

Estudos sobre entrelaçamentos

João Cucci Neto

Objetivo

Este texto tem como objetivo apresentar a metodologia de análise de trechos de via com entrelaçamento da publicação americana “Highway Capacity Manual” (doravante “HCM”), ilustrando com alguns exemplos.

1. Definições

Seguem três definições para entrelaçamento (em inglês, “weaving”):

a) extraído do Boletim Técnico da CET número 5, “Noções Básicas de Engenharia de Tráfego”, Capítulo 4 (baseado no HCM de 1965), de 1977: “Muitas vezes, a combinação destas situações pode provocar no cruzamento correntes de tráfego que se movem numa mesma direção, acompanhado por sucessivos fluxos de convergência e divergência de tráfego, denominado entrelaçamento. Uma seção de entrelaçamento simples pode ser descrita como um trecho de via com uma mão de direção, acomodando movimento de entrelaçamento”;

b) do site “Sinal de Trânsito” (www.sinaldetransito.com.br), que, por sua vez usou como fonte o Glossário de Termos Técnicos Rodoviários do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte – DNIT: “movimento gradual de convergência e divergência de movimentos de correntes de trânsito que se movem no mesmo sentido”;

c) HCM, edição de 2010: “cruzamento de duas ou mais correntes de tráfego se deslocando no mesmo sentido ao longo de um trecho significativo de rodovia, sem o auxílio de dispositivos de controle de tráfego (exceto placas de orientação)” (do original: “*the crossing of two or more traffic streams travelling in the same direction along a significant length of highway, without the aid of traffic control devices (except for guide signs)*”).

O entrelaçamento pode ocorrer em diversos tipos de configurações viárias. O esquema a seguir (Figura 1) traz um exemplo bem simples de arranjo que gera um dos tipos de entrelaçamento.

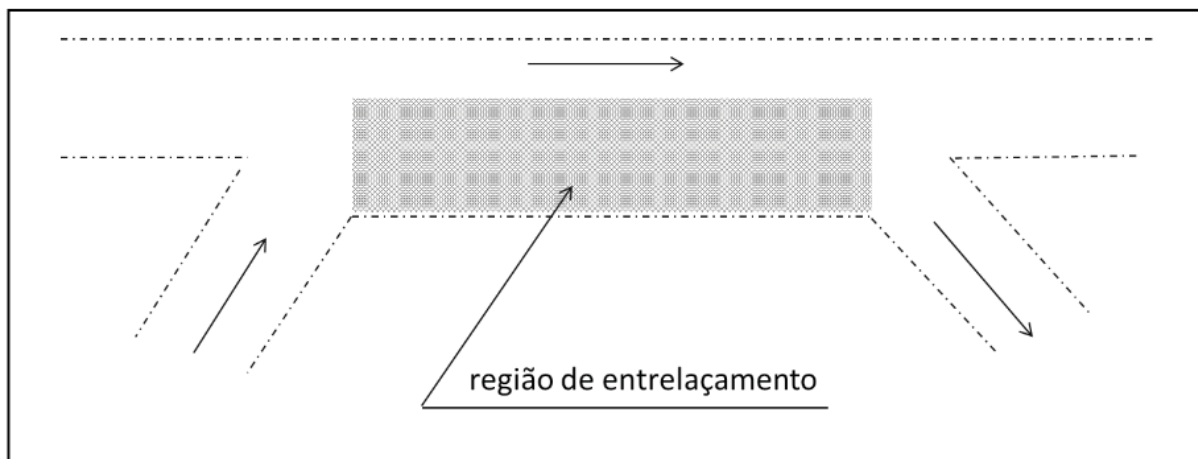


Figura 1

O diagrama da Figura 2 mostra os movimentos de entrada e saída que geram o entrelaçamento.

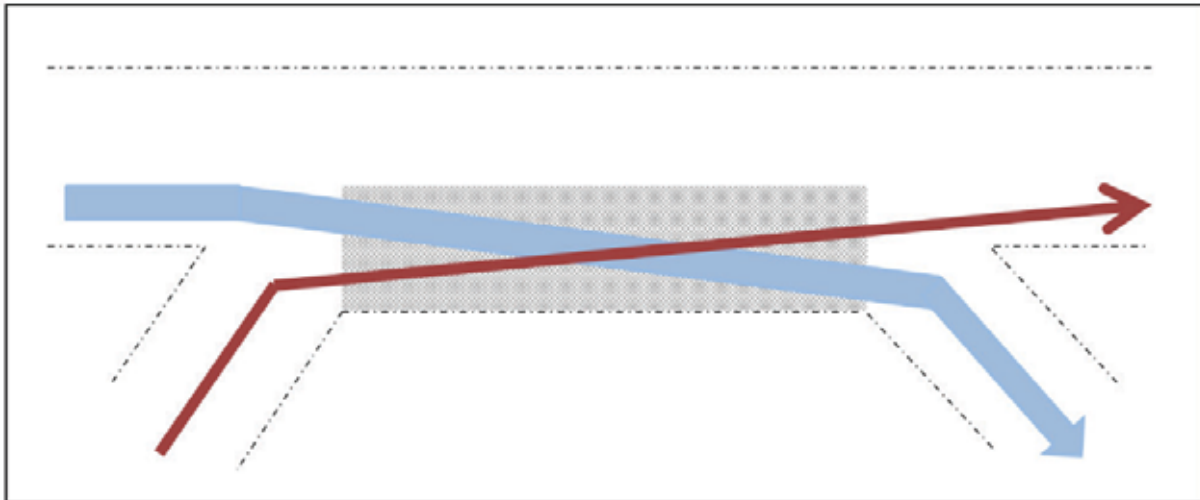


Figura 2

2. Entrelaçamento X travamento

Entrelaçamento e travamento são casos distintos e não devem ser confundidos. Quando um fluxo veicular interrompe o da via transversal, podemos usar os termos bloqueio ou travamento do cruzamento. Como visto nas definições, é inadequado, portanto, chamar a situação anterior de entrelaçamento. No já citado site Sinal de Trânsito, a definição de travamento é: situação em que a fila formada por um semáforos a jusante ou por algum outro gargalo, invade a área do cruzamento impedindo o trânsito normal da transversal à via onde se estenda tal fila. Na foto seguinte (Figura 3), temos um exemplo de travamento (e não de entrelaçamento!) onde o gargalo foi o próprio semáforo, que se encontrava apagado.



Figura 3

3. A interferência do entrelaçamento na fluidez

O entrelaçamento em si não é um problema operacional ou de fluidez. O problema surge quando o entrelaçamento ocorre em uma área insuficiente para a acomodação dos fluxos que se cruzam. Caso a área de entrelaçamento seja insuficiente, poderá haver redução de capacidade, dependendo dos fluxos envolvidos e da configuração da via. O que segue é uma amostra de casos de entrelaçamento e algumas soluções. A configuração mais comum em entroncamentos de rodovias ou de vias expressas é o trevo (figura seguinte) (em inglês, cloverleaf interchange).

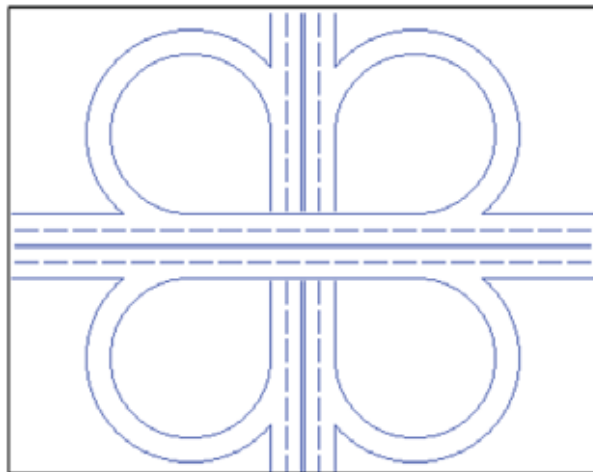


Figura 4

Essa configuração apresenta problemas de entrelaçamento à medida que a demanda aumenta, pois o trecho disponível para os movimentos diagonais é relativamente curto.

Na Figura 5 foram destacados dois movimentos que se entrelaçam: o amarelo é de quem sai da alça e entra na rodovia e o vermelho é de quem vem da rodovia e acessa a alça oposta à primeira. O trecho de entrelaçamento é a pista que fica sob o viaduto (linhas tracejadas).

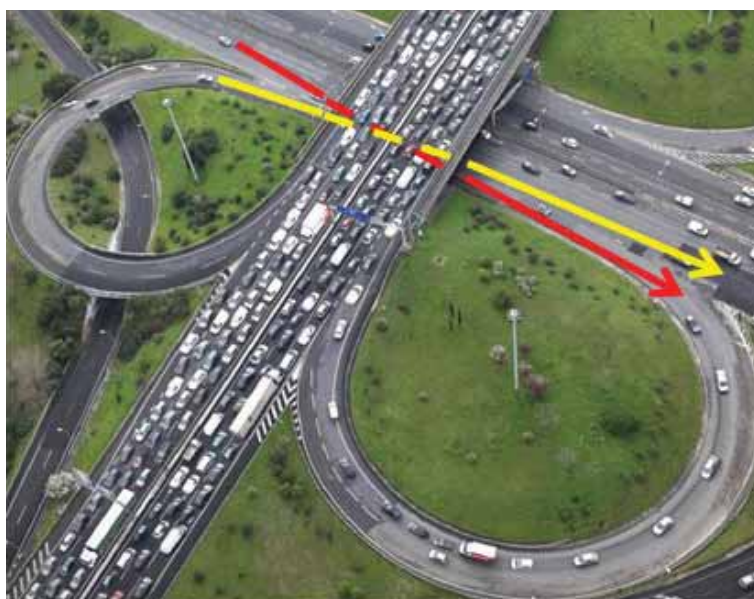


Figura 5

A Figura 6 mostra a perda de capacidade na Marginal Pinheiros, em São Paulo, devido ao entrelaçamento gerado pela saída da alça da Ponte Eng. Roberto Zuccolo (configuração em trevo) com o movimento que quer acessar a outra alça da ponte, no sentido Bairro-Centro.



Figura 6

Na Figura 7, a mesma foto, acrescida de setas que marcam as direções de alguns dos veículos que estão em entrelaçamento. É nítida a diferença de densidade veicular entre os trechos anterior e posterior ao início do entrelaçamento (marcado com a linha tracejada).



Figura 7

Av. Dr. Arnaldo, em São Paulo: na Figura 8, o entrelaçamento dos ônibus que saem do ponto de parada frente ao Hospital Emílio Ribas e têm destino à faixa da esquerda do Viad. Okuhara Koei gera perda de capacidade.



Figura 8

Na Figura 9, as marcações inseridas na foto evidenciam a linha de entrelaçamento e a diferença de densidade entre os dois lados separados pela diagonal. O trecho hachurado mostra a perda de capacidade gerada pelo entrelaçamento.



Figura 9

Novamente a Ponte Eng. Roberto Zuccolo. Desta vez o entrelaçamento ocorria entre a Av. Juscelino Kubistchek (percurso em amarelo) e o acesso à Av. Cidade Jardim, sentido Bairro Centro (percurso em vermelho) (Figura 10). Esse entrelaçamento gerava lentidões tanto na Marginal Pinheiros quanto na Av. JK. A solução para o caso foi a construção (via Polo Gerador) de um viaduto ligando o final da JK à pista central da Marginal (correspondendo ao percurso linha amarela) após o acesso à ponte, de modo que os movimentos que antes se entrelaçavam passaram a ocorrer em níveis diferentes.



