

## EXERCÍCIO: BALANCEAMENTO ESTRUTURAL I

Rodovia de acesso à São Poli: 3 faixas com 3,30m  
acostamento com 2,40m e canteiro com 1,80m,  
terreno nivelado e velocidade de projeto 100km/h.

Examinar a situação seguinte: volume de projeto 2000 v/h (15% de pesados)  
(adotar FPH=0,80 e usuários habituais)  
trecho com ocupação média (suburbana)

Trechos problemáticos:

- trecho sinuoso em que há dispositivos de contenção (defensas), no canteiro central a 0,60m da faixa de rolamento e após o acostamento a 2,40m
- transposição da rodovia por viadutos da rede viária urbana, com vão útil de 11,40m entre pilares (face a face)
- trecho em aclive com inclinação de 3% e extensão de 1,6km (1 mi), com velocidade final dos pesados medida de 56km/h (35mi/h);
- trecho em aclive adicional com inclinação de 2% e extensão de 0,8km (1/2mi) com velocidade final dos pesados medida de 48km/h (30mi/h);
- trecho final em declive com inclinação de 2% e extensão de 2,4km (1 1/2mi) com velocidade final dos pesados medida de 80km/h (50mi/h).

Pede-se determinar:

- o nível de serviço em um trecho normal da via (sem obstruções laterais e aclive);
- as alterações na seção transversal que poderiam compensar o efeito das obstruções laterais e do aclive para harmonizar a operação da via.

## SOLUÇÃO:

Não há medida da velocidade de fluxo livre na via. Usar estimativa do HCM/2010.

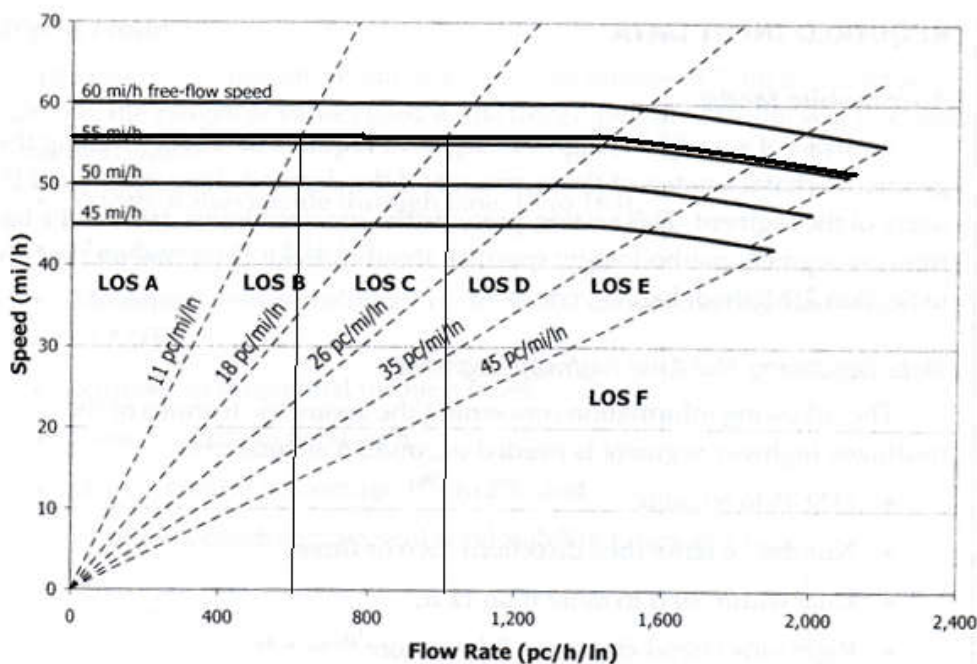
Nos trechos normais há apenas efeito da largura reduzida das faixas e da presença dos veículos pesados, em um ambiente com ocupação suburbana:

