

DIMENSIONAMENTO DO ENTREVERDES UMA ABORDAGEM PROBABILÍSTICA¹

Sun Hsien Ming

INTRODUÇÃO

O presente trabalho é baseado na metodologia apresentada por SAID M. EASA² no seu artigo “*Reliability-Based Design of Intergreen Interval at Traffic Signals*”³.

O método corrente para calcular o entreverdes é determinístico. Contudo, as variáveis que entram no cálculo são variáveis aleatórias. EASA apresenta um método que considera a natureza aleatória dos fenômenos envolvidos.

ENTREVERDES

O período de entreverdes, por ser um período de transição de direitos de passagem, é, pela sua natureza, bastante crítico em termos de possibilidades de ocorrências de acidentes de tráfego. No final do estágio, há motoristas que querem passar para evitar aguardar o próximo ciclo. Ora, o final de um estágio corresponde, necessariamente, ao início de outro estágio. No início do estágio, há aqueles que podem querer antecipar-se ao verde e que podem expor-se aos transgressores do estágio que termina. Daí, o período de entreverdes ser caracterizado como um período crítico em termos de segurança em interseções semaforizadas.

O Anexo II do CTB (Código de Trânsito Brasileiro) dá a seguinte definição para as cores do semáforo para os veículos:

¹ Este trabalho contou com a preciosa e indispensável análise do Eng. Luis M. Vilanova, cujos comentários em muito contribuíram para o amadurecimento e correção das idéias apresentadas.

² Prof. Dept. of Civil Engrg., Lakehead Univ., Thunder Bay, Ontario, Canada.

³ *Journal of Transportation Engineering*, Vol. 119, N° 2, March/April, 1993.

“Vermelha: indica obrigatoriedade de parar.”

“Amarela: indica “atenção”, devendo o condutor parar o veículo, salvo se isto resultar em situação de perigo.”

“Verde: indica permissão de prosseguir na marcha, podendo o condutor realizar as operações indicadas pelo sinal luminoso, respeitadas as normas gerais de circulação e conduta.”

Ao deparar-se com a mudança do sinal da cor verde para a cor amarela, o condutor tanto pode parar o veículo (se ele julgar que pode parar de uma forma segura), como pode prosseguir e realizar a travessia da interseção (se ele julgar que a ação de parar pode criar uma situação de perigo). A “situação de perigo” significa aqui frenagens bruscas, que podem propiciar a ocorrência de colisões traseiras.

Por outro lado, para o condutor que decidiu prosseguir (principalmente no final do amarelo), deve-se garantir que ele saia da área de conflito da interseção antes que o estágio concorrente ganhe o direito de passagem por meio da luz verde do semáforo. Do caso contrário, pode ocorrer uma colisão angular. Essa garantia pode ser dada por um período de “vermelho de limpeza” (também conhecido como vermelho de segurança ou vermelho geral), fazendo com que o estágio concorrente permaneça em vermelho enquanto os veículos que passaram no final do amarelo não tenham saído da interseção.

Assim, o período de entreverdes pode ser composto por dois períodos:

$$I = I_Y + I_R \quad (1)$$

onde

I = entreverdes

I_Y = período de amarelo

I_R = período de vermelho de segurança (também conhecido como vermelho de limpeza ou vermelho total)

Existem duas formas para o dimensionamento do entreverdes:

- a) O período de amarelo e o período de vermelho de segurança são calculados de forma separada, sendo o entreverdes a soma dos dois períodos;
- b) O período de entreverdes é calculado sem distinguir o período de amarelo e o período de vermelho de segurança.

EASA adota o método que não considera explicitamente o período de amarelo e o período de vermelho de segurança, mas apenas a duração total do entreverdes.

ZONA DE DILEMA

Um motorista, ao se aproximar de uma interseção e deparar-se com o sinal amarelo, pode tanto decidir parar quanto prosseguir. A distância de parada é a distância necessária para os veículos pararem na linha de retenção de forma segura (ver Figura 1-a). A distância de limpeza é a distância na qual o motorista pode decidir prosseguir e passar antes do fim do período de amarelo (ver Figura 1-b).

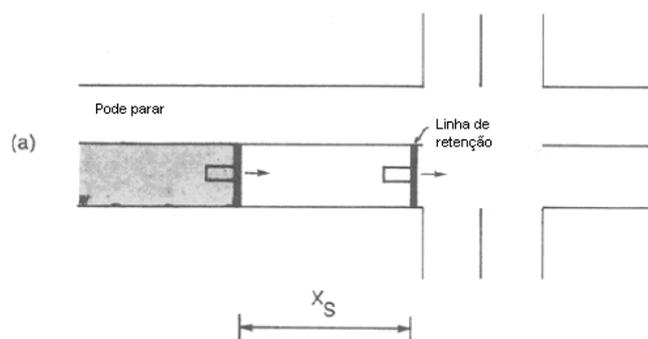


Figura 1- a – Distância de parada (X_s)

