ mph} = 1,3 \text{ km/h} \text{ para obstrução a } 0,60 \text{ m à esquerda}$$

- o número reduzido de faixas avaliado como no HCM1997 ou HCM2000

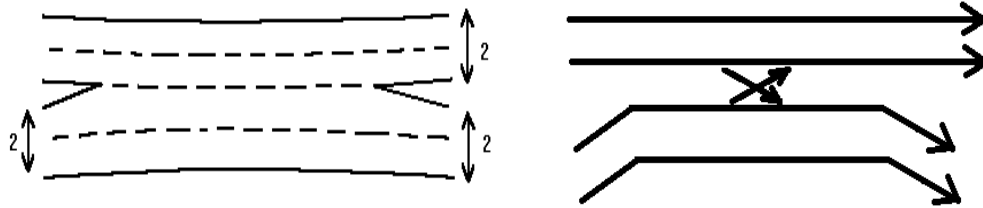
$$F_{Nf} = 1,5 \text{ mph} = 2,4 \text{ km/h} \text{ para } 4 \text{ faixas (total na seção)}$$

$$\text{(ou } F_{Nf} = 3,0 \text{ mph} = 4,8 \text{ km/h p/3 fxs e } F_{Nf} = 0 \text{ mph} = 0 \text{ km/h p/5 fxs)}$$

então:  $\tilde{V}_{FL} = 116,2 - 3,1 - 2,4 = 110,7 \text{ km/h}$ , que será adotado para 4 faixas

(de forma similar,  $\tilde{V}_{FL} = 108,3 \text{ km/h p/3 fxs}$  e  $\tilde{V}_{FL} = 113,1 \text{ km/h p/5 fxs}$ )

Analisando a opção Tipo A com 4 faixas, com  $L_{\text{máx}}$  admitido=450m ( $L_s=346,5\text{m}$ ):



Capacidade:  $\tilde{C} = \min\{\tilde{C}_w, \tilde{C}_k\}$ ,  $\tilde{C}_w = \frac{\tilde{C}_{wL}}{VR}$ ,  $\tilde{C}_k = N \cdot \tilde{c}_f$ ,  $\tilde{c}_f = \tilde{C}_{IF} - \tilde{\Delta}_{IWL}$

- para  $N_{wL}=2$ ,  $\tilde{C}_{wL} = 2400\text{veq/h}$ ,  $\tilde{C}_w = \frac{2400}{0,455} = 5275\text{veq/h}$ ;

- para  $\tilde{V}_{FL} = 110,7\text{km/h}$ ,  $\tilde{C}_{IF} = 2400\text{veq/h/fx}$ ,  $\tilde{c}_f = \tilde{C}_{IF} - \tilde{\Delta}_{IWL}$

$$\tilde{\Delta}_{IWL} = 438,2 \cdot (1 + 0,455)^{1,6} - 0,251 \cdot 346,5 - 119,8 \cdot 2 = 472\text{veq/h/fx}$$

$$\tilde{c}_f = 2400 - 472 = 1928\text{veq/h/fx}, \tilde{C}_k = 4 \cdot 1928 = 7712\text{veq/h}$$

portanto,  $\tilde{C} = 5275\text{veq/h} < \tilde{Q} = 5500\text{veq/h}$  (já sabido

porque  $\tilde{q}_w = 2500\text{veq/h} > \tilde{C}_{wL} = 2400\text{veq/h}$  do Tipo A)

mesmo assim, vai ser feita a análise da operação ...

Velocidades:  $\tilde{V}_w = \tilde{V}_{\min} + \frac{\tilde{V}_{\max} - \tilde{V}_{\min}}{1 + I_w}$ ,  $\tilde{V}_{nw} = \tilde{V}_{FL} - \beta_{LC} LC_{\min} - \beta_{qf} \cdot \frac{\tilde{q}_T}{N_T}$

- para Tipo A,  $LC_{FR}=1$ ;  $LC_{RF}=1$ , tendo-se  $LC_{\min} = 1500 \cdot 1 + 1000 \cdot 1 = 2500\text{mf/h}$