- largura de faixa de 3,30m (11ft):  $F_L = 1,9 \text{ mi/h} = 3,0 \text{ km/h}$  (Tab14-8);
- inexistência de obstruções laterais: há canteiro central, acostamento tem 2,40m (8ft);
- densidade de ocupação: 20/milha (suburbano),  $F_A = 5,0 \text{ mi/h} = 8,0 \text{ km/h}$  (Tab14-11).
- valor básico inicial: função da velocidade de projeto para estimativa da velocidade de fluxo livre em rodovias (HCM/2000 sugeria um valor básico inicial de 60mi/h ou 96km/h na versão original e de 100km/h ou 62,5mi/h na versão métrica): adota-se 100kmh;
- $\tilde{V}_{FL} = 62,5 - 1,9 - 5,0 = 55,6 \text{ mi/h}$  (ou  $\tilde{V}_{FL} = 100 - 3,0 - 8,0 = 89,0 \text{ km/h}$ ).

HCM/2010 recomenda não interpolar (seria usada a curva para  $\tilde{V}_{FL} = 55 \text{ mi/h}$ ).

Recomendação inadequada: curva interpolada, a capacidade, por faixa e total, é

$\tilde{c}_f = 2112 \frac{V_{eq}}{h \cdot fx}$  e  $\tilde{C} = 6336 \frac{V_{eq}}{h}$  (sem interpolar, capacidade seria de 2100veq/h/fx).



Fator equivalente para veículos pesados: terreno nivelado é  $e=1,5$  (Tab14-12).

Fator de composição de tráfego pode ser estimado como:

$$p_{VP} = 0,15, e_{VP} = 1,5 \Rightarrow f_{VP} = \frac{1}{1 + 0,15 \cdot (1,5 - 1)} = 0,93 \frac{v}{v_{eq}}$$

Então, capacidade nos trechos normais é:  $C = f_{VP} \cdot \tilde{C} = 0,93 \cdot 6336 = 5892,5 \text{ v/h}$ .

Demanda, considerando o fluxo do período de 15 minutos mais carregado (FHP=0,80):

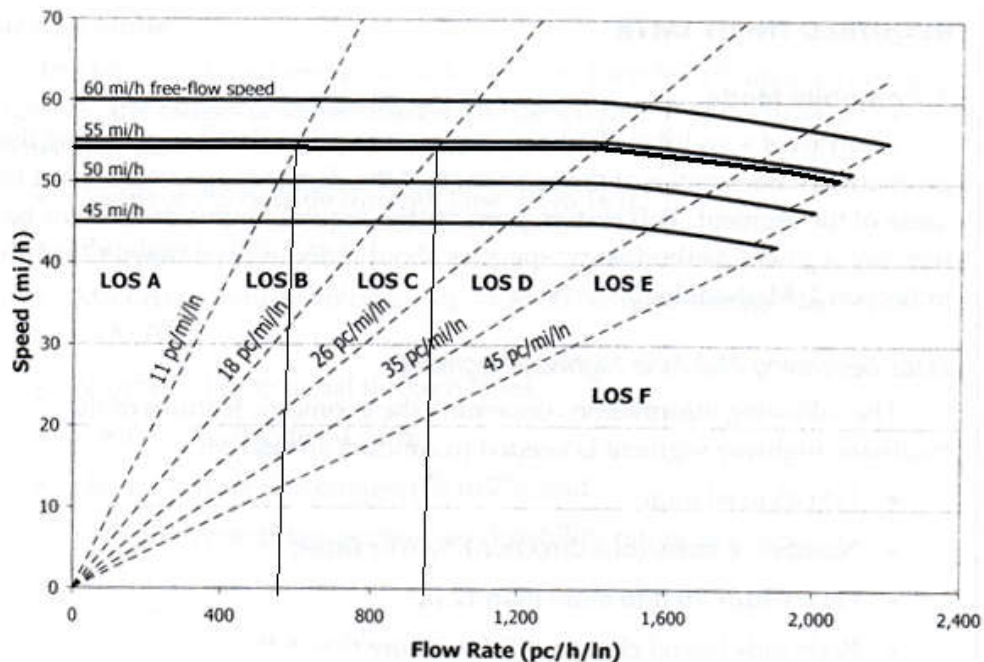
$$q = \frac{2000}{0,80} = 2500 \text{ v/h} \text{ e } \tilde{q}_f = \frac{2500}{3,0,93} = 896,1 \text{ }^{veq}/\text{h.fx}, \text{ nível de serviço B}$$