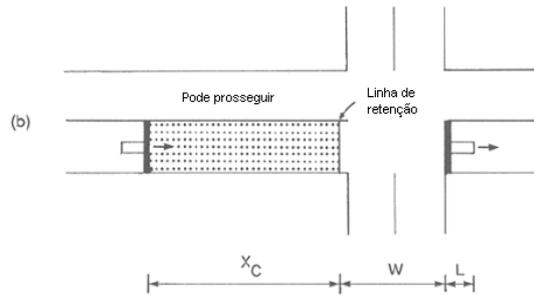


Figura 1- b – Distância de limpeza (X_C)

Então, usando-se expressões fornecidas por cinemática elementar, tem-se:

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

onde

X_s = distância de parada em m

δ = tempo de percepção e reação em s

v = velocidade de aproximação em m/s

b = desaceleração em m/s^2

G = aceleração da gravidade em m/s^2

i = greide da aproximação

Durante o período de entreverdes, o veículo percorre uma distância igual à distância de limpeza X_C , mais a largura da interseção W e o comprimento do veículo L . Assim:

$$X_C = I \cdot v - (W + L) \quad (3-a)$$

onde

X_C = distância de limpeza em m

I = período de entreverdes (amarelo + vermelho de segurança) em s

W = largura da interseção em m

L = comprimento do veículo em m

Entretanto, deve-se considerar também a largura da faixa de pedestres (se houver) na esquina posterior, bem como a distância desde a linha de retenção até a interseção (pode também haver faixa de pedestres na esquina anterior). Assim, a expressão (3-a) deveria ser reescrita como sendo:

$$X_C = I.v - (Z + L) \quad (3-b)$$

onde $Z = W + l_1 + l_2$, sendo l_1 a distância da linha de retenção até a interseção e l_2 a largura da faixa de pedestres na esquina posterior (Figura 2).

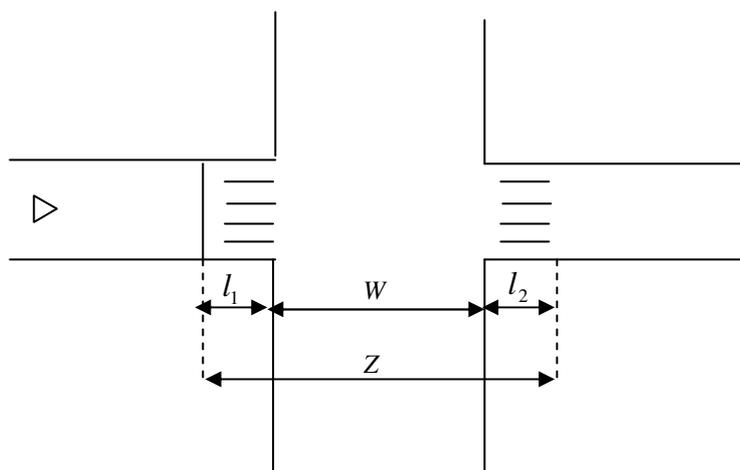


Figura 2 – Distância Z

Se $X_s > X_c$ haverá uma zona de dilema, na qual, o motorista, quando o sinal muda para amarelo, não conseguirá parar e nem cruzar a interseção com segurança (Figura 3-a).

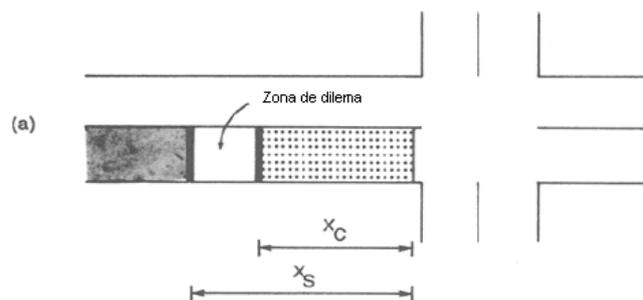


Figura 3- a – Zona de dilema ($X_S > X_C$)

Se $X_S < X_C$, haverá uma zona de opção, na qual o motorista poderá optar tanto em parar como em prosseguir (Figura 3-b).

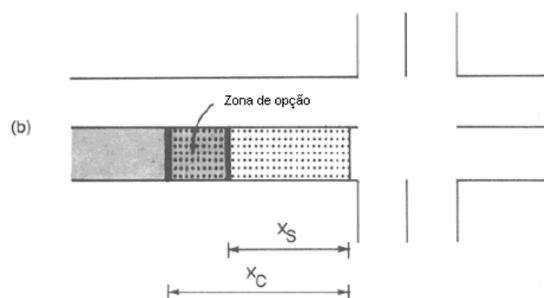


Figura 3- b – Zona de opção ($X_S < X_C$)

Para $X_S = X_C$, não existe a zona de dilema e nem a zona de opção.

