

CÁLCULO DE ENTREVERDES NO JAPÃO E NA ALEMANHA

Eng^o Sun Hsien Ming

INTRODUÇÃO

O presente trabalho está baseado em informações contidas no artigo “*A Probabilistic Approach to Evaluate Safety during Intergreen Intervals at Signalized Intersections*” de Keshuang Tang¹ e Hideki Nakamura² (*TRB 2009 Annual Meeting CD-ROM*) e tem como objetivos apresentar os métodos utilizados no Japão e na Alemanha para o dimensionamento de entreverdes em interseções semaforizadas e fazer uma discussão crítica desses modelos em relação aos métodos recomendados pelo ITE³ e AASHTO⁴. O trabalho também se vale de dados extraídos do artigo “*Implementation of Real-time Yellow Interval Adjustment Based on Deceleration Rates and Pavement Friction Factors at Signalized Intersections*” de Young-Jun Moon, Ph. Dr.⁵, Kwansoo Lim⁶ e Yukyung Park⁷.

O método de cálculo de entreverdes no Japão difere do método adotado na Alemanha antes da publicação da edição revisada de *Japanese Manuals for Traffic Signal Control – JMTSC* em julho de 2006.

CÁLCULO DO AMARELO

Nos dois países, o intervalo de amarelo é determinado pela expressão:

$$I_Y = \delta + \frac{v}{2b} \quad (1)$$

¹ JSPS Postdoctoral Research Fellow – Institute of Industrial Science, University of Tokyo

² Professor, Department of Civil Engineering – Nagoya University

³ ITE *Technical Committee* 4A-16 (1985): “*Determining Vehicle Change Intervals*”, *Institute of Transportation Engineers (ITE) Journal*, pp. 61-64.

⁴ *American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO)* (1994): “*A Policy on Geometric Design of Highway and Streets*”, Washington, DC.

⁵ *The Korea Transport Institute*.

⁶ *The Korea Transport Institute*.

⁷ *Hanyang University*.

onde: I_y = intervalo de amarelo em s

δ = tempo de percepção e reação em s

v = velocidade do veículo no início do amarelo em m/s

b = taxa de desaceleração média em m/s^2

Os valores assumidos para os parâmetros δ e b são:

$$\delta = 1 \text{ s}$$

$$b = 3 \text{ m/s}^2$$

CÁLCULO DO VERMELHO DE SEGURANÇA

No Japão, antes da publicação da edição revisada de JMTSC, para determinar o intervalo de vermelho de segurança, a linha de retenção foi tomada como referência para a “limpeza” dos veículos.

Na Alemanha, o intervalo de vermelho de segurança é calculado em função do tempo necessário para o veículo sair da área de conflito de acordo com “*German Guidelines for Traffic Signals*” – GGTS.

A Figura 1⁸ e a expressão 2 mostram o método de cálculo do intervalo de vermelho de segurança no Japão.

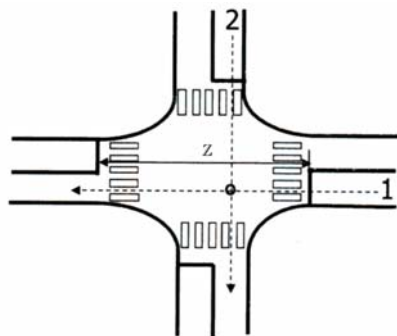


Figura 1 – Método de cálculo japonês

⁸ No Japão, o tráfego é pelo lado esquerdo da via (mão inglesa).

$$I_{RJ} = \frac{Z}{v_C} \quad (2)$$

onde

I_{RJ} = intervalo de vermelho de segurança pelo método japonês em s, referente ao final do estágio da aproximação 1

Z = distância entre as linhas de retenção opostas em m

v_C = velocidade de limpeza em m/s

A Figura 2 e a expressão 3 mostram o método de cálculo do intervalo de vermelho de segurança na Alemanha.