(segundo a Figura 14-5, até cerca de  $1050 \text{ }^{veq}/\text{h.fx}$ ).

Seção com dispositivos de contenção: somente as defensas no canteiro central têm efeito de obstrução lateral (as defensas à direita estão a mais de 1,80m) e a distância total às obstruções laterais é  $d_T = 0,6 + 1,80 = 2,40\text{m}(8\text{ft}) \Rightarrow F_o = 0,9\text{mi/h} = 1,4\text{km/h}$  (na Tab14-9), que corresponde a uma redução adicional da velocidade de fluxo livre para  $\tilde{V}_{FL} = 55,6 - 0,9 = 54,7\text{mi/h}$  (ou  $\tilde{V}_{FL} = 89,0 - 1,4 = 87,6\text{km/h}$ ). O efeito da sinuosidade não é considerado (entre outros efeitos eventualmente relevantes, como qualidade do pavimento, interferências laterais ou fiscalização de velocidade).

Seção com o viaduto: obstruções laterais, de ambos os lados, distância das faixas de rolamento  $d_L = \frac{11,40 - 2 \cdot 3,30}{2} = 0,75\text{m}$ .:  $d_T = 1,5\text{m}(5\text{ft}) \Rightarrow F_o \cong 1,5\text{mi/h} = 2,4\text{km/h}$  (Tab14-9), que corresponde a uma redução adicional da velocidade de fluxo livre para  $\tilde{V}_{FL} = 55,6 - 1,5 = 54,1\text{mi/h}$  (ou  $\tilde{V}_{FL} = 89,0 - 2,4 = 86,6\text{km/h}$ ).

Sem utilizar curva de operação interpolada, o efeito previsto seria nulo e indistinguível em ambos os casos (novamente  $\tilde{V}_{FL} = 55\text{mi/h}$ ). Naturalmente o efeito previsto é reduzido mas com interpolação a previsão da capacidade é: no primeiro caso  $\tilde{c}_f = 2094 \text{ }^{veq}/\text{h.fx}$  e  $\tilde{C} = 6282 \text{ }^{veq}/\text{h}$  ou  $C = 5835,7\text{v/h}$  (redução de cerca de 1,0% apenas) e no segundo caso no primeiro caso  $\tilde{c}_f = 2082 \text{ }^{veq}/\text{h.fx}$  e  $\tilde{C} = 6246 \text{ }^{veq}/\text{h}$  ou  $C = 5808,8\text{v/h}$  (redução de cerca de 1,5% apenas).



Velocidade menor implica em maior densidade e manter nível de serviço B exige um volume menor que cerca de  $950 \frac{v_{eq}}{h \cdot f_x}$ , o que é satisfeito na situação atual.

Note também que uma seção com 3 faixas de 3,60m seria melhor junto aos viadutos pois  $d_L = \frac{11,40 - 3 \cdot 3,60}{2} = 0,3m \therefore d_T = 0,60(2ft) \Rightarrow F_O = 2,8mi/h$  (<1,9+1,5mi/h devido ao efeito conjunto de largura restritiva e obstrução lateral na situação existente). Esta seria uma pequena compensação pelo efeito da obstrução lateral.

As principais questões discutíveis aparecem, no entanto, com mais clareza adiante.