- para as mudanças de faixa opcionais, em trecho isolado ( $DIK=0$ ), tem-se

$$LC_{ow} = 0,39 \cdot (3,28 \cdot 346,5 - 300)^{0,5} \cdot 4^2 \cdot (1 + 1,6 \cdot 0)^{0,8} = 180,5\text{mf/h}$$

$$LC_{onw} = LC_{nw1} = 0,206 \cdot 3000 + 1,78 \cdot 346,5 - 192,6 \cdot 4 = 464,4\text{mf/h}$$

- total:  $LC_T = 2500 + 180,5 + 464,4 = 3144,9\text{mf/h} \Rightarrow I_{LC} = \frac{3144,9}{346,5} = 9,076\text{mf/m}$

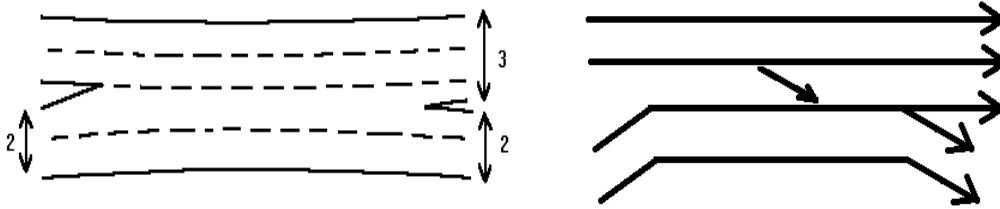
- então  $I_w = 0,226 \cdot \left(\frac{9,076}{3,28}\right)^{0,789} = 0,5045 \Rightarrow \tilde{V}_w = 24 + \frac{110,7 - 24}{1 + 0,5045} = 81,6\text{km/h}$

$$e \tilde{V}_{nw} = 110,7 - 0,0115 \cdot 2500 - 0,0077 \cdot \frac{5500}{4} = 71,4\text{km/h}$$

- a previsão é discutível e precária (foi usada com  $\tilde{q}_w > \tilde{C}_{WL}$ )  
estimando uma velocidade maior para o fluxo entrelaçante (inconsistente)
- a densidade de tráfego estimada é  $\tilde{K} = \frac{3000}{71,4} + \frac{2500}{81,6} = 73,0 \text{veq/km}$  e  
a velocidade média estimada é  $\tilde{V} = \frac{5500}{73} = 75,3 \text{km/h}$ , novamente  
inconsistentes ( $\tilde{K}_f = \frac{73,0}{4} = 18,3 \text{veq/km/px} < \tilde{K}_c = 27 \text{veq/km/px}$ )

Este é risco de aplicar os modelos de previsão do HCM2010, baseado em equações empíricas, fora das faixas de valores usuais (com os quais as equações foram pretensamente calibradas): obtém-se resultados inconsistentes e precários.

Analisando a opção Tipo B com 4 faixas, com  $L_{\text{máx}}$  admitido=450m ( $L_s=346,5\text{m}$ ):



Capacidade:  $\tilde{C} = \min\{\tilde{C}_w, \tilde{C}_k\}, \tilde{C}_w = \frac{\tilde{C}_{WL}}{VR}, \tilde{C}_k = N \cdot \tilde{c}_f, \tilde{c}_f = \tilde{C}_{IF} - \tilde{\Delta}_{IWL}$

- para  $N_{WL}=3, \tilde{C}_{WL} = 3500 \text{veq/h}, \tilde{C}_w = \frac{3500}{0,455} = 7692,3 \text{veq/h};$

- para  $\tilde{V}_{FL} = 110,7 \text{km/h}, \tilde{C}_{IF} = 2400 \text{veq/h/px}, \tilde{c}_f = \tilde{C}_{IF} - \tilde{\Delta}_{IWL}$

$$\tilde{\Delta}_{IWL} = 438,2 \cdot (1 + 0,455)^{1,6} - 0,251 \cdot 346,5 - 119,8 \cdot 3 = 352 \text{veq/h/px}$$

$$\tilde{c}_f = 2400 - 352 = 2047,9 \text{veq/h/px}, \tilde{C}_k = 4 \cdot 2047,9 = 8191,6 \text{veq/h}$$

portanto,  $\tilde{C} = 7692,3 \text{veq/h} > \tilde{Q} = 5500 \text{veq/h}$  (inicialmente adequada)