MÉTODO DETERMINÍSTICO

A prática usual para dimensionar o entreverdes é baseada no desejo de eliminar a zona de dilema. Igualando a distância de parada com a distância de limpeza ($X_S = X_C$), o entreverdes pode ser obtido como:

$$I = \delta + \frac{v}{2.(b+i.G)} + \frac{Z+L}{v} \quad (4-a)$$

As duas primeiras parcelas corresponderiam ao período de amarelo e a última parcela corresponderia ao período de vermelho de segurança, isto é:

$$I_Y = \delta + \frac{v}{2.(b+i.G)} \quad (4-b) \quad \text{e} \quad I_R = \frac{Z+L}{v} \quad (4-c)$$

O método determinístico usa valores típicos para parâmetros como velocidade, tempo de percepção e reação, desaceleração e comprimento do veículo. Esses parâmetros são considerados como constantes (e não como variáveis aleatórias).

Com exceção da velocidade, são normalmente usados os mesmos valores para os diversos parâmetros envolvidos (por exemplo, o mesmo tempo de percepção e reação, a mesma desaceleração e o mesmo comprimento médio do veículo), independentemente do local e do horário. Eventualmente, são usados valores típicos diferenciados para a desaceleração e o comprimento do veículo em alguns locais onde a composição de tráfego é muito diferenciada.

No método determinístico, é relevante a questão da escolha do valor da velocidade a ser adotado. Os critérios mais usuais são 85-percentil (velocidade abaixo da qual estão 85% dos veículos) e a velocidade máxima regulamentada.

Com relação ao período de amarelo, o primeiro critério (velocidade 85-percentil) apresenta a vantagem de refletir as reais condições do local e do horário. Entretanto, pode ser recomendável adotar 95-percentil, uma vez que, deixar, como parâmetro de projeto, 15% dos veículos não atendidos parece não ser razoável. O segundo critério (velocidade máxima regulamentada) depende de uma regulamentação correta da via e não permite configurar períodos de amarelo variáveis, podendo o mesmo ficar superdimensionado em determinadas situações (por exemplo, em situações de trânsito saturado) quando a

velocidade máxima efetiva for muito inferior à velocidade máxima regulamentada⁴. Por outro lado, se a escolha da velocidade 85-percentil ou 95-percentil parecer ser um tanto arbitrária, a escolha da velocidade máxima regulamentada é suportada pela força legal da regulamentação.

Com relação ao período de vermelho de segurança, os dois critérios (85-percentil e velocidade máxima regulamentada) apresentam um dimensionamento inadequado. Pelo primeiro critério (velocidade 85-percentil), 85% dos veículos terão um vermelho de segurança insuficiente. Pelo segundo critério (velocidade máxima regulamentada), 100% dos veículos que estiverem abaixo da velocidade máxima regulamentada terão um vermelho de segurança insuficiente.

Aliás, há um antagonismo entre o período de amarelo e o período de vermelho de segurança com relação à velocidade. Pode-se observar pelas expressões (4-b) e (4-c) que, quanto maior é a velocidade, maior é o amarelo requerido e quanto menor a velocidade maior é o período de vermelho de segurança requerido.

Pode ter sido essa a razão de EASA ter apresentado no seu artigo “*Reliability-Based Design of Intergreen Interval at Traffic Signals*” dois exemplos hipotéticos, o primeiro para uma interseção de baixa velocidade e o segundo para uma interseção de alta velocidade. Nestes exemplos, EASA usou as velocidades 15-percentil para a interseção de baixa velocidade e 85-percentil para a interseção de alta velocidade no cálculo do entreverdes pelo método determinístico. Assim, é possível que a mesma interseção possa ser considerada de baixa velocidade em situações de saturação e de alta velocidade em situações de trânsito livre.

Em face da constatação desse antagonismo, recomenda-se adotar velocidades distintas para a determinação do período de amarelo e do vermelho de segurança no método determinístico. Entretanto, se para o período de amarelo o critério mais adequado é a escolha da velocidade máxima regulamentada, fica a questão de qual a velocidade a ser

⁴ Quando o controlador de tráfego não tiver a capacidade de discernir situações de saturação, não se recomenda configurar períodos de amarelo variáveis.

adotada para o período de vermelho de segurança no método determinístico (no caso de entreverdes não variáveis)⁵.

MÉTODO PROBABILÍSTICO

O método determinístico é baseado na “eliminação” da zona de dilema. Entretanto, como cada veículo tem a sua própria velocidade, comprimento e taxa de desaceleração, assim como cada motorista tem o seu próprio tempo de percepção e reação, a zona de dilema não será eliminada para todos os veículos. A rigor, a zona de dilema é eliminada apenas para os veículos que apresentarem os mesmos valores dos parâmetros adotados no cálculo da expressão (4-a). A zona de dilema seria totalmente eliminada apenas no caso de todos os veículos trafegarem exatamente na mesma velocidade, possuírem todos o mesmo comprimento e a mesma taxa de desaceleração, bem como todos os motoristas tiverem o mesmo tempo de percepção e reação. Uma questão interessante que se pode colocar é: qual é a porcentagem de veículos que estarão em zona de dilema (e, portanto, na zona de insegurança) num entreverdes dimensionado pelo método determinístico?