Primeiro trecho em aclive (i=3% e L=1,6km=1mi):

- o fator equivalente para os veículos pesados obtido diretamente da Tab14-13 (para caminhões com mesma relação peso/potência das vias expressas 75a90kg/kW=125a150lb/HP; HCM1997,2000: 167lb/HP=100kg/kW para rodovias) com  $p_{VP} = 15\%$ , tendo-se  $e_{VP} = 1,5 \Rightarrow f_{VP} = 0,93 \frac{v_{eq}}{v}$ , mantendo a avaliação feita para o trecho normal  $C = 5892,5 v/h$  (concluindo que o primeiro trecho em aclive não afeta significativamente os veículos pesados pois este é o fator equivalente em nível).

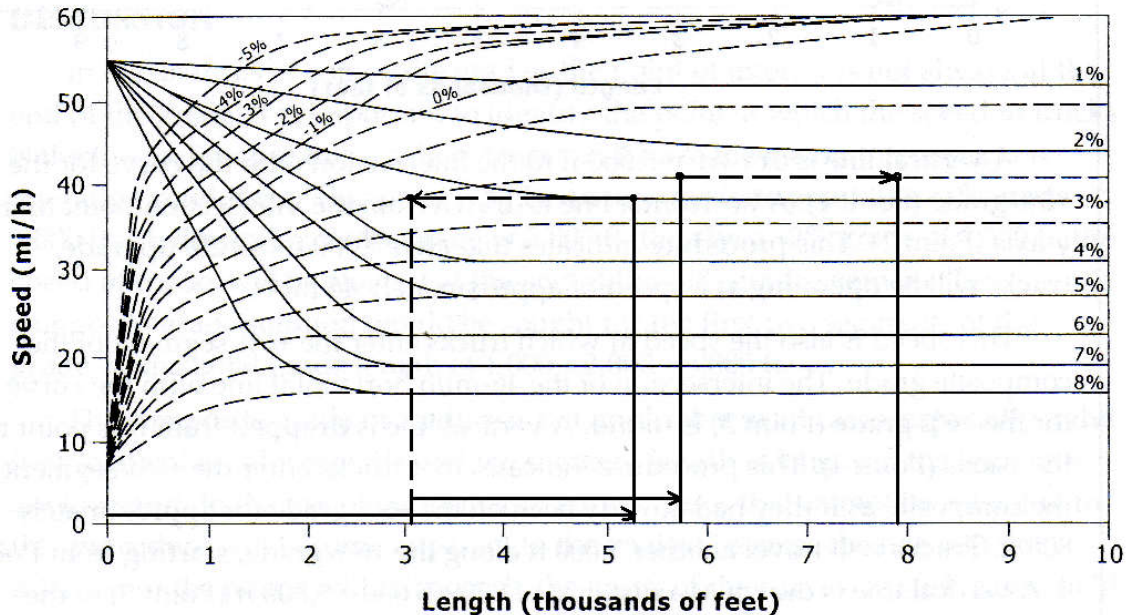
Esta conclusão é bastante diferente da obtida com as versões anteriores. Com o HCM/85 ou o HCM/97 ter-se-ia  $e_{VP} = 4 \therefore f_{VP} = 0,69 \Rightarrow C = 4264 \frac{v}{h}$  e, então,  $\tilde{q}_f = \frac{2500}{3,0,69} = 1208 \frac{v_{eq}}{h \cdot f_x}$  (que indicaria uma piora do nível de serviço para C).

Trechos seguintes: o fator equivalente para os veículos pesados não pode ser obtido diretamente da Tabela 14-13 pois a operação é influenciada pelo trecho anterior. Obter a rampa simples equivalente a partir das curvas de operação dos veículos pesados, acumulando os efeitos sobre a velocidade final dos veículos pesados nos trechos sucessivos, é o melhor procedimento (o HCM/2010 permite usar a rampa física média  $i=h/L$  do trecho todo, quando  $L < 1,2km$  ou  $i < 4\%$ ). O HCM/2010 fornece curvas de operação dos veículos pesados para relação peso/potência de 120kg/kW=200 lb/HP.