Figura 10

A seguir mais dois exemplos de soluções de configurações para se eliminar o entrelaçamento (Figuras 11 e 12, ambas as fontes foram a AutoBan).



Figura 11



Figura 12

A Figura 12 traz a conexão de duas vias com altas demandas e capacidades: Rodoanel Mario Covas e Rodovia dos Bandeirantes. A necessidade de eliminar entrelaçamentos levou a um desenho complexo, mas eficiente.

4. O HCM

Existem métodos para analisar os entrelaçamentos, de modo a dimensionar as características viárias necessárias para uma operação satisfatória. O que segue é uma adaptação do método do **HCM 2010**.

4.1. Breve histórico do HCM

O HCM ou Manual de Capacidade de Rodovias é uma publicação americana, do Transportation Research Board – TRB (www.trb.org). O TRB é uma divisão do National Research Council que, por sua vez, é uma agência ligada ao National Academy of Sciences (Figura 13).

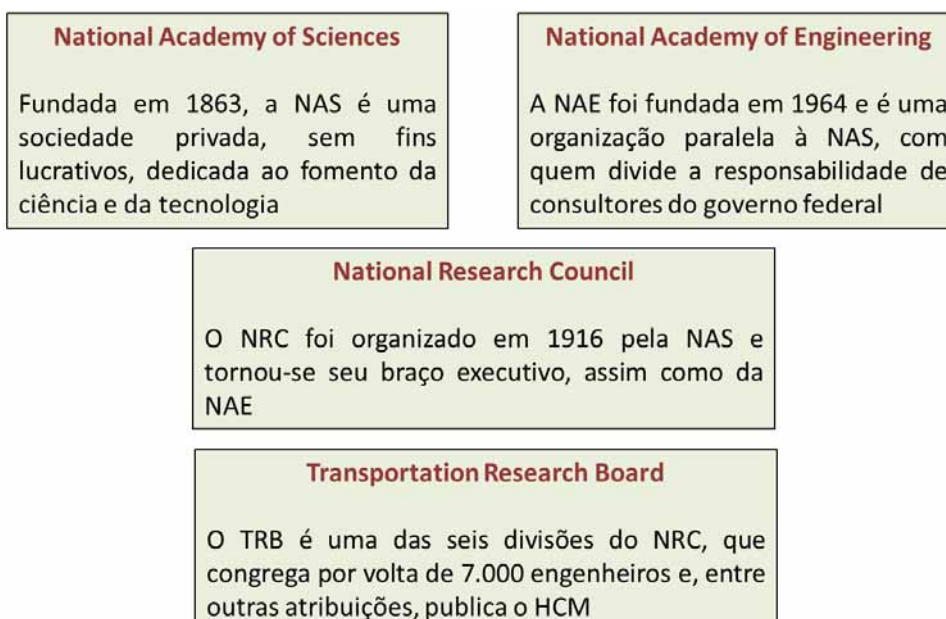


Figura 13

A primeira edição do HCM é de 1950. Em 1965 foi publicada a segunda edição. A terceira, já pelo TRB, é de 1985, que recebeu uma atualização em 1994. A quarta edição foi lançada em 2000. A atual edição, a quinta, é de 2010 e teve em sua elaboração a participação de mais de 300 profissionais das áreas de tráfego e transporte e trouxe, entre outras novidades, “*uma abordagem multimodal integrada de análise e avaliação dos pontos de vista dos motoristas, passageiros, ciclistas e pedestres*”.

O HCM 2010 (Figura 14) tem três volumes físicos e um digital e está disponível na Biblioteca da CET. O Volume 2 é dedicado ao Fluxo Ininterrupto, o Volume 1 é de conceitos e o 3 trata do Fluxo Interrompido.

O entrelaçamento é tratado no Vol. 2, Capítulo 12, intitulado Freeway Weaving Segments (Entrelaçamento em Trechos de Via Expressa). As citações, a teoria e as ilustrações utilizadas daqui para frente neste trabalho foram em grande parte extraídas desse capítulo.



Figura 14

O estudo do entrelaçamento foi sendo modificado ao longo das publicações do HCM. Conforme apontado pelo Prof. Hugo Pietrantonio (Poli/USP), certos parâmetros, como, por exemplo, o fluxo máximo entrelaçante, receberam valores diferentes de edição para edição. Outro caso: a influência do entrelaçamento na capacidade só foi incorporada na versão de 1994.

Assim como ocorre em outra famosa referência americana, o Manual on Uniform Traffic Control Devices – MUTCD, muitos dos critérios do HCM tiveram início de forma empírica, sem clara fundamentação teórica, sendo aprimorados ao longo dos anos. Entre esses critérios estão os da metodologia de cálculo que envolvem os efeitos do entrelaçamento.

Os vários ajustes acumulados nas diferentes versões dos manuais e a incorporação gradativa de bases teóricas para seus modelos trazem resultados práticos satisfatórios e são largamente aplicados em muitos países. Entretanto, devemos lembrar que tanto o HCM quanto o MUTCD são baseados na experiência americana e nem sempre refletem nossa realidade.

4.2. Comentários sobre a metodologia

O que segue é um resumo do conteúdo do Capítulo 12 do HCM, que tem 55 páginas. Não se pretende aqui trazer uma reprodução literal de todo o capítulo do manual, mas apenas apresentar os principais aspectos da metodologia, de modo a propiciar uma análise preliminar e geral sobre os efeitos do entrelaçamento no sistema viário.

Para facilitar o entendimento, uma série de adaptações foi feita no texto original, como as mudanças nas nomenclaturas das variáveis. Ao final desta NT existem tabelas que fazem a correspondência entre a denominação do HCM e a respectiva adaptação.

Também foi feita, sempre que possível, a adaptação nas unidades, com a conversão para o sistema métrico:

- 1 pé(s) (*feet*) = 0,3048 metros
- 1 milha(s) (*miles*) = 1,609344 quilômetros

Aos que se interessarem pelo tema, recomendo um mergulho nas páginas do HCM, onde o método é apresentado com riqueza de detalhes.

Um exercício muito interessante (e grande fôlego!) é procurar adaptar para a nossa realidade alguns dos parâmetros, tropicalizando essa parte do HCM.

5. Um resumo do método do HCM

O método do HCM é dividido em 8 passos. Sua estrutura objetiva determinar o nível de serviço de um trecho de entrelaçamento a partir de dados operacionais (volume, por exemplo) e construtivos (quantidade de faixas, por exemplo).

É importante salientar que o método em questão não se aplica em vias arteriais, devido à forte influência dos semáforos nas manobras de entrelaçamento.

5.1. Conceitos preliminares

Antes de iniciar o método, é preciso conhecer alguns conceitos, variáveis e definições utilizados pelo HCM.

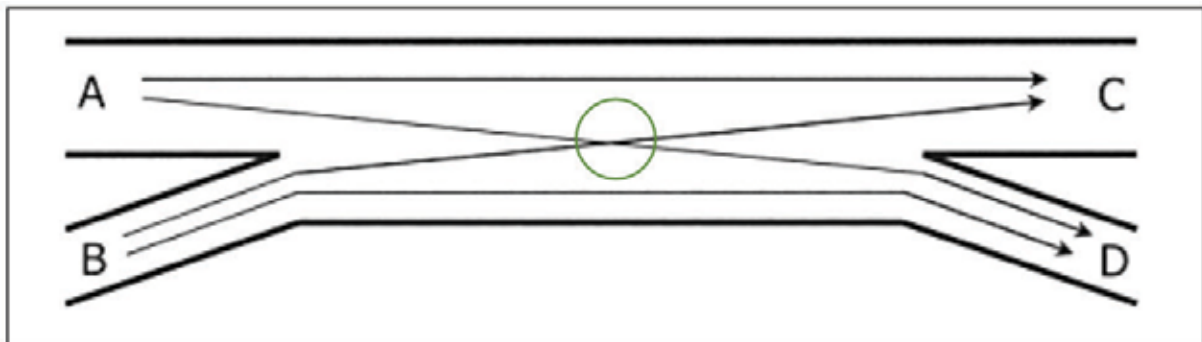


Figura 15

Na figura 15, temos um trecho de via de fluxo contínuo (sem interrupção por semáforo ou outro tipo de sinalização). O movimento de A para D cruza com o que vai de B para C, ou seja, se entrelaçam.

Os movimentos de B para D ou de A para C não se entrelaçam. São os movimentos não-entrelaçantes.

Trechos de entrelaçamento produzem constantes manobras de mudanças de faixa, que podem perturbar o fluxo normal da via. Essa perturbação pode apresentar problemas operacionais e requererem condições especiais de geometria (desenho viário).

As características geométricas que afetam o entrelaçamento são o comprimento, a largura e a configuração do trecho de via onde ocorre o entrelaçamento:

- o comprimento (*length*) é a distância entre a seção de entrada e a seção de saída do trecho de entrelaçamento – neste trabalho será usado **extensão**, em lugar de comprimento;

- a **largura** refere-se ao número de faixas entre a entrada e a saída do trecho de entrelaçamento;
- a **configuração** é definida pela forma como as faixas de entrada e saída estão posicionadas, sendo essa disposição o que determina quantas mudanças de faixa são necessárias para se completar o entrelaçamento.

Existem duas medidas de Extensão (E) que são consideradas no método (Figura 16):

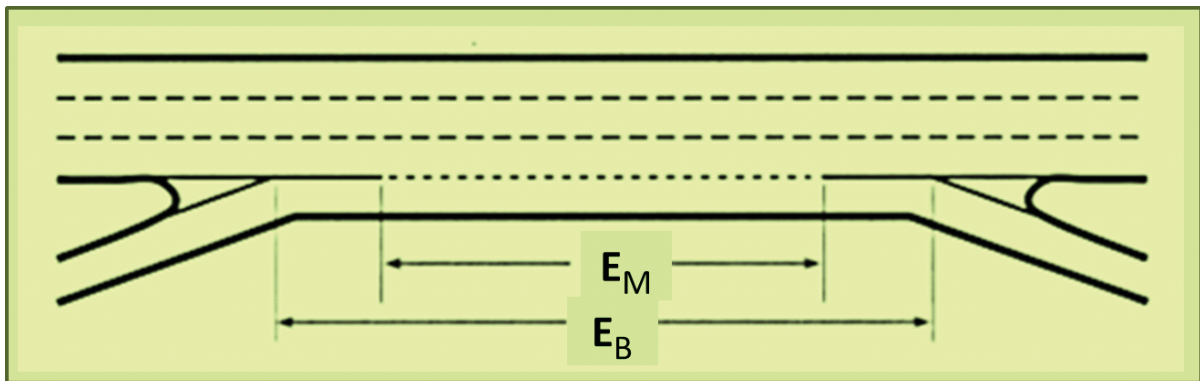


Figura 16

- E_M é a “**Extensão de Manobra**”, ou seja, trecho destinado ao entrelaçamento, em geral, delimitado pela sinalização horizontal (linhas contínuas) – é o usado nos cálculos;
- E_B é a “**Extensão Base**”, ou seja, o ponto de encontro dos prolongamentos da entrada/saída com a faixa da direita da via principal.

Uma consideração quanto à largura da secção de entrelaçamento: deve-se manter o número de faixas equilibrado entre a entrada e a saída do trecho.