O método probabilístico permite dimensionar o entreverdes de forma individualizada para cada local e para cada situação de trânsito **em função de uma probabilidade de falha especificada em projeto**, desde que se saiba os valores dos diversos parâmetros estatísticos envolvidos, como médias, variâncias e coeficientes de correlação.

Só há sentido em usar o método probabilístico no caso de entreverdes variáveis.

O método probabilístico é a contribuição específica de EASA, que propõe um método baseado em aproximações para estimar os dois primeiros momentos (a média e a variância) de uma variável aleatória que é uma função geral (não linear) de outras variáveis aleatórias.

Seja Y uma função não linear de várias variáveis aleatórias:

⁵ Para o caso de entreverdes variáveis em função da saturação da via, pode-se adotar, por exemplo, para situações de saturação, a velocidade 85-percentil (ou 95-percentil) para o período de amarelo e velocidade 15-percentil para o período de vermelho de segurança, enquanto que, para situações de trânsito livre, a velocidade máxima regulamentada para o período de amarelo e 15-percentil para o vermelho de segurança.

$$Y = f[X_1, X_2, \dots, X_n] \quad (5)$$

Então Y pode ser expandida numa série de Taylor em torno dos valores médios das variáveis X_n (μ_1 até μ_n). Considerando os termos lineares de primeira ordem:

$$Y = f[\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n] + \sum_{i=1}^n (X_i - \mu_{xi}) \left(\frac{\partial f}{\partial X_i} \right) + \varepsilon \quad (6)$$

onde as derivadas parciais são resolvidas em μ_1, \dots, μ_n e ε são os termos de ordem superior.

Este é o método de aproximação de primeira ordem (*First Order Method* – FOM). O valor esperado de Y , $E[Y]$, e a variância de Y , $Var[Y]$, são:

$$E[Y] = f[\mu_1, \dots, \mu_n] \quad (7)$$

$$Var[Y] = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial X_i} \right)^2 \sigma_{xi}^2 + \sum_{i \neq j}^n \sum_{i \neq j}^n \left(\frac{\partial f}{\partial X_i} \right) \left(\frac{\partial f}{\partial X_j} \right) Cov[X_i, X_j] \quad (8)$$

sendo:

$Cov[X_i, X_j]$ = covariância de X_i com X_j , onde $Cov[X_i, X_j] = \rho_{xi,xj} \cdot \sigma_{xi} \cdot \sigma_{xj}$ e $\sigma_{xi}^2 = Var[X_i]$
 $\rho_{xi,xj}$ = coeficiente de correlação entre X_i e X_j .

Da mesma forma, uma aproximação da covariância entre duas variáveis Y e Z , que são funções de variáveis aleatórias, pode ser obtida. Se

$$Y = f[X_1, X_2, \dots, X_n] \text{ e } Z = g[X_1, X_2, \dots, X_n]$$

então:

$$Cov[Y, Z] = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial X_i} \right) \left(\frac{\partial g}{\partial X_i} \right) Var[X_i] + \sum_{i \neq j} \sum_{i \neq j} \left(\frac{\partial f}{\partial X_i} \right) \left(\frac{\partial g}{\partial X_j} \right) Cov[X_i, X_j] \quad (9)$$

Além disso, a expressão anterior para a média de Y – expressão (7) – pode ser melhorada incluindo o termo de segunda ordem da expansão de Taylor, gerando o método de aproximação de primeira ordem e segundo momento (*First Order, Second Moment* – FOSM):

$$E[Y] = f[\mu_1, \dots, \mu_n] + \frac{1}{2} \cdot \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{\partial^2 f}{\partial X_i \partial X_j} Cov[X_i, X_j] \quad (10)$$

Nestas expressões, as derivadas são avaliadas no ponto que corresponde às médias μ_1, \dots, μ_n). Em trabalhos posteriores, EASA empregou métodos mais sofisticados que buscam o melhor ponto para previsão da falha da condição de projeto (o chamado Ponto de Falha Mais Provável – PFMP), que configura os métodos avançados (como o *Advanced First Order, Second Moment* – AFOSM), comumente utilizados para determinar fatores de segurança para projetos em Engenharia de Estruturas (como a distância entre o PFMP e a média).

MÉTODO DE EASA

EASA parte do pressuposto de que é impossível eliminar a zona de dilema para todos os veículos. Então, o entreverdes é dimensionado em função de probabilidade de falha P_f especificada pelo projeto (por exemplo, pode-se admitir uma probabilidade de falha de 1% ou de 5%).

A margem de segurança F pode ser definida por:

$$F = X_C - X_S \quad (11)$$

tendo-se então:

$$E[F] = E[X_C] - E[X_S] \quad (12)$$

$$\text{Var}[F] = \text{Var}[X_C] + \text{Var}[X_S] - 2\text{Cov}[X_C, X_S] \quad (13)$$

Como X_C e X_S são variáveis aleatórias, F também é uma variável aleatória, cuja distribuição de probabilidade $f[F]$ está ilustrada na Figura 4.