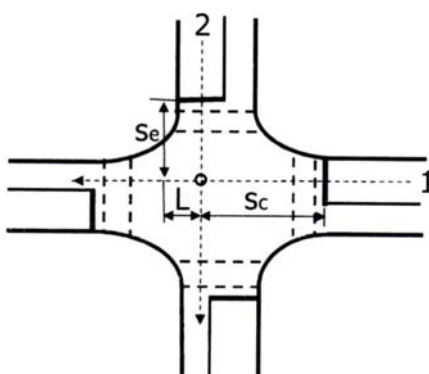


Figura 2 – Método de cálculo alemão

$$I_{RG} = \frac{S_C + L}{v_C} - \frac{S_e}{v_e} \quad (3)$$

onde

I_{RG} = intervalo de vermelho de segurança pelo método alemão em s, referente ao final do estágio da aproximação 1

v_C = velocidade de limpeza em m/s

S_C = distância de limpeza em m

L = comprimento do veículo em m

S_e = distância de entrada em m

v_e = velocidade de entrada em m/s

A diferença nos dois métodos de cálculo produz intervalos de vermelho de segurança mais longos no Japão do que na Alemanha sob condições idênticas.

MÉTODO RECOMENDADO POR ITE E AASHTO

O ITE recomenda a expressão 4 para a distância de parada:

$$X_s = \delta \cdot v + \frac{v^2}{2(b + iG)} \quad (4)$$

onde

X_s = distância de parada em m

δ = tempo de percepção e reação em s

v = velocidade do veículo no início do amarelo em m/s

b = taxa de desaceleração média em m/s^2

G = aceleração da gravidade em m/s^2

i = greide da aproximação

Da expressão 4 pode-se derivar as expressões para o intervalo de amarelo e de vermelho de segurança:

$$I_Y = \delta + \frac{v}{2 \cdot (b + i \cdot G)} \quad (5) \quad I_R = \frac{W + L}{v} \quad (6)$$

onde:

I_Y = período de amarelo em s

I_R = período de vermelho de segurança em s

δ = tempo de percepção e reação em s

v = velocidade de aproximação em m/s

b = desaceleração em m/s²

G = aceleração da gravidade em m/s²

i = greide da aproximação

W = largura da interseção em m

L = comprimento do veículo em m

Se houver faixa de pedestre na esquina posterior (ver Figura 3), deve-se garantir que os veículos saiam da área da travessia de pedestres antes de os pedestres receberem o direito de passagem.

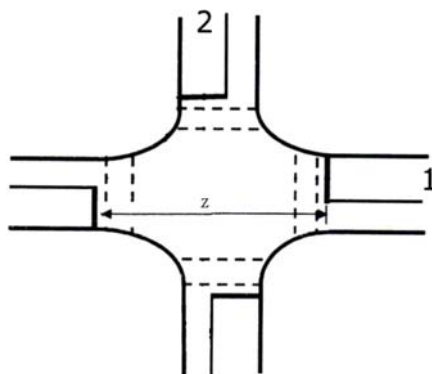


Figura 3 – Faixa de pedestres na esquina posterior

Neste caso, recomenda-se que a expressão 6 seja reescrita como:

$$I_R = \frac{Z + L}{v} \quad (7)$$

onde Z é a distância entre a linha de retenção e a extremidade da faixa de pedestres oposta.

A AASHTO recomenda a expressão 8 para a distância de parada.

$$X_S = \delta \cdot v + \frac{v^2}{2G(\mu + i)} \quad (8)$$

onde μ é o coeficiente de atrito entre o pneu e o pavimento.