Se por um lado faixas adicionais no trecho de entrelaçamento oferecem mais espaço para a convivência entre os movimentos entrelaçantes e os não-entrelaçantes, por outro, encoraja uma maior atividade de troca de faixas, o que não é interessante operacionalmente.

Existe grande variedade de configurações (na Figura 17 estão dois dos inúmeros exemplos possíveis):

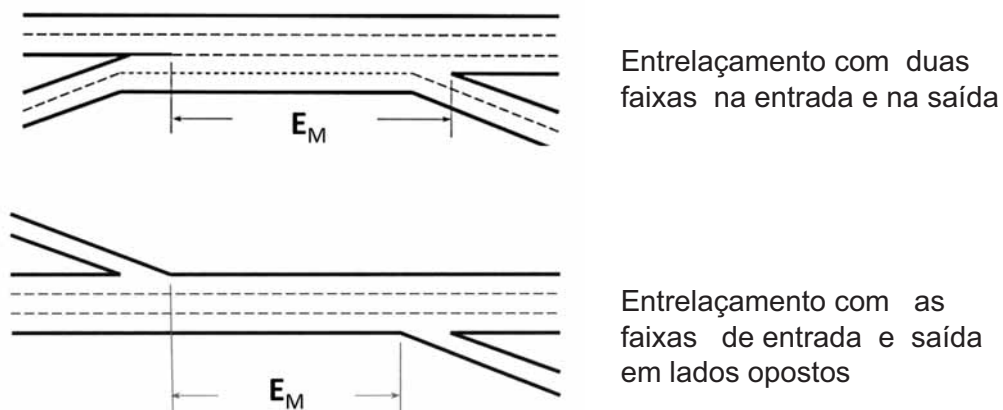


Figura 17

As várias **configurações** possíveis podem ser separadas em dois grupos: entrelaçamento de **lado único** e de **dois lados**.

No de **lado único**, além da entrada e saída estarem posicionadas do mesmo lado da pista (em geral, do lado direito) o entrelaçamento normalmente não necessita mais do que duas mudanças de faixas para ser executado (Figura 18).

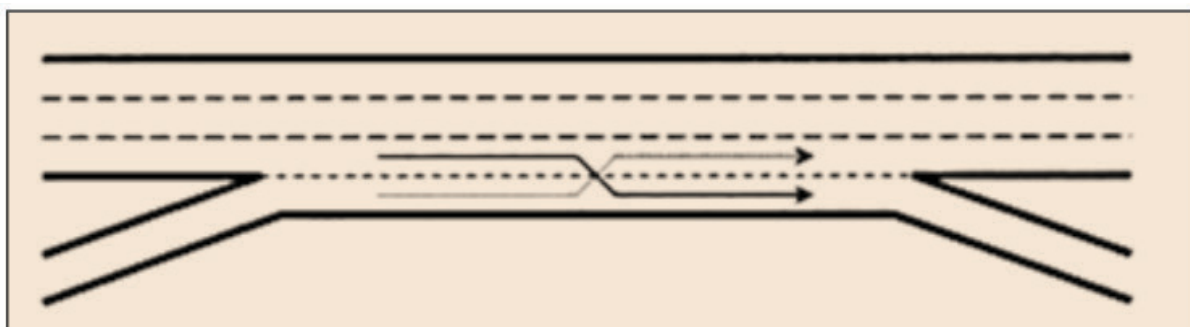


Figura 18

No de **dois lados**, como o nome sugere, a entrada e a saída estão em lados opostos da pista e, em geral, pelo menos um dos movimentos de entrelaçamento requer três ou mais mudanças de faixa para ser completado (Figura 19).

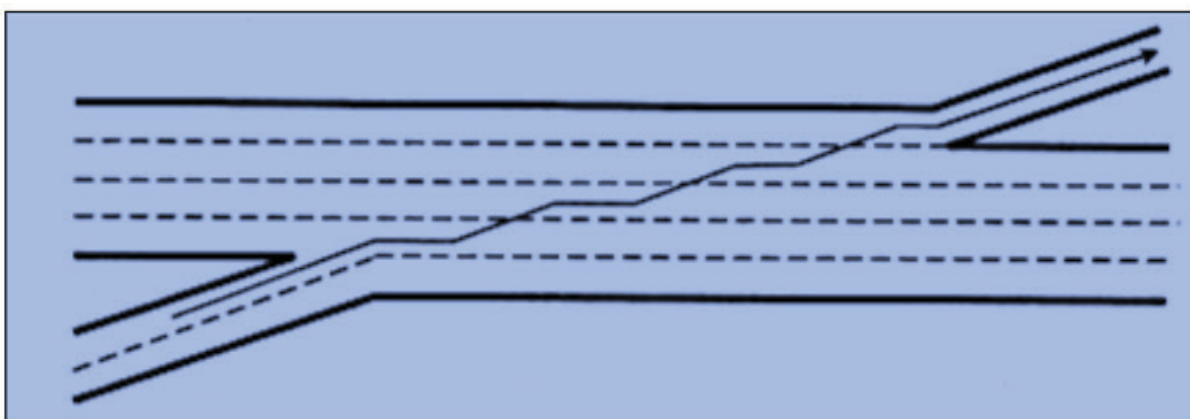


Figura 19

O HCM só considera o entrelaçamento nos casos em que a configuração do trecho de via apresenta uma faixa contínua ligando a entrada e a saída (ver Figura 20).

Para os casos em que não há essa faixa de conexão, o HCM remete para o Cap. 13 (Dimensionamento de junções e bifurcações).

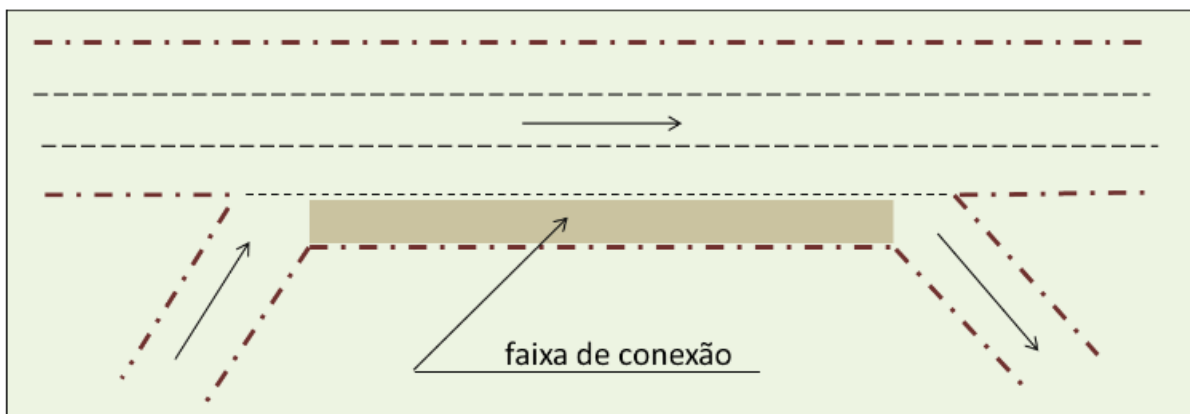


Figura 20

Existem três variáveis que são utilizadas na metodologia de cálculo representando a configuração: MF_e , MF_s e N_{fe} :

- MF_e : número mínimo de mudanças de faixa na entrada;
- MF_s : número mínimo de mudanças de faixa na saída;
- N_{fe} : número de faixas que são ponto de partida para um entrelaçamento, com uma ou nenhuma mudança de faixa (para entrelaçamentos de dois lados, $N_{fe} = 0$, por definição).

A Figura 21 exemplifica essas variáveis.

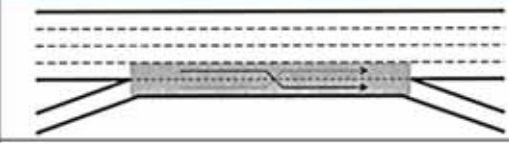
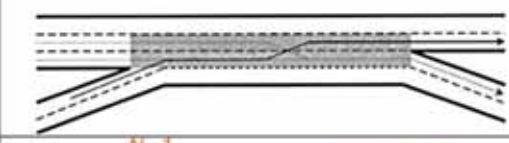
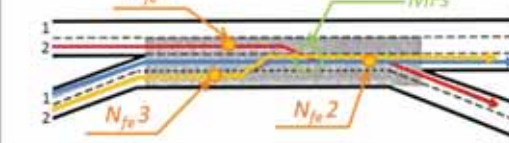
Configuração	Seção inicial	Seção final	MF_e	MF_s	N_{fe}
	4+1	4+1	1	1	2
	3+2	2+2	1	0	2
	2+2	3+2	0	1	3

Figura 21

5.2. Distinção entre fluxo, volume e taxa de fluxo

Seguem as definições usadas no HCM:

- Fluxo (*Flow*): não é usado como variável e nem como sinônimo de volume, designando apenas o movimento de passagem dos veículos, como nos casos de fluxo interrompido e fluxo contínuo;
- Volume (*Volume*) (V): total de veículos que passa em um ponto ou seção de uma faixa ou via durante um determinado intervalo de tempo;
- Taxa de Fluxo (*Flow Rate*) (T_f): o equivalente horário do valor contado em um ponto ou seção de uma faixa ou via durante um intervalo inferior a uma hora;
- Fator de Hora Pico – FHP (*Peak Hour Factor – PHF*): medida da variação do volume em uma hora em relação aos seus 15 minutos de maior volume (V_{15});

$$FHP = \frac{V}{4 \times V_{15}} \quad (A)$$

No HCM a T_f normalmente é expressa em cp = carros de passeio por hora. Quando o FHP é conhecido, pode-se obter a Taxa de Fluxo (T_f):

$$T_f = \frac{V}{FHP} \quad (B)$$

O FHP ajuda a identificar a variação de volume na hora. Um FHP alto (próximo a 1) indica que o volume é estável ao longo da hora (raramente ocorre), ao passo que valores baixos de FHP significam grande variação da demanda. Em geral, em áreas urbanas o FHP varia entre 0,80 e 0,98.

6. Descrição da metodologia

O método do HCM somente é aplicável em vias de trânsito rápido e, portanto, não serve para as arteriais.

Sete dos 8 passos do método a seguir são quantitativos, sendo fornecidas todas as expressões necessárias para se chegar aos resultados de cada passo.