Segundo trecho: aclive (i=2% e L=0,8km=1/2mi)

- velocidade no final do primeiro aclive (L=1,6km=1mi=5280ft, para i=3%) é 39mi/h;
- posição na entrada do segundo trecho em aclive (para i=2%) corresponde a 3050ft;
- velocidade no final do segundo aclive (L=+0,8km a 5690ft na curva i=2%) é 40mi/h;
- rampa simples equivalente (L=1,6+0,8km=7920ft e velocidade 40mi/h) é i=2,6%;
- $e_{VP} \cong 2$  na Tab14-13, com L=1 1/2mi (2,4km) e i=2,6%, e obtém-se  $f_{VP} = 0,87$ .
- no final do segundo aclive, a capacidade é  $C = 0,87 \cdot 6336 = 5509,5 v/h$  (6,5% menor).

Também, tem-se  $\tilde{q}_f = \frac{2500}{3,0,87} = 957,8 \frac{v_{eq}}{h \cdot f_x}$ , ainda no limite do nível de serviço B.



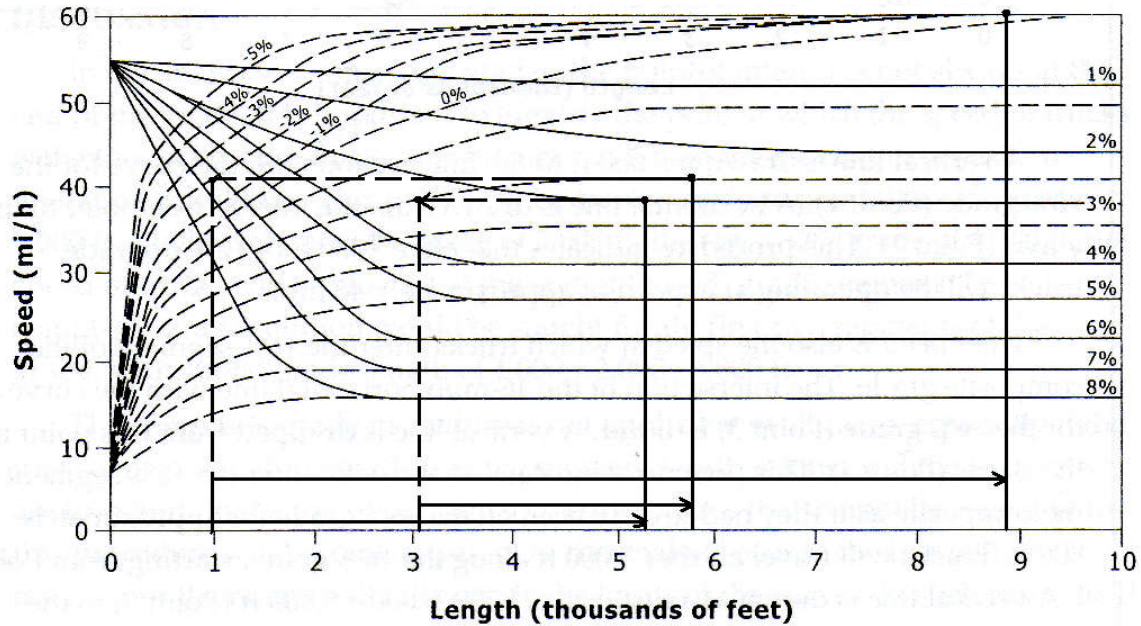
A aplicação do procedimento para declives não é claramente recomendada. A utilização dos valores para declives simples (Tab14-15) é também inadequada. Portanto, o mesmo procedimento seria a alternativa naturalmente recomendada.