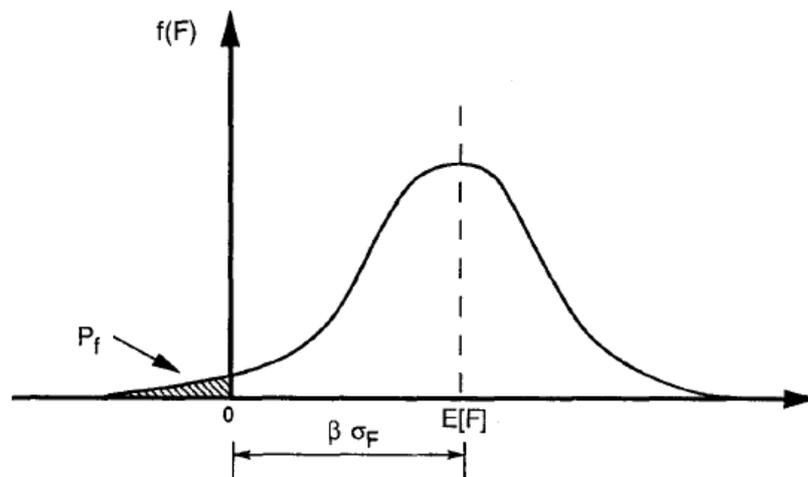


Figura 4 – Função distribuição de probabilidade de F

A condição de segurança é representada por $F > 0$. A condição de falha (zona de dilema) é definida por $F < 0$ e a condição limite por $F = 0$.

O número de desvios padrão σ_F entre o valor médio $E[F]$ e o valor limite $F = 0$ é o índice de confiabilidade β :

$$\beta = \frac{E[F]}{\sigma_F} \quad (14)$$

onde $\sigma_F = \sqrt{\text{Var}[F]}$.

A área onde $F < 0$ é P_f e representa a probabilidade de falha: $P_f = P[F < 0]$. Um alto valor de β indica que a probabilidade de falha é pequena.

Se a distribuição de probabilidade de F é assumida como uma distribuição normal, uma estimativa de P_f é:

$$P_f = \Phi[-\beta] = 1 - \Phi[\beta] \quad (15)$$

A área P_f pode ser obtida de tabelas de distribuição normal padronizada. Por exemplo, para probabilidades de falha de 1% e 5%, o índice de confiabilidade β é, respectivamente, 2,33 e 1,64.

O período de entreverdes pode ser determinado usando a expressão (14). Como o numerador e o denominador dessa expressão são funções de I , pode-se elevar ao quadrado ambos os lados da expressão. Após alguma manipulação algébrica, pode-se obter a equação quadrática em I , dando a seguinte solução:

$$I = \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \quad (16)$$

onde:

$$A = \frac{\mu_v^2}{\beta^2} - \sigma_v^2 \quad (17)$$

$$B = 2Q - \frac{2\mu_v}{\beta^2} [Z + \mu_L + E[X_s]] \quad (18)$$

$$C = \frac{1}{\beta^2} [Z + \mu_L + E[X_s]]^2 - Var[X_s] - \sigma_L^2 \quad (19)$$

Fazendo-se:

$$Cov[X_s, X_c] = I.Q \quad (20)$$

e usando a expressão (9), pode-se determinar Q :

$$Q = \left\{ \left(\mu_\delta + \frac{\mu_v}{\mu_b + iG} \right) \sigma_v^2 + \mu_v \cdot Cov[\delta, v] - \left(\frac{\mu_v^2}{2(\mu_b + iG)^2} \right) \cdot Cov[b, v] \right\} \quad (21)$$

A expressão (16) fornece o período de entreverdes requerido para uma probabilidade de falha especificada pelo projeto.

SIMPLIFICAÇÃO DO MÉTODO

O método de EASA é bastante geral, mas a sua aplicação na prática é difícil devido à dificuldade de obtenção dos dados necessários, como a média e a variância dos parâmetros envolvidos, assim como a correlação entre essas variáveis. Dessa forma, é proposto um método simplificado.

Na prática, as variáveis com aleatoriedade relevante seriam pelo menos a velocidade, o tempo de percepção e reação e a frenagem^{6,7}.

⁶ Segundo EASA, o entreverdes é mais sensível a variações da frenagem e do tempo de percepção e reação do que a variações de velocidade, sendo que o efeito do comprimento do veículo é desprezível. Estudos são necessários para obter dados mais precisos nas distribuições da frenagem e do tempo de percepção e reação.

⁷ Com relação à frenagem, embora a mesma varie de condutor para condutor ou de veículo para veículo, para simplificar o problema, considerou-se tal variável como uma constante com o valor b , entendendo-se tal valor como o valor de uma frenagem confortável. Com relação ao comprimento do veículo, a estimativa não será comprometida se o tráfego da interseção for relativamente homogêneo.