O oitavo e último passo é qualitativo, quando se compara o resultado numérico obtido ao critério de nível de serviço estipulado

O esquema seguinte (Figura 22) mostra os 8 passos do método e sua sequência:

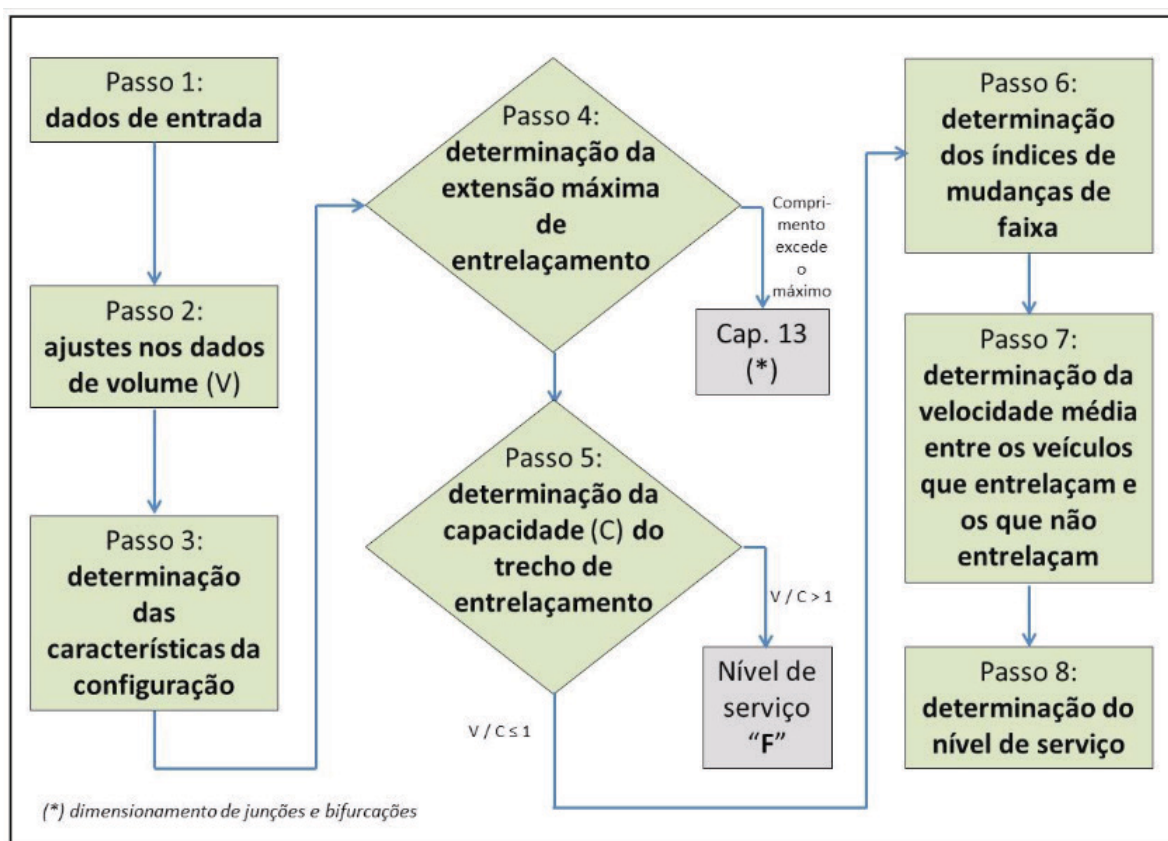


Figura 22

6.1. Passo 1: dados de entrada

A metodologia do HCM se constitui primordialmente em uma ferramenta para ajudar na decisão entre as várias alternativas de um projeto de um novo viário.

Entretanto, é perfeitamente possível usá-la para analisar casos já em operação. Os dados de demanda usados, em geral, são em volumes da hora pico. Caso as taxas de fluxo tenham sido observadas diretamente em campo, esses valores podem ser utilizado diretamente, considerando o Fator de Hora Pico (FHP) = 1,0

6.2. Passo 2: ajustes nos dados de volume

Recomenda-se que os valores vigentes de volume e taxa de fluxo sejam convertidos para seus equivalentes, usando a equação (C):

$$Tf_i = \frac{V_i}{FHP \times F_{vp} \times F_{pop}} \quad (C)$$

Onde,

Tf_i = Taxa de fluxo i sob condições ideais (cp/h);

V_i = Volume horário para o fluxo i (veíc/h);

F_{vp} = Fator de ajuste para presença de veículos pesados;

F_{pop} = Fator de ajuste para tipo de motorista (em geral, de 0,85 a 1,0).

6.3. Passo 3: determinação das características da configuração

Neste passo é calculado o MF_{min} .

MF_{min} é o valor mínimo de mudanças de faixa para completar todos os entrelaçamentos com sucesso (unidade = mudanças de faixa por hora, ou mf/h).

Para entrelaçamentos de lado único, o MF_{min} é determinado pela expressão abaixo (D):

$$MF_{min} = (MF_e \times Tf_e) + (MF_s \times Tf_s) \quad (D)$$

Tf_e e Tf_s são as taxas de fluxo de entrada e de saída, respectivamente.

Para entrelaçamentos de dois lados, o MF_{min} é determinado pela expressão (E):

$$MF_{min} = MF_{DL} \times Tf_{DL} \quad (E)$$

MF_{DL} é o número mínimo de faixas necessárias para completar o entrelaçamento neste tipo de configuração, assim como Tf_{DL} é a taxa de fluxo para o trecho com entrelaçamento de dois lados.

6.4. Passo 4: determinação da extensão máxima de entrelaçamento

Este é um passo crítico, em que se determina a extensão a partir da qual a turbulência do entrelaçamento não mais impacta na capacidade do trecho onde ocorre o entrelaçamento.

A Extensão Máxima (E_{MAX}) é o limite a partir do qual acréscimos ao comprimento do trecho não trazem acréscimos à capacidade.

Chega-se a E_{MAX} pela equação (F):

$$E_{MAX} = [5728 \cdot (1 + TV)^{1,6}] - [1566 \cdot N_{fe}] \quad (F)$$

sendo:

$TV = Tf_{me} / Tf$	TV = Taxa de Volume	(G)
$Tf_{me} = Tf_e + Tf_s$	Tf_{me} = taxa de fluxo dos movimentos entrelaçantes	(H)
$Tf = Tf_{fe} + Tf_{mne}$	Tf_{mne} = taxa de fluxo dos movimentos não entrelaçantes	(I)

Observação: na equação F existem dois valores fixos (5278 e 1566) que não permitem a conversão para o sistema métrico. Desse modo, E_{MAX} deverá ser calculado em pés e seu resultado convertido para metros.

O valor de E_{MAX} é o que determina se a análise da configuração prossegue como um caso a ser tratado como entrelaçamento ou não.

Compara-se E_{MAX} com a E_M (Extensão de Manobra): se $E_M < E_{MAX}$, o método prossegue, indo ao Passo 5.

Se $E_M \geq E_{MAX}$, a configuração deve ser tratada de outra forma, utilizando os preceitos do Cap. 13 (*Dimensionamento de junções e bifurcações*) do HCM.

6.5. Passo 5: determinação da capacidade no trecho de entrelaçamento

A Capacidade (C_c) de um trecho de entrelaçamento pode ser controlada por dois fatores: a densidade no trecho ou pelo fluxo total dos movimentos entrelaçantes.

Pode ocorrer o colapso do trecho de entrelaçamento quando a densidade média de todos os veículos no trecho alcança 69 cp/km/faixa (valor convertido de 43 pc/mi/lm).

A densidade de 69 cp/km/fx equivale a um espaçamento de 14,5 m entre os carros, conforme mostra a Figura 23.

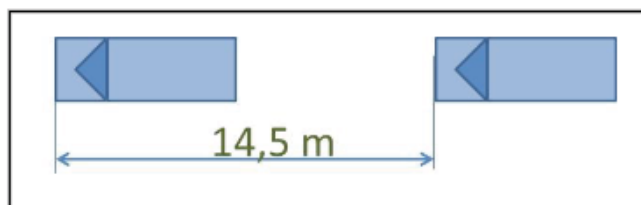


Figura 23

A outra possibilidade de colapso no trecho de entrelaçamento é quando o fluxo total dos movimentos entrelaçantes (Tf_{me}) excede a 2.400 cp/h para casos em que o $N_{fe} = 2$ faixas ou, 3.500 cp/h para os casos em que o $N_{fe} = 3$ faixas.

Os valores anteriores são para entrelaçamentos de **lado único**.

Para entrelaçamento de **dois lados**, $N_{fe} = 0$. Entretanto, o HCM não prevê um valor limite para Tf_{me} para esse tipo de entrelaçamento, admitindo que a metodologia é apenas aproximada nesse caso.

A densidade para causar um colapso é atingida a partir de valores mais baixos dos que os obtidos nos casos de entrelaçamento de **lado único**. A estimativa da capacidade de entrelaçamento pela densidade é dada pela equação (J):

$$C_D = C_{bas} - [432,2(1 + TV)^{1,6}] + [0,0765 \cdot CM] + [119,8 \cdot N_{fe}] \quad (J)$$

sendo:

C_D = capacidade de entrelaçamento da seção (cp/h/fx);

C_{bas} = capacidade de uma seção base de mesma VFL (*) do trecho de entrelaçamento em questão (cp/h/fx);

(*) VFL = Velocidade de Fluxo Livre.

O cálculo apresentado em (J) resulta na capacidade de entrelaçamento da seção que se está estudando (C_D), a partir de uma comparação com a capacidade de uma seção base de uma via expressa (C_{bas}). Para tanto, ambas as seções devem ter a mesma Velocidade de Fluxo Livre (VFL).

Na equação (J) o valor de C_D está expresso por faixa. Para a obtenção do valor total da capacidade (C_C), neste caso, pela densidade (em veíc/h), é utilizada a expressão (K):

$$C_C = C_D \cdot N_{fe} \cdot f_p \cdot f_{pop} \quad (K)$$

As expressões (L) e (M) permitem calcular a capacidade pela taxa do total de fluxo (C_F) dos movimentos entrelaçantes:

$$C_{F2} = \frac{2400}{TV} \quad (L) \quad \text{Para } N_{fe} = 2 \text{ faixas}$$

$$C_{F3} = \frac{3500}{TV} \quad (M) \quad \text{Para } N_{fe} = 3 \text{ faixas}$$

sendo C_F a capacidade de todas as faixas do trecho de entrelaçamento, em condições normais.

Para a obtenção do valor total da capacidade (C_c), em veíc/h, é utilizada a expressão (N):

$$C_c = C_{FN} \cdot f_p \cdot f_{pop} \quad (N)$$

sendo o valor de C_{FN} calculado a partir da equação (L) ou (M), conforme o número de faixas necessárias para efetuar os entrelaçamentos.

A capacidade para o trecho de entrelaçamento em estudo será a menor entre as duas C_c calculadas.

Uma vez determinada a capacidade do trecho (C_c), deve-se calcular a razão entre a taxa de fluxo e a capacidade do trecho de entrelaçamento (Tf/C), seguindo o que mostra a equação (O).

$$\frac{Tf}{C} = \frac{Tf \cdot f_{vp} \cdot f_{pop}}{C_c} \quad (O)$$

sendo C = capacidade-base.

Esse ajuste é necessário porque a taxa de fluxo (Tf) é estabelecida para condições ideais equivalentes e CC para as condições correntes.

Se Tf/C é maior do que 1,0, a demanda excede a capacidade e o trecho apresentará um Nível de Serviço (NS) igual a F. Nesses casos, o HCM direciona o leitor para a metodologia do Capítulo 10, *Conexões de vias expressas*.

Se Tf/C for menor do que 1,0, o método para análise de entrelaçamento prossegue (Passo 6).

6.6. Passo 6: determinação dos índices de mudanças de faixa

A taxa entre os veículos que entrelaçam e os que não entrelaçam em um determinado trecho nos dá a medida direta da turbulência provocada. Essa taxa também permite que se determine as velocidades e densidades no trecho analisado. Com esses dados será possível determinar o Nível de Serviço (NS) existente ou estimá-lo.

A taxa de mudança de faixa estimada leva em conta a composição do tráfego, pois assume-se que veículos pesados causem mais turbulência do que os de passeio.