Da expressão 8 pode-se derivar a expressão para determinar o período de amarelo:

$$I_Y = \delta + \frac{v}{2G(\mu + i)} \quad (9)$$

DISCUSSÃO CRÍTICA DOS MÉTODOS APRESENTADOS

Comparação entre as expressões 1 e 5 (período de amarelo)

Uma primeira interpretação que pode ser obtida analisando-se as expressões 1 e 5 é que a primeira expressão despreza o efeito do greide da aproximação. No entanto, numa interpretação mais apurada, pode-se dizer que a expressão 1 considera o efeito combinado entre o esforço de frenagem exercido pelo condutor no pedal com o efeito da ação da gravidade devida ao greide da aproximação, sendo b o valor da desaceleração efetiva final. Assim, se, na expressão 1, $b = 3 \text{ m/s}^2$ e a aproximação for em aclave, o condutor fará um esforço de frenagem em cima do pedal menor do que se a aproximação fosse em declive, de forma que a desaceleração final obtida tenha o valor $b = 3 \text{ m/s}^2$ em qualquer uma das situações (aclave ou declive), isto é, o condutor decide o esforço de frenagem em função do greide da aproximação (menor esforço em aclave e maior esforço em declive).

Na expressão 5, b representa o esforço de frenagem do condutor e não a taxa de desaceleração efetiva final. O esforço de frenagem é constante (por exemplo, $b = 3 \text{ m/s}^2$), seja em aclave ou declive, mas a taxa de desaceleração efetiva será variável em função do greide da aproximação (mais desaceleração em aclave e menos desaceleração em declive).

Neste ponto, uma questão que poderia ser colocada é qual das expressões, 1 ou 5, representa melhor o comportamento do condutor com relação ao esforço de frenagem diante da inclinação da via. Entretanto, parece-nos que essa discussão é secundária e fora de propósito pois as expressões 1 e 5 são meramente formas de cálculo e supõe-se que não tem a pretensão de representar o comportamento do condutor. A nosso ver, no processo de decisão do condutor sobre qual a intensidade do esforço a ser exercido na frenagem, outros fatores, tais como o perfil psicológico do condutor (pessoas cautelosas ou agressivas, pacientes ou impacientes, etc.), a velocidade e, principalmente, a distância em que o veículo se encontra da

linha de retenção no momento em que o sinal muda de verde para amarelo são muito mais relevantes e determinantes do que a inclinação da via.

A expressão 5 apresenta a vantagem de permitir uma comparação direta do valor de b adotado com os limites de aderência da interação pneu-pavimento, conforme a expressão 10:

$$v = \sqrt{2Gd(\mu + i)} \quad (10)$$

onde μ é o coeficiente de atrito entre o pneu e o pavimento, i é o greide da aproximação, G é a aceleração da gravidade em m/s^2 , v é a velocidade antes da frenagem em m/s e d é a distância percorrida desde o início da frenagem até a parada do veículo em m :

$$d = \frac{v^2}{2.(b + i.G)} \quad (11)$$

Combinando as expressões 10 e 11, tem-se:

$$b = G\mu \quad (12)$$

No caso da expressão 1, essa comparação fica comprometida devido à influência do greide da aproximação no valor de b (a influência do greide da via está embutida no valor de b):

$$b = G(\mu + i) \quad (13)$$

Note que se escrevermos as expressões 1 e 5 em função do coeficiente de atrito entre o pneu e o pavimento (utilizando-se das expressões 12 e 13, respectivamente), ambas resultam em:

$$I_Y = \delta + \frac{v}{2G.(\mu + i)} \quad (14)$$

A expressão 14 é igual à recomendada pela AASHTO (expressão 9). A Tabela 1⁹ apresenta os valores de μ e b para diversas velocidades em pavimento molhado e seco.

⁹ Tabela extraída do artigo “Implementation of Real-time Yellow Interval Adjustment Based on Deceleration Rates and Pavement Friction Factors at Signalized Intersections” de Young-Jun Moon, Ph. Dr., Kwansoo Lim e Yukyung Park.