Terceiro trecho: declive ( $i=2\%$  e  $L=2,4\text{km}=1\ 1/2\text{mi}$ ):

- velocidade no final do segundo aclive de  $40\text{mi/h}$  é utilizada;
- posição na entrada do terceiro trecho em declive ( $i=-2\%$ ) corresponde a  $950\text{ft}$ ;
- velocidade no final do declive ( $L=+2,4\text{km}$  a  $8870\text{ft}$  para  $i=-2\%$ ) é de  $60\text{mph}$ ;
- rampa simples equivalente ( $L=2,4+2,4\text{km}=3\text{mi}=15840\text{ft}$ ) e velocidade  $60\text{mph}$  é  $i=0\%$ ;
- $e_{vp} = 1,5$  na Tab14-13, com  $L=3\text{mi}$  ( $4,8\text{km}$ ) e  $i=0\%$ , e obtém-se  $f_{vp} = 0,93$ .
- o final do terceiro trecho, mantém a avaliação para o trecho normal  $C = 5892,5\text{v/h}$ , e

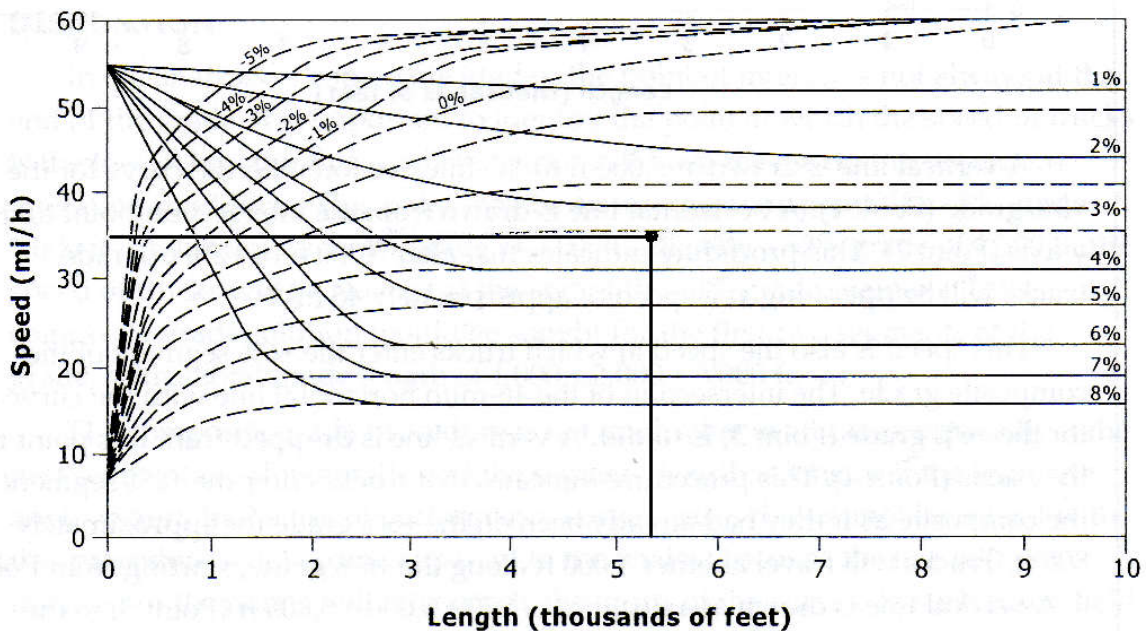
tem-se  $\tilde{q}_f = \frac{2500}{3,0,93} = 896,1 \frac{\text{veq}}{\text{h.fx}}$ , com nível de serviço B.

Note que a velocidade prevista para o final do declive ( $60\text{mi/h}$ ) é incompatível com a estimativa da velocidade de fluxo livre da via ( $55,6\text{mi/h}$ ). As curvas de operação é usada como uma curva nocional, não real, apenas para obter a rampa equivalente (mas não para prever a velocidade efetiva de operação) em função das diferenças nas velocidades observadas no início dos trechos e da relação peso/potência.