Um veículo pode fazer três tipos de mudança de faixa em um trecho de entrelaçamento:

- (1) mudanças obrigatórias: são as indispensáveis para execução do entrelaçamento. No Passo 3 vimos como se determina esse índice (MF_{min})
- (2) mudanças opcionais para os movimentos entrelaçantes: são movimentos que não são imprescindíveis para realizar o entrelaçamento e que ocorrem no trecho em avaliação

- (3) mudanças opcionais para movimentos não entrelaçantes: são mudanças de faixa que podem ocorrer no trecho de entrelaçamento, mas nem a sua configuração ou a origem/destino dos veículos exigem tais manobras

Este Passo mostra como determinar a taxa total de mudança de faixa (MF_{total}). Esse cálculo é feito em duas partes, sendo uma para os veículos entrelaçantes (MF_{min}) e outra para os não entrelaçantes, conforme mostra a equação P:

$$MF_{total} = MF_{min} + 0,39[(E_M - 92)^{0,5} \cdot NF^2 (1 + DC)^{0,8}] \quad (P)$$

sendo:

NF = número de faixas do trecho de entrelaçamento;

DC = Densidade de conexões;

“DC” é o número de conexões (acessos e saídas de um entroncamento) em uma extensão de +/- 5 km do centro do trecho de entrelaçamento estudado, dividido por 10. Unidade: conexões/km.

O termo “ $E_M - 92$ ” indica que para trechos iguais ou menores que 92 metros os veículos entrelaçantes só realizam as mudanças de faixa necessárias, que seria $Mf_{total} = MF_{min}$.

O trecho de entrelaçamento estudado deve ser contado como uma unidade de conexão no termo “DC”.

A estimativa do índice de mudanças de faixa para os veículos que não entrelaçam (I_{mne}) é dada por (Q):

$$I_{mne} = \frac{E_M \cdot DC \cdot Tf_{mne}}{10.000} \quad (Q)$$

As três variáveis que compõem esse índice, dependendo do seu grau, podem interferir na operação do trecho em estudo, mesmo sendo executadas por veículos que não efetuam entrelaçamentos.

São usados dois modelos para prever a taxa na qual veículos não entrelaçantes mudam de faixa em trechos de entrelaçamento (T_{mf1} e T_{mf2}), conforme (R) e (S):

$$T_{mf1} = (0,206 \cdot Tf_{mne}) + (0,542 \cdot E_M) - (192,6 \cdot NF) \quad (R)$$

Eventualmente a equação (R) poderá gerar resultados negativos. Nesses casos, deverá ser adotado $T_{mf1} = 0$.

O segundo modelo é usado para casos em que a taxa de movimentos não entrelaçantes é extremamente alta (maior ou igual a 1.950):

$$T_{mf2} = 2.135 + 0,223 (Tf_{nme} - 2.000) \quad (S)$$

As equações (Q) e (S) são descontínuas. Se a taxa estiver entre 1.300 e 1.950, há a necessidade de uma extrapolação direta entre T_{mf1} e T_{mf2} , resultando em um T_{mf3} , conforme mostra a expressão (T):

$$T_{mf3} = T_{mf1} + (T_{mf2} - T_{mf1}) \left(\frac{I_{mne} - 1.300}{650} \right) \quad (T)$$

A taxa total de mudanças de faixa (T_{mft}) no trecho de entrelaçamento é obtida pela equação (U)

$$T_{mft} = MF_{total} + T_{mf} \quad (U)$$

6.7. Passo 7: determinação da velocidade média entre os veículos que entrelaçam e os que não entrelaçam

A velocidade média é calculada de forma separada para veículos entrelaçantes e não entrelaçantes (VM_E e VM_{NE}).

A velocidade média dos veículos entrelaçantes no trecho em estudo (VM_E) é obtida pela equação (V):

$$VM_E = 15 + \left(\frac{VFL - 15}{1 + FI} \right) \quad (V)$$

sendo: FI = Fator de intensidade de entrelaçamento e VFL = Velocidade de Fluxo Livre.

O HCM define a VFL de duas maneiras:

1. é a velocidade teórica quando a densidade e a taxa de fluxo em um trecho analisado são ambas igual a zero
2. é a velocidade predominante em vias expressas à taxa de fluxo entre zero e 1.000 passageiros/hora/faixa

A expressão para cálculo do FI é representada em (W):

$$FI = 0,266 \left(\frac{T_{mft}}{E_M} \right)^{0,789} \quad (W)$$

A velocidade média dos veículos não entrelaçantes (VM_{NE}) é obtida pela equação (X):

$$VM_{NE} = VFL - (0,0072 MF_{min}) - \left(0,0048 \frac{T_f}{NF} \right) \quad (X)$$

A velocidade média (VM) para todos os veículos no trecho de entrelaçamento surge em (Y):

$$VM = \frac{Tf_{me} + Tf_{mne}}{\left(\frac{Tf_{me}}{VM_E}\right) + \left(\frac{Tf_{mne}}{VM_{NE}}\right)} \quad (Y)$$

6.8. Passo 8: determinação do nível de serviço

O nível de serviço de um trecho de entrelaçamento em uma via expressa é relativo à sua densidade (D) (expressão Z):

$$D = \frac{\left(\frac{T_f}{NF}\right)}{VM} \quad (Z)$$

O quadro da Figura 24 traz as classificações dos níveis de serviço em função da densidade, com os valores adaptados para o sistema métrico (carro de passeio/km/faixa):

Nível de Serviço	Densidade (cp/km/faixa)	
	Trechos de entrelaçamento em vias expressas	Trechos de entrelaçamento em rodovias com 2 ou mais faixas ou rodovias tipo coletora-distribuidora (*)
A	0 – 16	0 – 19
B	> 16 – 32	> 19 – 39
C	> 32 – 45	> 39 – 51
D	> 45 – 56	> 51 – 58
E	> 56	> 58
F	a demanda supera a capacidade	

Figura 24

(*) o HCM denomina rodovia coletora-distribuidora como uma via paralela à expressa, sem acesso local, construída para evitar entrelaçamentos.

O limite entre os níveis E e F representa a diferença entre fluxos estável e instável, sendo que este último ocorre quando a demanda veicular supera a capacidade viária.

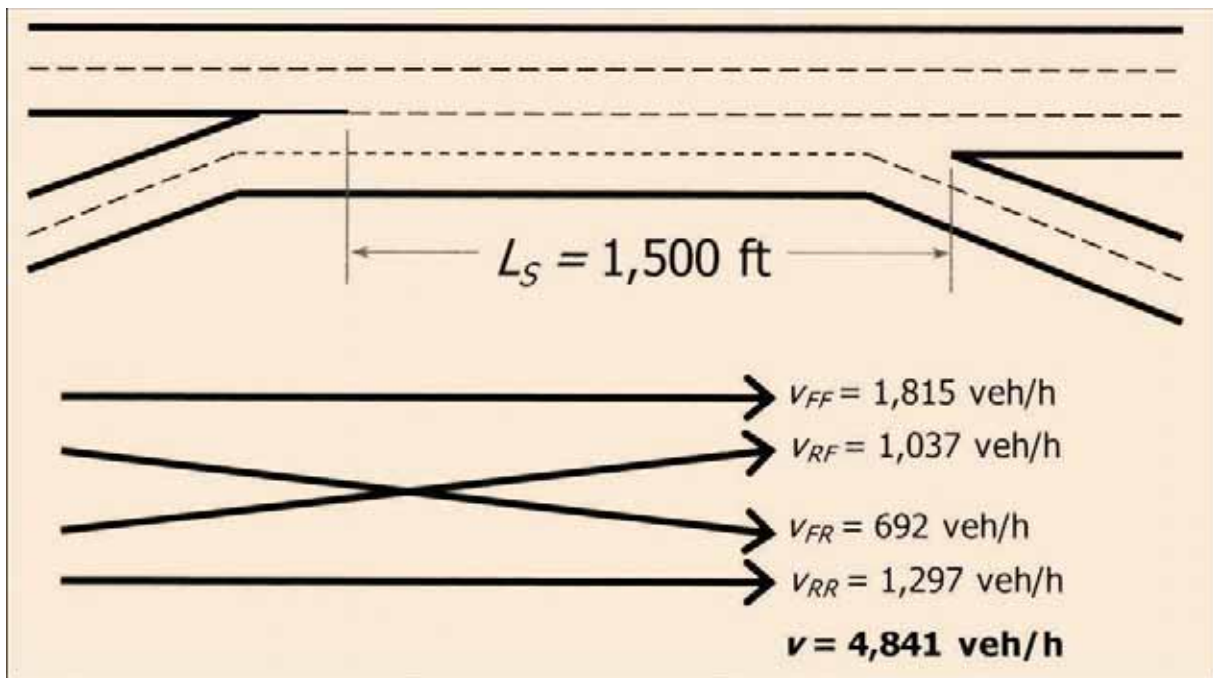
7. Apresentação de casos

O HCM traz cinco exemplos de problemas de entrelaçamento resolvidos numericamente:

1. Nível de Serviço (NS) de um trecho de entrelaçamento principal;
2. NS de um trecho com entrelaçamento em rampa;
3. NS de um trecho de entrelaçamento de dois lados;
4. Projeto de um trecho de entrelaçamento principal para um determinado NS;
5. Construção de uma tabela de volumes de serviço.

Foram reproduzidos a partir daqui os exemplos 1 e 4.

7.1. Exemplo 1: Qual é o Nível de Serviço (NS) do trecho de entrelaçamento abaixo?



Dados adicionais (mantidas as unidades em milhas = mi):

- FHP = 0,91% (para todos os movimentos)
- Veículos pesados = 10% caminhões; 0% autos de passeio (para todos os movimentos)
- Tipo de motorista = usuário regular
- VFL = 65 mi/h
- $C_{bas} = 2.350 \text{ cp/h/fx}$ (para VFL = 65 mi/h)
- DC = 0,8 con/mi
- Terreno nivelado

Seguindo os 8 passos da metodologia:

7.1.1. Passo 1 – dados de entrada: foram fornecidos no enunciado.

7.1.2. Passo 2 – ajustes nos dados de volume

Usamos a Equação (C) para conversão dos 4 componentes da demanda em taxa de fluxo. Antes, é preciso consultar o Capítulo 11 do HCM para obtenção dos valores de F_{vp} :

$$F_{vp} = \frac{1}{1 + P_{CO} (PE_{CO} - 1) + P_{VP} (PE_{VP} - 1)} \quad (*)$$

(*) = equação extraída do Cap. 11 do HCM. F_{vp} é o fator de ajuste para a presença de veículos pesados.