Tabela 1 – Valores de coeficiente de atrito e taxa de desaceleração

Velocidade de aproximação (km/h)	Pavimento molhado		Pavimento seco	
	μ	$b = G\mu$ (m/s ²)	μ	$b = G\mu$ (m/s ²)
50	0,35	3,44	0,65	6,38
60	0,33	3,24	0,64	6,28
70	0,31	3,04	0,63	6,19
80	0,30	2,95	0,62	6,09
90	0,30	2,95	0,62	6,09

Valores muito altos de b não são confortáveis, sendo usualmente adotado como valor típico $b = 3 \text{ m/s}^2$.

Comparação entre as expressões 2, 3 e 7 (período de vermelho de segurança)

A expressão 2 não leva em conta o comprimento do veículo, o que pode ser crítico no caso de interseções com significativa porcentagem de veículos de grande porte na composição de tráfego.

A expressão 3 apresenta a dificuldade da determinação da velocidade de entrada v_e . A dificuldade deriva do fato de que há duas possibilidades que devem ser consideradas para a determinação de v_e : (i) o veículo da aproximação 2 (Figura 2) estava parado na linha de retenção e inicia o seu movimento a partir do repouso; (ii) o veículo da aproximação 2 (Figura 2) chega sem fila (chegada livre) no momento em que o sinal muda de vermelho para verde (o veículo não chega a parar ou a sofrer qualquer atraso). A favor da segurança, pode-se considerar apenas a segunda hipótese, de forma a reduzir ao máximo a parcela $\frac{S_e}{v_e}$.

Contudo, o fato de a distância de limpeza S_C não englobar toda a área de conflito (Figura 2)

parece não garantir a segurança necessária. Além disso, se houver faixa de pedestres na esquina posterior e se quiser garantir que os veículos deixem a área da travessia antes do início do direito de passagem dos pedestres, o desconto da parcela $\frac{S_e}{v_e}$ não faz mais sentido (Figura 4).

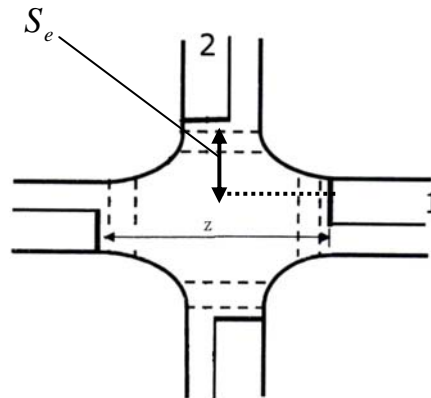


Figura 4 – Faixa de pedestres na esquina posterior

Na expressão 7, a velocidade v é a mesma da expressão 5 para o período de amarelo. Isso conduz a um antagonismo entre o período de amarelo e o período de vermelho de segurança: quanto maior é o valor de v maior é o período de amarelo requerido, mas menor é o período de vermelho de segurança. Isso pode levar a um dimensionamento inadequado do vermelho de segurança no caso de entreverdes fixo (constante ao longo do dia). Se não vejamos. A favor de segurança, por causa do período de amarelo, é usual adotar valores altos de velocidade (como a velocidade 85 percentil ou a velocidade máxima regulamentada). Mas em situações de trânsito saturado, a velocidade efetiva é muito menor do que a adotada fazendo com que o vermelho de segurança calculado seja menor do que o efetivamente requerido.

As expressões 2 e 3 adotam a velocidade como sendo a velocidade de limpeza v_C , distinta da velocidade v da expressão 1, utilizada para a determinação do período de amarelo.

Tendo em vista essas considerações, a expressão 7 poderia ser reformulada para:

$$I_R = \frac{Z + L}{v_C} \quad (15)$$

onde v_C é a velocidade de limpeza, distinta de v (velocidade de aproximação) da expressão

5. Como exemplo, pode-se fazer v igual à velocidade máxima regulamentada e v_C igual à velocidade 15-percentil.