No entanto, na metodologia proposta a seguir, por simplificação, apenas a velocidade será considerada como variável aleatória, sendo os demais parâmetros (b , L e δ) considerados como constantes.

Das expressões (2), (8) e (10), tem-se:

$$E[X_s] = \delta \cdot \mu_v + \frac{\mu_v^2}{2(b+iG)} + \frac{\sigma_v^2}{2(b+iG)} \quad (22)$$

$$\text{Var}[X_s] = \left[\delta + \frac{\mu_v}{b+iG} \right]^2 \sigma_v^2 \quad (23)$$

Analogamente, das expressões (3-b), (8) e (10), tem-se:

$$E[X_c] = I \cdot \mu_v - (Z + L) \quad (24)$$

$$\text{Var}[X_c] = I^2 \sigma_v^2 \quad (25)$$

As expressões (19), e (21) ficam:

$$C = \frac{1}{\beta^2} [Z + L + E[X_s]]^2 - \text{Var}[X_s] \quad (26)$$

$$Q = \left(\delta + \frac{\mu_v}{b+iG} \right) \cdot \sigma_v^2 \quad (27)$$

APLICAÇÃO PRÁTICA

São apresentados nesta seção os resultados obtidos na aplicação da metodologia na interseção Rua Cerro Corá x Rua Pio XI, localizada na zona oeste da cidade de São Paulo.

A Figura 5 apresenta um croqui da interseção estudada.

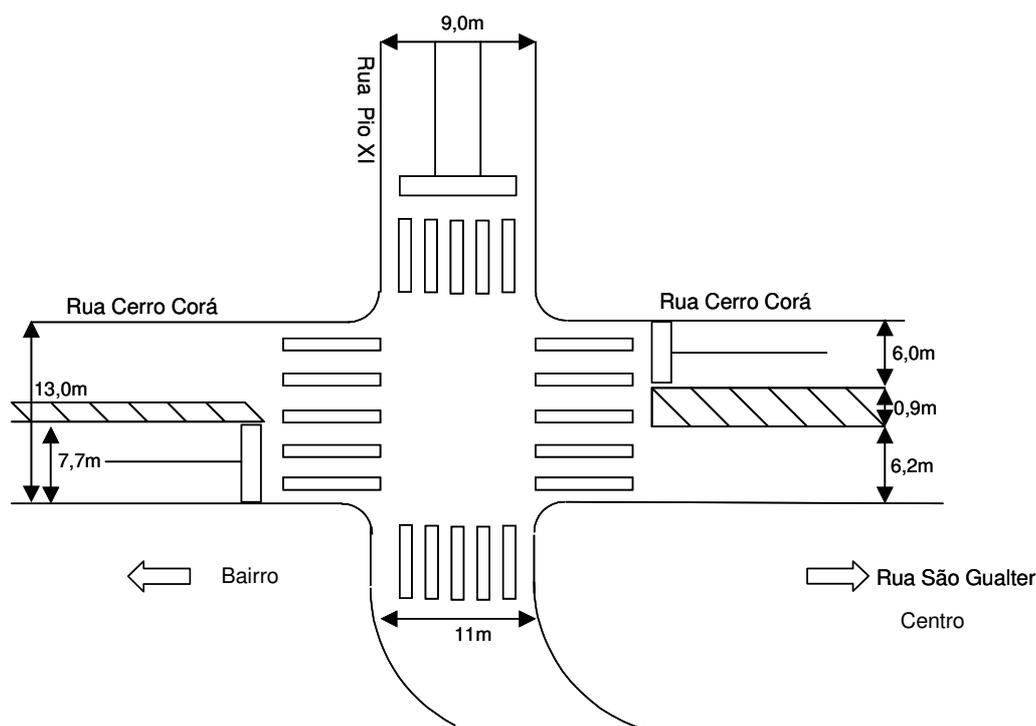


Figura 5 – Croquis da interseção Rua Cerro Corá x Rua Pio XI

O plano semafórico da interseção apresenta 3 estágios: E1 permite a operação da R. Cerro Corá, incluindo conversão à esquerda permitida com fluxo oposto; E2 permite a operação da R. Pio XI; E3 é um estágio exclusivo para pedestres demandado por botoeira. A Figura 6 apresenta o diagrama de estágios da interseção.