Onde:

- P_{CO} = Proporção de caminhões ou ônibus na corrente de tráfego;
- PE_{CO} = Passageiro-veículo equivalente (PVE) de um caminhão ou ônibus na corrente de tráfego;

- P_{VP} = Proporção de veículos de passeio na corrente de tráfego;
- PE_{VP} = PVE de um veículo de passeio na corrente de tráfego;

Aplicando os dados do exemplo na equação (*), temos:

$$F_{vp} = \frac{1}{1+0,10(15-1)} = 0,952$$

Agora a equação (C) pode ser usada para converter todos os volumes do enunciado:

$$Tf_i = \frac{V_i}{FHP \times F_{vp} \times F_{pop}} = \frac{V_i}{0,91 \times 0,952 \times 1}$$

Onde V_i assume os valores de V_{FF} , V_{FR} , V_{RF} e V_{RR} presentes na figura inicial do enunciado:

$$v_{FF} = \frac{1815}{0,91 \times 0,952 \times 1} = 2.094 \text{ cp/h}$$

$$v_{FR} = \frac{692}{0,91 \times 0,952 \times 1} = 798 \text{ cp/h}$$

$$v_{FR} = \frac{1037}{0,91 \times 0,952 \times 1} = 1.197 \text{ cp/h}$$

$$v_{FR} = \frac{1297}{0,91 \times 0,952 \times 1} = 1.497 \text{ cp/h}$$

Podemos agora obter a Taxa de Volume (TV):

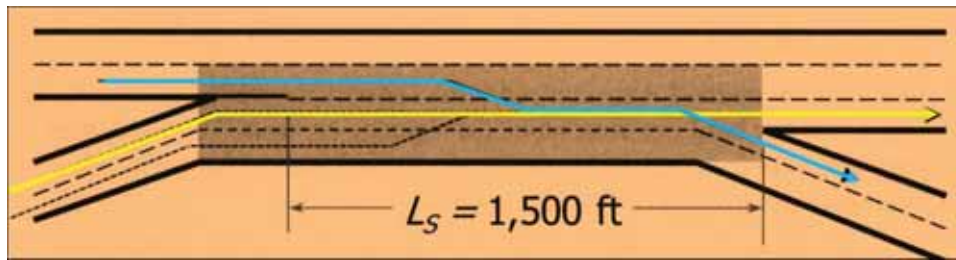
$$\begin{aligned} Tf_{me} &= 798 + 1197 = 1.195 \text{ cp/h} \\ Tf_{nme} &= 2094 + 1497 = 3.591 \text{ cp/h} \\ Tf &= 1195 + 3591 = 5.586 \text{ cp/h} \end{aligned}$$

$$TV = \frac{1195}{5586} = 0,357$$

Fim do Passo 2

7.1.3. Passo 3 – determinação das características da configuração

Neste passo determinaremos os números mínimos de mudanças de faixa na entrada e na saída e as faixas necessárias para se realizar os entrelaçamentos (M_{fe} , MF_s e N_{fe}). Com esses dados será possível calcular o valor mínimo de mudança de faixas para se completar todos os entrelaçamentos (M_{fmin}), usando a equação (D).



Na figura fornecida, podemos ver que os veículos que usam a rampa de acesso podem entrelaçar sem mudar de faixa (linha amarela) e, portanto, $M_{fe} = 0$.

Ainda baseando-se na figura fornecida, temos que os veículos que vão da pista para a rampa de saída entrelaçam com ao menos uma mudança de faixa (linha azul) e, portanto, $M_{fs} = 1$.

N_{fe} considera a segunda faixa de acesso da rampa, o que resulta em $N_{fe} = 3$ (a terceira figura do Quadro 1, página 48, tem a mesma configuração da deste exemplo e traz a assinalação das três faixas).

Com os dados indicados, podemos usar a equação (D):

$$MF_{min} = (MF_e \times Tf_e) + (MF_s \times Tf_s)$$

Substituindo os valores, temos:

$$MF_{min} = (0 \times 1197) + (1 \times 798) = 798 \text{ mf/h}$$

Fim do Passo 3.

7.1.4. Passo 4 – determinação da extensão máxima de entrelaçamento (E_{max})

Para determinar essa extensão, aplicamos a equação (E):

$$E_{MAX} = [5728 \cdot (1 + TV)^{1,6}] - [1566 \cdot N_{fe}]$$

Substituindo-se as variáveis pelos dados obtidos temos:

$$E_{MAX} = [5728 \cdot (1 + 0,357)^{1,6}] - [1566 \cdot 3] = 4.639 \text{ pés}$$

Como a extensão máxima obtida é significativamente maior do que a existente (4.639 calculados contra os 1.500 pés do enunciado), existe a operação em entrelaçamento e a análise deve continuar, indo para o Passo 5.

Fim do **Passo 4**.

7.1.5. Passo 5 – determinação da capacidade no trecho de entrelaçamento

A capacidade deve ser controlada por um dos 2 fatores: a densidade no trecho ou pelo fluxo total dos movimentos entrelaçantes.

O primeiro caso é resultado da aplicação das equações (J) e (K) e o segundo pelas equações (L) e (M) ou (N), como veremos a seguir.

Capacidade controlada pela densidade – equações (J) e (K):

$$C_D = C_{bas} - [438,2(1 + TV)^{1,6}] + [0,0765 \cdot EM] + [119,8 \cdot Nfe]$$

$$C_D = 2400 - [438,2(1 + 0,424)^{1,6}] + [0,0765 \cdot 1000] + [119,8 \cdot 2]$$

$$C_D = 1.944 \text{ cp/h/fx}$$

$$C_c = C_D \cdot N_{fe} \cdot f_p \cdot f_{pop}$$

$$C_c = 1944 \cdot 5 \cdot 1 \cdot 1 = 9.721 \text{ veíc/h}$$

Capacidade pelo fluxo total dos movimentos entrelaçantes – equações (M) e (N)

[obs.: usou-se a equação (M) ao invés da (L) porque $N_{fe} = 3$]

$$(M) \quad C_{F3} = \frac{3500}{TV} = \frac{3500}{0,357} = 9.800 \text{ cp/h}$$

$$(N) \quad C_c = C_F \cdot f_p \cdot f_{pop} = 9800 \cdot 0,952 \cdot 1 = 9.333 \text{ veíc/h}$$

Foram obtidos 2 valores de capacidade, 8.038 veíc/h e 9.333 veíc/h. O valor de controle deve ser o menor dos dois.

Como a taxa de fluxo total da demanda é de 5.320 veíc/h (*), portanto bem abaixo do menor dos valores calculados (8.038 veíc/h), a capacidade é suficiente e não atingirá o nível de serviço F. Avançamos para o Passo 6

(*) esse valor é obtido a partir do FHP e do volume fornecidos, respectivamente 0,91 e 4.841 veíc/h.

Ou seja $4.841 / 0,91 = 5.320 \text{ veíc/h}$, que é a taxa de fluxo total da demanda.

Deixo aqui um agradecimento ao Prof. Hugo Pietrantonio, que me ajudou, entre outras muitas coisas, a descobrir a origem do 5.320.

Fim do Passo 5.

7.1.6. Passo 6 – determinação dos índices de mudanças de faixa

Neste exemplo são aplicadas as equações de (P) a (S) e mais a (U).

São calculados dois índices: os dos veículos entrelaçantes (P) e os do não entrelaçantes (Q) e (R).

Índice de mudança de faixas de veículos entrelaçantes:

$$MF_{total} = MF_{min} + 0,39[(E_M - 300)^{0,5} \cdot NF^2 (1 + DC)^{0,8}]$$

$$MF_{total} = 798 + 0,39[(1500 - 300)^{0,5} \cdot 4^2 (1 + 0,8)^{0,8}] = 1.144 \text{ mf/h}$$

Onde mf = mudanças de faixa

Índice de mudança de faixas de veículos não entrelaçantes:

$$(Q) \quad I_{mne} = \frac{E_M \cdot DC \cdot T_{fmne}}{10.000} = \frac{1500 \cdot 0,8 \cdot 3591}{10.000} = 431 < 1300$$

A próxima equação, que poderia ser a (R), a (S) ou a (T) depende do valor de I_{mne} . Como foi menor que 1300, usamos a equação (R):

$$T_{mf1} = (0,206 \cdot T_{fmne}) + (0,542 \cdot E_M) - (192,6 \cdot NF)$$

$$T_{mf1} = (0,206 \cdot 3591) + (0,542 \cdot 1500) - (192,6 \cdot 4) = 782 \text{ mf/h}$$

A taxa total de mudanças de faixa (T_{mft}) é obtida pela equação (U)

$$T_{mft} = MF_{total} + T_{mf} \quad (U)$$

$$T_{mft} = 1144 + 782 = 1.926 \text{ mf/h}$$

Fim do Passo 6.

7.1.7. Passo 7 – determinação da velocidade média entre os veículos que entrelaçam e os que não entrelaçam.

A velocidade média é obtida por meio das equações (V) até (Y)

$$(W) \quad FI = 0,266 \left(\frac{T_{mft}}{E_M} \right)^{0,789} = 0,226 \left(\frac{1926}{1500} \right)^{0,789} = 0,275$$

Uma vez determinado o Fator de Intensidade de entrelaçamento (FI), vamos para as equações (V) (velocidade dos veículos entrelaçantes) e (X) (não entrelaçantes):

$$(V) \quad VM_E = 15 + \left(\frac{VFL - 15}{1 + FI} \right) = 15 + \left(\frac{65 - 15}{1 + 0,275} \right) = 54,2 \text{ mi/h}$$

$$(X) \quad VM_{NE} = VFL - (0,0072 MF_{min}) - \left(0,0048 \frac{Tf}{NF} \right)$$

$$VM_{NE} = 65 - (0,0072 \cdot 798) - \left(0,0048 \frac{5586}{4} \right) = 52,5 \text{ mi/h}$$

A aplicação da equação (Y) resultará na velocidade média de todos os veículos no trecho:

$$(Y) \quad VM = \frac{Tf_{me} + Tfmne}{\left(\frac{Tf_{me}}{VM_E}\right) + \left(\frac{Tf_{mne}}{VM_{NE}}\right)}$$

$$VM = \frac{3591 + 1995}{\left(\frac{3591}{52,5}\right) + \left(\frac{1995}{54,2}\right)} = 53,1 \text{ mi/h}$$

Fim do Passo 7.

7.1.8. Passo 8 – determinação do nível de serviço

Finalmente, por meio da equação (Z), a velocidade é convertida em densidade (D)

$$(Z) \quad D = \frac{\left(\frac{T_f}{NF}\right)}{VM} = \frac{\left(\frac{5586}{4}\right)}{53,1} = 26,3 \text{ cp/mi/px}$$

O valor de 26,3 cp/mi/px deve ser comparado com o Quadro 24 para verificação em que nível de serviço o trecho do exemplo se encontra.

O Quadro 24 foi convertido para o sistema métrico. No sistema inglês, o nível de serviço correspondente à densidade calculada é o "C".

Fim do Passo 8.

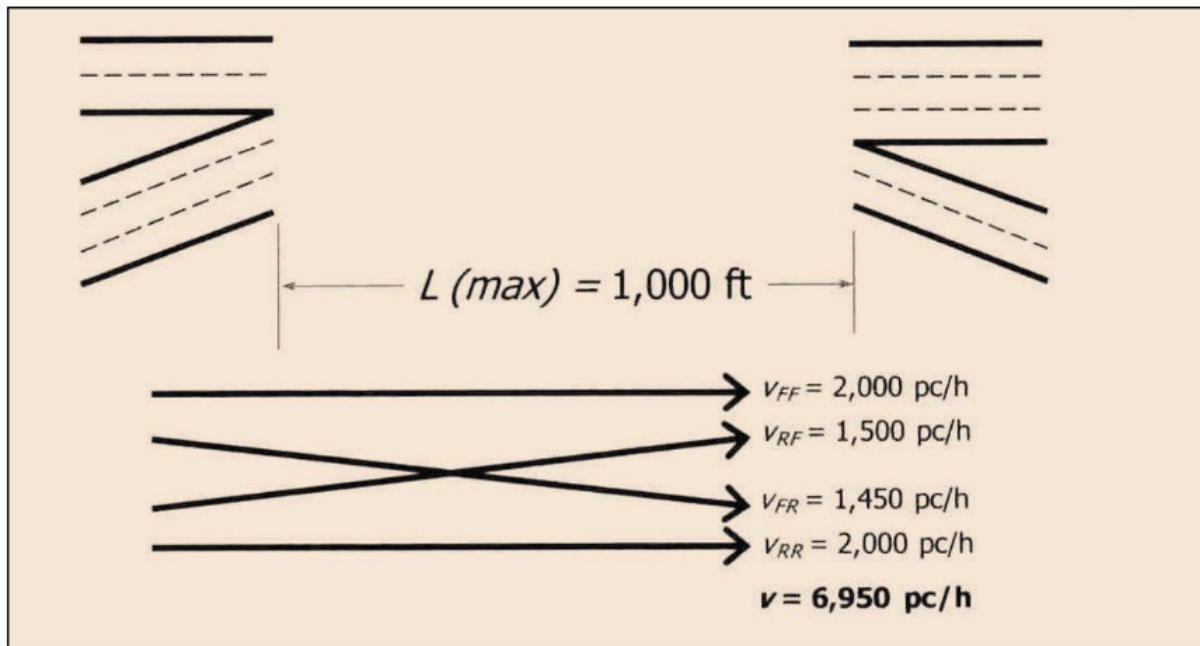
O resultado mostrou que o trecho do exemplo opera com nível de serviço C, com velocidade média de 53,1 mi/h. Os veículos entrelaçantes andam em uma velocidade ligeiramente maior, por causa que a configuração geométrica os favorece em relação aos não entrelaçantes. A taxa de fluxo é de 4.481 veíc/h bem menor do que a capacidade do trecho (8.038 veíc/h), o que indica que a demanda pode ainda crescer significativamente.