Velocidades:  $\tilde{V}_w = \tilde{V}_{\min} + \frac{\tilde{V}_{\max} - \tilde{V}_{\min}}{1 + I_w}, \tilde{V}_{nw} = \tilde{V}_{FL} - \beta_{LC} LC_{\min} - \beta_{qf} \cdot \frac{\tilde{q}_f}{N_T}$

- com Tipo B,  $LC_{FR}=1; LC_{RF}=0$  (privilegiando o fluxo de entrada),  
tendo-se  $LC_{\min} = 1500 \cdot 0 + 1000 \cdot 1 = 1000 \text{mf/h}$

- com trecho isolado (DIK=0), para as mudanças de faixa opcionais tem-se

$$LC_{ow} = 0,39 \cdot (3,28 \cdot 346,5 - 300)^{0,5} \cdot 4^2 \cdot (1 + 1,6 \cdot 0)^{0,8} = 180,5 \text{ mf/h}$$

$$LC_{onw} = LC_{nw1} = 0,206 \cdot 3000 + 1,78 \cdot 346,5 - 192,6 \cdot 4 = 464,4 \text{ mf/h}$$

(os mesmos valores obtidos anteriormente para o Tipo A)

$$\text{- total: } LC_T = 1000 + 180,5 + 464,4 = 1644,9 \text{ mf/h} \Rightarrow I_{LC} = \frac{1644,9}{346,5} = 4,747 \text{ mf/m}$$

$$\text{- então } I_w = 0,226 \cdot \left( \frac{4,747}{3,28} \right)^{0,789} = 0,3025 \Rightarrow \tilde{V}_w = 24 + \frac{110,7 - 24}{1 + 0,3025} = 90,6 \text{ km/h}$$

$$\text{e } \tilde{V}_{nw} = 110,7 - 0,0115 \cdot 1000 - 0,0077 \cdot \frac{5500}{4} = 87,9 \text{ km/h}$$

- a densidade de tráfego estimada é  $\tilde{K} = \frac{3000}{87,9} + \frac{2500}{90,6} = 61,7 \text{ veq/km}$  e

a velocidade média estimada é  $\tilde{V} = \frac{5500}{61,45} = 89,1 \text{ km/h}$ .

Embora ainda sejam previstas velocidades ainda sejam levemente maiores para os fluxos entrelaçantes, os valores são bastante próximos. Agora, de forma consistente, é prevista operação sem congestionamento pelo critério de capacidade e de densidade

pois  $\tilde{K}_f = \frac{61,7}{4} = 15,4 \text{ veq/km/fx} < \tilde{K}_c = 27 \text{ veq/km/fx}$  e o nível de serviço previsto é C.

Adotando como critério de projeto garantir o nível de serviço D (na Tabela 12-10, corresponde a  $17 \text{ veq/km/fx} \leq \tilde{K}_f \leq 22 \text{ veq/km/fx}$ ) nos períodos de pico, em princípio, pode-se reduzir a extensão mantendo, por exemplo, esta última configuração tipo B. Testando os valores sucessivos de L tem-se:

L(m)	450	300	150	100
$V_w$	90,6	87,0	80,3	75,5
$V_{nw}$	87,9	87,9	87,9	87,9
$K_f$	15,4	15,7	16,3	16,8

portanto, uma extensão mínima de L=100m ainda seria suficiente!! Este resultado é bastante influenciado pelas altas velocidades de fluxo livre estimadas (a existência de restrições físicas ou limitadores de velocidade alteraria a previsão).

Novamente, mesmo neste caso compatível com os valores usuais, pode-se ver que as equações empíricas do HCM2010 mostram resultados injustificáveis. Neste exercício de análise, pode-se ver que a previsão de velocidade para o fluxo entrelaçante é reduzida mas a do fluxo não entrelaçante é insensível à menor extensão de entrelaçamento (um efeito dúbio que não era previsto com os modelos anteriores).