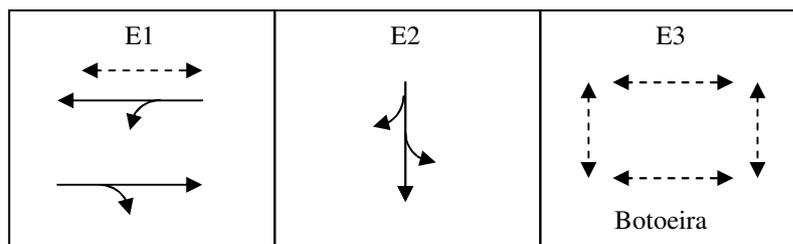


Figura 6 – Diagrama de estágios da interseção Rua Cerro Corá x Rua Pio XI

Nos cálculos, foram adotados os seguintes valores:

$$\delta = 1 \text{ s}, L = 6 \text{ m}, b = 2,8 \text{ m/s}^2 \text{ e } G = 9,8 \text{ m/s}^2.$$

Os valores de μ_v e σ_v foram obtidos por meio de pesquisa de velocidade utilizando-se de um equipamento radar estático. Contudo, se não houver a disponibilidade de um equipamento medidor de velocidade, acredita-se que seja possível estimar a média por inspeção visual e adotar um coeficiente de variação⁸ da ordem de 10 a 25%, sem que haja muito impacto na precisão dos resultados. As estimativas poderiam ser calibradas e melhoradas com a experiência adquirida na aplicação da metodologia.

A inclinação i das aproximações foi estimada visualmente.

Foram considerados apenas os movimentos em frente.

As Tabelas 1a e 1b apresentam os resultados obtidos para $P_f = 1\%$ ($\beta = 2,33$) e $P_f = 5\%$ ($\beta = 1,64$), respectivamente. Os valores de A , B , C , Q e I foram obtidos aplicando-se as expressões (17), (18), (26), (27) e (16), respectivamente.

⁸ Coeficiente de variação é o quociente entre o desvio padrão e a média: $C_v = \sigma/\mu$

Tabela 1a – Resultados obtidos para $P_f=1\%$

Estágio	Z (m)	i (%)	μ_v (km/h)	σ_v (km/h)	A	B	C	Q	I (s)
E1 Cerro Corá BC	21	2	43	6,84	23,06	-246,62	658,96	18,11	5,5
E1 Cerro Corá CB	19	0	34	6,73	12,47	-142,71	402,82	15,12	6,4
E2 Pio XI	23	0	44	8,79	21,19	-242,91	695,33	31,81	5,9

Tabela 1b – Resultados obtidos para $P_f=5\%$

Estágio	Z (m)	i (%)	μ_v (km/h)	σ_v (km/h)	A	B	C	Q	I (s)
E1 Cerro Corá BC	21	2	43	6,84	50,23	-534,68	1422,63	18,11	5,4
E1 Cerro Corá CB	19	0	34	6,73	28,74	-318,84	879,68	15,12	5,9
E2 Pio XI	23	0	44	8,79	48,85	-555,11	1576,42	31,81	5,8

A Tabela 2 mostra o resumo dos resultados obtidos.

Tabela 2 – Resultados obtidos

Estágio	I existente (s)	I (EASA) 1% (s)	I (EASA) 5% (s)	I (*) determinístico (s)
E1 Cerro Corá BC	4	5	5	6
E1 Cerro Corá CB	4	6	6	6
E2 Pio XI	4	6	6	6

(*) Foi adotado o valor de 70 km/h para v em todas as aproximações.

Os resultados obtidos levam a concluir que, provavelmente, o entreverdes existente é insuficiente.

No exemplo, os valores obtidos com $P_f = 1\%$ e $P_f = 5\%$ foram equivalentes. Em relação à comparação entre os métodos determinístico e probabilístico, embora os valores obtidos pelos dois métodos tenham sido bastante próximos, deve-se atentar que foi utilizado um valor de velocidade (70 km/h) muito superior à média efetivamente constatada no local (30 a 40 km/h).

AMARELO E VERMELHO DE SEGURANÇA

O método de EASA não permite calcular o período de amarelo e do vermelho de segurança, mas apenas a duração total do entreverdes. A presente seção tem por objetivo o cálculo do período de amarelo e do período de vermelho de segurança aplicando-se, de forma separada, a metodologia proposta para cada um desses períodos.

Amarelo

Adequando-se as expressões (3b), (24), (25), (18), (26), (16) para o período de amarelo, tem-se:

$$X_c = I_y \cdot v \quad (28)$$

$$E[X_c] = I_y \cdot \mu_v \quad (29) \quad \text{e} \quad \text{Var}[X_c] = I_y^2 \sigma_v^2 \quad (30)$$

$$B = 2Q - \frac{2\mu_v}{\beta^2} E[X_s] \quad (31)$$

$$C = \frac{1}{\beta^2} [E[X_s]]^2 - \text{Var}[X_s] \quad (32)$$

$$I_y = \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \quad (33)$$

Vermelho de segurança

Para o período de vermelho de segurança, a função F para a margem de segurança seria:

$$F = I_r \cdot v - (Z + L) \quad (34)$$

$$E[F] = I_r \cdot \mu_v - (Z + L) \quad (35) \quad \text{e} \quad \text{Var}[F] = I_r^2 \cdot \sigma_v^2 \quad (36)$$

Da expressão (14), obtém-se:

$$I_r = \frac{Z + L}{\mu_v - \beta \sigma_v} \quad (37)$$

Aplicação prática

Aplicando-se a metodologia para o exemplo da interseção da Figura 5, foram obtidos os resultados mostrados na Tabela 3.