Fim do Exemplo 1.

Conforme citado no início deste Item, serão apresentados os Exemplos 1 e 4 dos cinco que o HCM traz. Sendo assim, segue o Exemplo 4.

7.2. Exemplo 4: Projeto de um trecho de entrelaçamento principal para um determinado Nível de Serviço

Dados principais e configuração geométrica (5 faixas na entrada, pista principal + rampas e 5 na saída):



Dados adicionais (*mantidas as unidades em milhas = mi*):
 FHP = 1,0 (toda a demanda é considerada como taxa de fluxo)
 Veículos pesados = 0% (apenas carros de passeio)
 Tipo de motorista = usuário regular
 VFL = 75 mi/h
 $C_{bas} = 2.400 \text{ cp/h/fx}$ (para VFL = 75 mi/h)
 DC = 1,0 con/mi Terreno nivelado

Este exemplo faz uma comparação entre 2 alternativas de geometria: uma com a configuração inicial das rampas e a outra com uma faixa a mais na rampa de saída. Em ambos os casos a seção de conexão entre as rampas tem 5 faixas.

7.2.1. Passo 1 – dados de entrada: foram fornecidos no enunciado.

7.2.2. Passo 2 – ajustes nos dados de volume

Neste caso não há ajustes, pois o FHP = 1,0. Os valores críticos de volume são os do enunciado, mais as composições a seguir:

$$Tf_{me} = 1500 + 1450 = 2.950 \text{ cp/h} \quad Tf_{nme} = 2000 + 2000 = 4.000 \text{ cp/h}$$

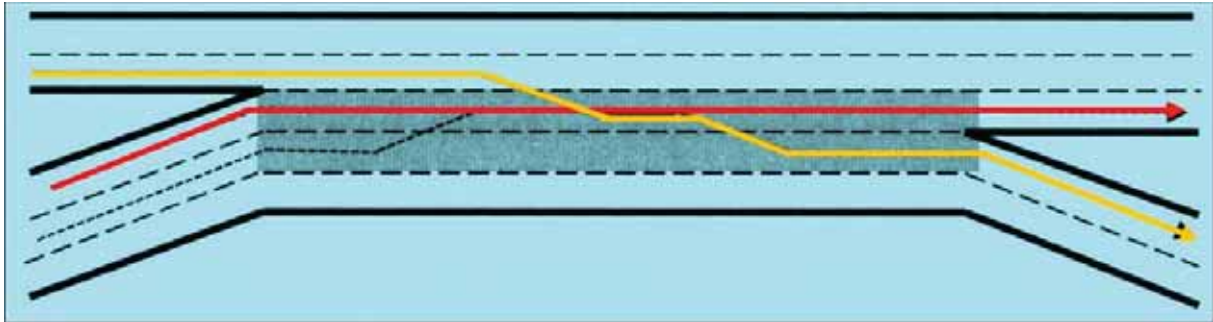
$$Tf = 2950 + 4000 = 6.950 \text{ cp/h} \quad TV = \frac{2950}{6950} = 0,424$$

Fim do Passo 2.

7.2.3. Exemplo 4 – alternativa 1 – configuração inicial das rampas

Passo 3 – determinação das características da configuração

Os Passos 1 e 2 são comuns às duas alternativas. A figura a seguir mostra a configuração da alternativa 1



Na figura, podemos ver que os veículos que usam a rampa de acesso podem entrelaçar sem mudar de faixa (linha vermelha) e, portanto, $M_{fe} = 0$.

Os veículos da via principal que usam a rampa de saída fazem dois entrelaçamentos ($M_{fs} = 2$).

Neste caso $N_{fe} = 2$, que correspondem ao número de faixas necessárias para os entrelaçamentos de quem sai da via principal (os que entram podem completar o acesso sem entrelaçamentos).

Com os dados indicados, podemos usar a equação (D):

$$MF_{min} = (MF_e \times Tf_e) + (MF_s \times Tf_s)$$

Substituindo os valores, temos:

$$MF_{min} = (0 \times 1500) + (2 \times 1450) = 2900 \text{ mf/h}$$

Fim do Passo 3 da Alternativa 1.

7.2.4.Passo 4 – determinação da extensão máxima de entrelaçamento (E_{max})

Para determinar essa extensão, aplicamos a equação (E):

$$E_{MAX} = [5728 \cdot (1 + TV)^{1,6}] - [1566 \cdot N_{fe}]$$

Substituindo-se as variáveis pelos dados obtidos:

$$E_{MAX} = [5728 \cdot (1 + 0.424)^{1,6}] - [1566 \cdot 2] = 6.950 \text{ pés}$$

Como a extensão máxima obtida é significativamente maior do que a existente (6.950 calculados contra os 1.000 pés do enunciado), existe a operação em entrelaçamento e a análise deve continuar, indo para o Passo 5.

Fim do Passo 4 da Alternativa 1.

7.2.5. Passo 5 – determinação da capacidade no trecho de entrelaçamento

A capacidade deve ser controlada por um dos 2 fatores: a densidade no trecho ou pelo fluxo total dos movimentos entrelaçantes.

O primeiro caso é resultado da aplicação das equações (J) e (K) e o segundo pelas equações (L) e (M) ou (N), como veremos a seguir:

Capacidade controlada pela densidade – equações (J) e (K)

$$C_D = C_{bas} - [438,2(1 + TV)^{1,6}] + [0,0765 \cdot EM] + [119,8 \cdot N_{fe}] \quad (J)$$

$$C_D = 2400 - [432,2(1 + 0,424)^{1,6}] + [0,0765 \cdot 1000] + [119,8 \cdot 2]$$

$$C_D = 1.944 \text{ cp/h/fx}$$

$$C_C = 1.944 \cdot 5 \cdot 1 \cdot 1 = 9.721 \text{ cp/h}$$

$$C_c = C_D \cdot N_{fe} \cdot f_p \cdot f_{pop} \quad (K)$$

Capacidade pelo fluxo total dos movimentos entrelaçantes – equações (L) e (N)

[obs.: usou-se a equação (L) ao invés da (M) porque $N_{fe} = 2$]

$$(L) \quad C_{F2} = \frac{2400}{TV} = \frac{2400}{0,424} = 5.654 \text{ cp/h}$$

$$(N) \quad C_C = C_{F2} \cdot f_p \cdot f_{pop} = 5654 \cdot 1 \cdot 1 = 5.654 \text{ cp/h}$$

Nesta alternativa, a capacidade do trecho é limitada em 5.654 cp/h (capacidade da seção de entrelaçamento pela densidade do fluxo), que é inferior à taxa de fluxo total da demanda (6.950 cp/h), o que levaria o trecho a operar em nível de serviço “F”.

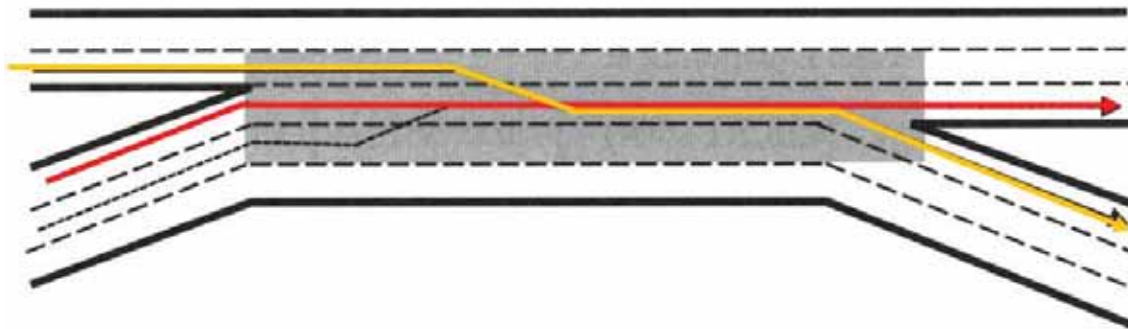
Com isso, esta alternativa não pode prosseguir e devemos partir para a alternativa 2.

Fim da alternativa 1 do Exemplo 4.

7.2.6. Exemplo 4 – alternativa 2 – acréscimo de uma faixa na rampa de saída

Como os Passos 1 e 2 são comuns às duas alternativas, o novo estudo se inicia a partir do Passo 3.

A alternativa 2 acrescenta uma faixa na rampa de saída, conforme mostra a figura seguinte.



Os veículos que usam a rampa de acesso permanecem podendo entrelaçar sem mudar de faixa (linha vermelha) e, portanto, $Mf_e = 0$.

Os veículos da via principal que usam a rampa de saída, nesta nova configuração, fazem apenas um entrelaçamento ($Mf_s = 1$).

A nova configuração eleva Nf_e para 3.

Com os dados indicados, podemos usar a equação (D):

$$MF_{min} = (MF_e \times Tf_e) + (MF_s \times Tf_s)$$

Substituindo os valores, temos:

$$MF_{min} = (0 \times 1500) + (1 \times 1450) = 1450 \text{ mf/h}$$

Fim do Passo 3 da Alternativa 2.

7.2.7. Passo 4 – determinação da extensão máxima de entrelaçamento (E_{max})

Para determinar essa extensão, aplicamos a equação (E):

$$E_{MAX} = [5728 \cdot (1 + TV)^{1,6}] - [1566 \cdot N_{fe}]$$

Substituindo-se as variáveis pelos dados obtidos temos:

$$E_{MAX} = [5728 \cdot (1 + 0.424)^{1,6}] - [1566 \cdot 3] = 5.391 \text{ pés}$$

Da mesma forma que na alternativa 1, a extensão máxima obtida é significativamente maior do que a existente (5.391 calculados contra os 1.000 pés do enunciado), existe a operação em entrelaçamento e a análise deve continuar, indo para o Passo 5.

Fim do Passo 4 – da Alternativa 2.