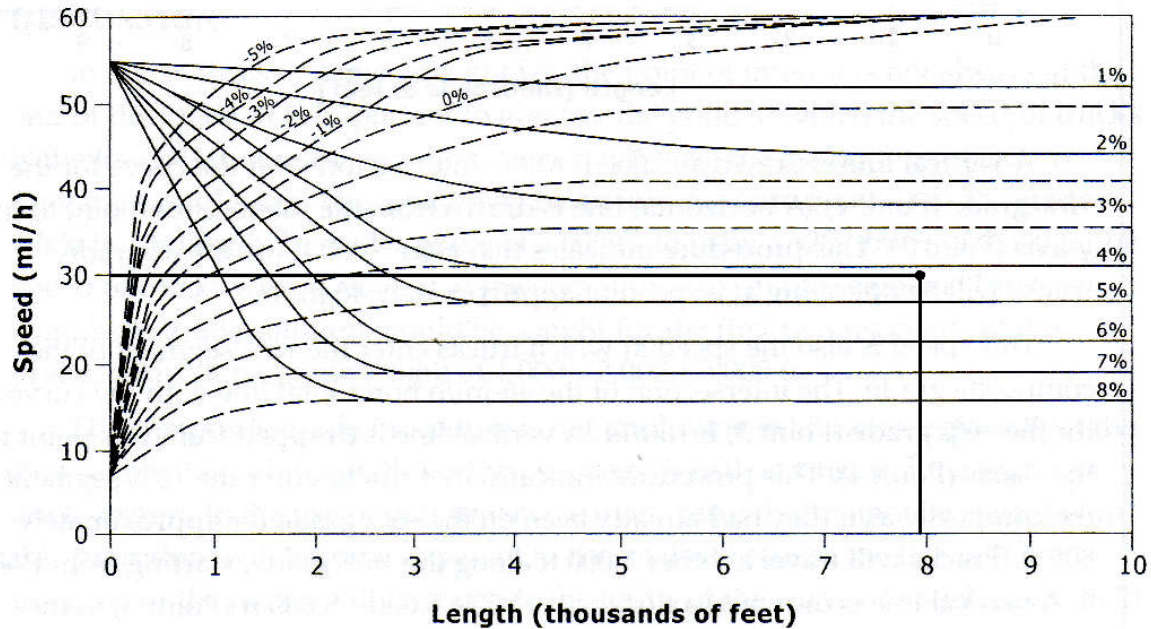


Com a hipótese de que as velocidades previstas são a informação mais importante, é possível considerar a velocidade final dos veículos pesados observada em campo.  
 - hipótese: mesma velocidade final do veículo pesado => mesmo fator equivalente ...

No final do primeiro trecho: velocidade dos veículos pesados é 56km/h=35mi/h  
 - perda de velocidade para 35mi/h em 1mi (5280ft) corresponde à rampa equivalente de  $i_{eq} \cong 3,5\%$ ,  $e_{vp} \cong 2$  (Tab14-13),  $f_{vp} = 0,87$  e capacidade  $C = 0,87.6336 = 5509,5 v/h$  (6,5% menor). Também  $\tilde{q}_f = \frac{2500}{3,0,87} = 957,8 \frac{veq}{h.fx}$ , ainda do nível de serviço B.



No final do segundo active: velocidade dos veículos pesados é 48km/h=30mi/h  
 - perda de velocidade para 30mi/h em 1,5mi (7920ft): rampa equivalente de  $i_{eq} = 4,2\% \therefore e_{vp} = 3,0$  (Tab14-13),  $f_{vp} = 0,77$  e a avaliação é qualitativamente distinta. A estimativa de capacidade da rodovia é reduzida para  $C = 0,77.6336 = 4878,7v/h$  (23% menor) e  $\tilde{q}_f = \frac{2500}{3,0,77} = 1082 \frac{veq}{h.fx}$ , mas ainda no limite do nível de serviço B.



No final do terceiro trecho: velocidade dos veículos pesados é 80km/h=50mi/h  
 - perda de velocidade para 50mi/h, de arraste, em L=4,8km (15840ft): rampa equivalente  $i_{eq} = 1,2\% \therefore e_{vp} = 1,5$   $f_{vp} = 0,93$ , e capacidade  $C = 5892,5v/h$ , tendo-se  $\tilde{q}_f = \frac{2500}{3,0,93} = 896,1 \frac{veq}{h.fx}$ , com nível de serviço B.