7.2.8. Passo 5 – determinação da capacidade no trecho de entrelaçamento

Capacidade controlada pela densidade – equações (J) e (K):

$$(J) \quad C_D = C_{bas} - [438,2(1 + TV)^{1,6}] + [0,0765 \cdot EM] + [119,8 \cdot N_{fe}]$$

$$C_D = 2400 - [432,2(1 + 0,424)^{1,6}] + [0,0765 \cdot 1000] + [119,8 \cdot 2] = 2.064 \text{ Cp/h/fx}$$

$$(K) \quad C_C = 2064 \cdot 5 \cdot 1 \cdot 1 = 10.320 \text{ cp/h}$$

Capacidade pelo fluxo total dos movimentos entrelaçantes – equações (M) e (N)

[obs.: usou-se a equação (M) ao invés da (L) porque $N_{fe} = 3$]

$$(M) \quad C_{F2} = \frac{3500}{TV} = \frac{3500}{0,424} = 8.255 \text{ cp/h}$$

$$(N) \quad C_C = C_{F2} \cdot f_p \cdot f_{pop} = 8255 \cdot 1 \cdot 1 = 8.255 \text{ cp/h}$$

Foram obtidos dois valores de capacidade, 13.320 cp/h e 8.255 cp/h. O valor de controle deve ser o menor dos dois.

Como a taxa de fluxo total da demanda é de 6.950 cp/h (do enunciado), portanto bem abaixo do menor dos valores calculados (8.255 pc/h), a capacidade é suficiente e não atingirá o nível de serviço "F". Avançamos para o Passo 6.

Fim do Passo 5.

7.2.9. Passo 6 – determinação dos índices de mudanças de faixa

Neste exemplo são aplicadas as equações de (P) a (S) e mais a (U).

São calculados dois índices: os dos veículos entrelaçantes (P) e os do não entrelaçantes (Q) e (R).

Índice de mudança de faixas de veículos entrelaçantes:

$$MF_{total} = MF_{min} + 0,39[(E_M - 300)^{0,5} \cdot NF^2 (1 + DC)^{0,8}] \quad (P)$$

$$MF_{total} = 1450 + 0,39[(1000 - 300)^{0,5} \cdot 4^2 (1 + 1)^{0,8}] = 1.899 \text{ mf/h}$$

Onde mf = mudanças de faixa.

Índice de mudança de faixas de veículos não entrelaçantes:

$$(Q) \quad I_{mne} = \frac{E_M \cdot DC \cdot Tfmne}{10.000} = \frac{1000 \cdot 1 \cdot 4000}{10.000} = 400 < 1300$$

A próxima equação, que poderia ser a (R), a (S) ou a (T) depende do valor de $Imne$. Como foi menor que 1300, usamos a equação (R).

$$T_{mf1} = (0,206 \cdot Tf_{mne}) + (0,542 \cdot E_M) - (192,6 \cdot NF) \quad (R)$$

$$T_{mf1} = (0,206 \cdot 4000) + (0,542 \cdot 1000) - (192,6 \cdot 5) = 403 \text{ mf/h}$$

A taxa total de mudanças de faixa (T_{mft}) é obtida pela equação (U):

$$T_{mft} = MF_{total} + T_{mf} \quad (U)$$

$$T_{mft} = 1899 + 403 = 2.302 \text{ mf/h}$$

Fim do Passo 6 da Alternativa 2.

7.2.10.Passo 7 – determinação da velocidade média entre os veículos que entrelaçam e os que não entrelaçam

A velocidade média é obtida por meio das equações (V) até (Y)

$$(W) \quad FI = 0,266 \left(\frac{T_{mft}}{E_M} \right)^{0,789} = 0,226 \left(\frac{2302}{1000} \right)^{0,789} = 0,436$$

Uma vez determinado o Fator de Intensidade de entrelaçamento (FI), vamos para as equações (V) (velocidade dos veículos entrelaçantes) e (X) (não entrelaçantes):

$$(V) \quad VM_E = 15 + \left(\frac{VFL - 15}{1 + FI} \right) = 15 + \left(\frac{75 - 15}{1 + 0,436} \right) = 56,8 \text{ mi/h}$$

$$(X) \quad VM_{NE} = VFL - (0,0072 MF_{min}) - \left(0,0048 \frac{Tf}{NF} \right)$$

$$VM_{NE} = 65 - (0,0072 \cdot 1450) - \left(0,0048 \frac{6950}{5} \right) = 57,9 \text{ mi/h}$$

A aplicação da equação (Y) resultará na velocidade média de todos os veículos no trecho:

$$(Y) \quad VM = \frac{Tf_{me} + Tf_{mne}}{\left(\frac{Tf_{me}}{VM_E} \right) + \left(\frac{Tf_{mne}}{VM_{NE}} \right)}$$

$$VM = \frac{4000 + 2950}{\left(\frac{4000}{57,9} \right) + \left(\frac{2950}{56,8} \right)} = 57,4 \text{ mi/h}$$

Fim do Passo 7 da Alternativa 2.

7.2.11. Passo 8 – determinação do nível de serviço

Finalmente, por meio da equação (Z), a velocidade é convertida em densidade (D)

$$(Z) \quad D = \frac{\left(\frac{T_f}{NF}\right)}{VM} = \frac{\left(\frac{6950}{5}\right)}{57,4} = 24,2 \text{ cp/mi/fx}$$

O valor de 24,2 cp/mi/fx deve ser comparado com o Quadro 24 para verificação em que nível de serviço o trecho do exemplo se encontra.

O Quadro 24 convertido para o sistema métrico. No sistema inglês, o nível de serviço correspondente à densidade calculada é o “C”.

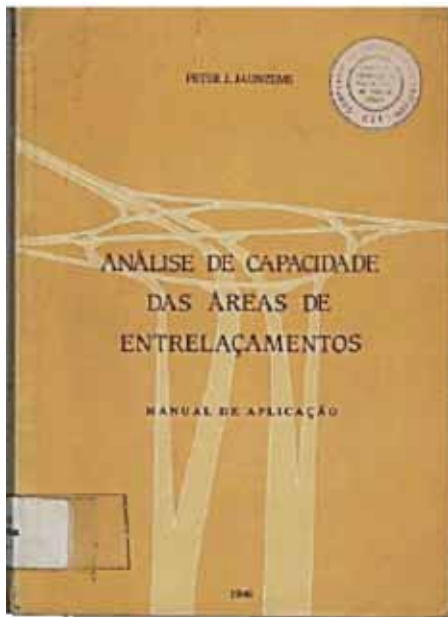
Fim do Passo 8 da Alternativa 2.

7.2.12. Conclusão sobre o Exemplo 4

A comparação entre as duas alternativas mostrou que uma medida relativamente simples, como o acréscimo de uma faixa na rampa de saída (alternativa 2) tornou viável a operação em uma configuração que estaria com seu tráfego saturado pelas condições da alternativa 1.

REFERÊNCIAS

- HCM 2010
- Notas de aula do Prof. Hugo Pietrantonio (Poli/USP)
- *Sinal de Trânsito*, disponível em <www.sinaldetransito.com.br>. Acessado em 26 mai. 2016.
- Peter J. Jaunzems. *Análise de Capacidade das Áreas de Entrelaçamentos – manual de aplicação (1ª edição)*, 1990 (baseado no HCM 1985).



ANEXO

Correspondência entre as variáveis
(por ordem de aparecimento)

Neste texto		No HCM		1ª citação
Sigla	Significado	Sigla	Significado (resumido)	
E_M	Extensão de Manobra	L_S	Short Length	Conceitos Preliminares
E_B	Extensão Base	L_B	Base Length	
MF_e	número mínimo de mudanças de faixa na entrada	LC_{RF}	Minimum number of lane changes (ramp-freeway)	
MF_s	número mínimo de mudanças de faixa na saída	LC_{FR}	Minimum number of lane changes (freeway-ramp)	
N_{je}	número de faixas necessárias para executar os entrelaçamentos, com uma ou nenhuma mudança de faixa	N_{WL}	Number of lanes from which a weaving maneuver may be complete with one lane change or no lane changes	
V	Volume	V	Volume	Conceitos Preliminares
Tf	Taxa de fluxo	v	Flow rate	
FHP	Fator de Hora Pico	PHF	Peak Hour Factor	
cp	carros de passeio	pc	passenger cars	
f_{vp}	fator de ajuste para presença de veículos pesados	f_{hv}	adjustment factor for heavy-vehicle presence	Passo 2
f_{pop}	fator de ajuste para tipo de motorista	f_p	adjustment factor for driver population	Passo 2
MF_{min}	valor mínimo de mudanças de faixa para completar todos os entrelaçamentos	LC_{MIN}	Minimum rate at which weaving vehicles must change lanes to complete all weaving manuevres successfully	Passo 3

Neste texto		No HCM		1ª citação
Sigla	Significado	Sigla	Significado (resumido)	
MF_{DL}	número mínimo de faixas necessárias para completar o entrelaçamento (caso de configuração de dois lados)	LC_{RR}	Minimum number of lane changes that must be made by one ramp-to-ramp vehicle to execute the desired manuevre successfully	Passo 3
E_{MAX}	extensão a partir da qual a turbulência do entrelaçamento não mais impacta na capacidade do trecho onde ocorre o entrelaçamento	L_{MAX}	Length at which weaving turbulence no longer has na impact on the capacity of the weaving segment	Passo 4
TV	Taxa de Volume	VR	Volume Ratio	Passo 4
Tf_{me}	Taxa de fluxo dos movimentos entrelaçantes	v_w	Weaving demand flow rate in the weaving segment	Passo 4
Tf_{mne}	Taxa de fluxo dos movimentos não entrelaçantes	v_{nw}	Nonweaving demand flow rate in the weaving segment	Passo 4
C_D	capacidade de entrelaçamento da seção pela densidade	C_{IWL}	Capacity of the weaving segment	Passo 5
C_{bas}	capacidade de entrelaçamento de uma seção base	C_{IFL}	Capacity of a basic freeway segment	Passo 5
VFL	Velocidade de Fluxo Livre	FFS	Free-Flow Speed	Passo 5
C_C	Capacidade da seção de entrelaçamento pelas condições correntes	C_W	Capacity of the weaving segment under prevailing conditions	Passo 5
C_F	Capacidade da seção pelo fluxo total dos movimentos entrelaçantes	C_{IW}	Capacity of all lanes in the weaving segment under ideal conditions	Passo 5

Neste texto		No HCM		1ª citação
Sigla	Significado (resumido)	Sigla	Significado	
T_{mft}	Taxa total de mudanças de faixa	LC_{ALL}	Total lane-changing rate	Passo 6
VM_F	Velocidade média dos veículos entrelaçantes	S_W	Average speed of weaving vehicles	Passo 7
FI	Fator de intensidade de entrelaçamento	W	Weaving intensity factor	Passo 7
VM_{NE}	Velocidade média dos veículos não entrelaçantes	S_{NW}	Average speed of nonweaving vehicles	Passo 7
VM	Velocidade média dos veículos no trecho de entrelaçamento	S	Average speed of all vehicles	Passo 7
D	Densidade	D	Density	Passo 8
P_{cu}	Proporção de caminhões ou ônibus na corrente de tráfego	PT	Proportion of trucks or buses in traffic stream	Exemplo 1
PE_{cu}	Passageiro-veículo equivalente (PVE) de um caminhão ou ônibus na corrente de tráfego	E_l	Passenger-car equivalent (PCE) of one truck or bus in traffic stream	Exemplo 1
P_{vp}	Proporção de veículos de passeio na corrente de tráfego	P_{RV}	Proportion of recreational vehicles (RV) in traffic stream	Exemplo 1
PE_{vp}	Passageiro-veículo equivalente de um veículo de passeio na corrente de tráfego	E_{RV}	PCE of one RV in traffic stream	Exemplo 1