Aspecto crítico: HCM/2010 seguiu o HCM/2000 ao reduzir de forma significativa os fatores equivalentes dos veículos pesados, em relação ao HCM/85 e HCM/97.

Outra questão mais teórica (fundamental) decorre de considerar que a alteração nos valores recomendados para os fatores de equivalência, corresponde a uma mudança de critério de equivalência introduzida no HCM/2000 e mantida no HCM/2010, que passou a ser a densidade de tráfego (compatível com o critério de nível de serviço). O critério anterior era o nível de utilização da capacidade (Q/C).

Problema do procedimento recomendado para rodovias de múltiplas faixas (assim como para vias expressas): trocar o critério ao invés de manter dois critérios (um para densidade de tráfego e outro para nível de utilização da capacidade).

Relacionada com outra deficiência do HCM/2010 (herdada das versões anteriores): a impossibilidade de prever a velocidade de tráfego na via com tráfego misto.

Interpretação: equações de continuidade em tráfego misto ( $q = K.V$ ) e equivalente ( $\tilde{q} = \tilde{K}.\tilde{V}$ ) fornecem uma decomposição do fator de composição de tráfego em dois componentes:  $q = f_{vp}.\tilde{q} = (g_{vp}.h_{vp}).(\tilde{K}.\tilde{V}) = K.V$ , onde  $g_{vp} = f'_{vp} \Rightarrow K = g_{vp}.\tilde{K}$  e  $h_{vp} = f''_{vp} \Rightarrow V = h_{vp}.\tilde{V}$  com fatores equivalentes distintos (para densidade e fluxo).

Exemplo: primeiro aclave (seria similar nos demais)

- o fator equivalente para o fluxo de tráfego é  $e_{vp} = 4 \therefore f_{vp} = 0,69 \Rightarrow C = 4264 \frac{v}{h}$  e,

então,  $\tilde{q}_f = \frac{2500}{3.0,69} = 1208 \frac{veq}{h.fx}$  (correspondente a tráfego de autos apenas, com base

nos fatores equivalentes do HCM/97 para utilização da capacidade/fluxo de tráfego);

- na curva de operação para tráfego de autos para  $\tilde{V}_{FL} = 55,6 \text{ mi/h}$  (seção normal),

obtem-se  $\tilde{V} \cong \tilde{V}_{FL} = 55,6 \text{ mi/h}$  para  $\tilde{q}_f = 1208 \frac{veq}{h.fx}$  e, então,  $\tilde{K} \cong \frac{1208}{55,6} = 21,7 \frac{veq}{mi.fx}$ ;

- o fator equivalente para densidade de tráfego seria  $e'_{vp} = 1,5 \Rightarrow f'_{vp} = 0,93 \frac{V_{eq}}{v}$  para

densidade, obtendo-se  $K = f'_{vp}.\tilde{K} = 0,93.21,7 = 20,2 \frac{v}{mi.fx} = 60,6 \frac{v}{mi}$  (com base nos fatores equivalentes do HCM/2010 para densidade de tráfego; anteriormente eram recomendados os fatores equivalentes em nível como puramente dimensionais);

- portanto, a previsão para a velocidade em tráfego misto seria  $V \cong \frac{2500}{60,6} = 41 \frac{mi}{h}$

(implicitamente há um fator equivalente para velocidade em  $f''_{vp} = \frac{f_{vp}}{f'_{vp}} = \frac{0,69}{0,93} = 0,74$ ).

O procedimento alternativo também precisa ser validado e fornece apenas a velocidade média em tráfego misto (não fornece a velocidade por tipo de veículo). Um procedimento consistente e validado é ainda uma necessidade, sem mencionar os critérios adicionais para obter resultados por tipo de veículo e utilizar dados de campo.