Tabela 3 – Resultados obtidos: períodos de amarelo e vermelho de segurança

Estágio	$P_f = 1\%$			$P_f = 5\%$			$P_f = 10\%$			I determinístico (*)			I existente		
	I_Y	I_R	I	I_Y	I_R	I	I_Y	I_R	I	I_Y	I_R	I	I_Y	I_R	I
E1 Cerro Corá BC	3,6	3,5	7,1	3,5	3,0	6,5	3,4	2,8	6,2	4,4	1,4	5,8	4,0	0,0	4,0
E1 Cerro Corá CB	3,2	5,0	8,2	3,1	4,0	7,1	3,1	3,6	6,7	4,5	1,3	5,8	4,0	0,0	4,0
E2 Pio XI	3,9	4,5	8,4	3,8	3,6	7,4	3,7	3,2	6,9	4,5	1,5	6,0	3,0	1,0	4,0

(*) Foi adotado o valor de 70 km/h para v em todas as aproximações.

Os resultados mostram um claro superdimensionamento do período de amarelo e um subdimensionamento do período de vermelho de segurança do método determinístico em relação ao método probabilístico. Como comentado anteriormente, este efeito é devido ao fato de o método determinístico adotar valores de velocidade acima dos efetivamente constatados.

Os valores para os períodos de amarelo e vermelho de segurança para $P_f = 1\%$ parecem ser exagerados para efeitos de aplicação prática. O entreverdes total, da ordem de 7 segundos, tanto para $P_f = 5\%$ como para $P_f = 10\%$, também podem parecer algo exagerados. No entanto, apenas a experiência e a análise de resultados práticos aplicados em uma amostra

significativa de interseções poderão indicar qual o valor de P_f mais adequado para cada tipo de interseção, bem como para cada situação de trânsito.

Os valores obtidos para $P_f = 5\%$ e $P_f = 10\%$ foram muito próximos. Como os controladores de tráfego usualmente permitem a configuração do entreverdes em passos de 1 segundo, na prática é indiferente adotar $P_f = 5\%$ ou $P_f = 10\%$ (ao menos no exemplo apresentado). Contudo, esses resultados podem sugerir a necessidade de que os controladores possam configurar os períodos de entreverdes em passos de décimo de segundo. Novamente, apenas a experiência prática poderá determinar a real necessidade da precisão de décimos de segundo.

A Tabela 4 mostra uma comparação da duração total do entreverdes calculado das duas formas: entreverdes sem distinguir o amarelo e o vermelho de segurança (Tabelas 1-a e 1-b) e entreverdes como a soma do amarelo + vermelho de segurança (Tabela 3).

Tabela 4 – Comparação da duração total do entreverdes calculado das duas formas: entreverdes sem distinguir o amarelo e o vermelho de segurança e entreverdes como a soma do amarelo + vermelho de segurança

Estágio	$P_f = 1\%$		$P_f = 5\%$	
	I	$I_Y + I_R$	I	$I_Y + I_R$
E1 Cerro Corá BC	5,5	7,1	5,4	6,5
E1 Cerro Corá CB	6,4	8,2	5,9	7,1
E2 Pio XI	5,9	8,4	5,8	7,4

Pode-se observar que os valores obtidos com o cálculo do amarelo e do vermelho de segurança são maiores do que aqueles obtidos com o cálculo do entreverdes sem distinguir esses períodos. É possível que o antagonismo entre o período de amarelo e o vermelho de segurança em relação à velocidade seja minimizado quando integrados no mesmo cálculo. À primeira vista, parece ser mais consistente calcular os períodos de amarelo e de vermelho de segurança de forma separada por se tratarem de períodos distintos, que se referem a processos e riscos de segurança distintos.

CONCLUSÕES

O artigo de EASA apresentou um método probabilístico para calcular o período de entreverdes, considerando a variabilidade e a correlação das variáveis envolvidas. Por esse método, o entreverdes pode ser dimensionado em função da probabilidade de falha estabelecida em projeto. Contudo, pela sua própria natureza, o método probabilístico não é apropriado para entreverdes fixos. No método determinístico, o entreverdes é dimensionado sem se conhecer previamente o grau de falha envolvido.

Devido à dificuldade de obtenção das distribuições e das correlações entre as variáveis envolvidas, foi proposta uma simplificação do método probabilístico desenvolvido por EASA, considerando apenas a velocidade como variável aleatória.

O método de EASA permite dimensionar apenas a duração total do entreverdes, não fornecendo explicitamente os valores do período de amarelo e do vermelho de segurança. Baseado na metodologia apresentada por EASA, foi proposto um método para calcular explicitamente os períodos de amarelo e vermelho de segurança.

Para saber se o método probabilístico (na sua forma simplificada) apresenta, efetivamente e de forma relevante para aplicações práticas, uma precisão maior do que o método determinístico, seria necessária a aplicação simultânea dos dois métodos em uma amostra significativa de casos. Entretanto, o exemplo mostrado na aplicação prática revelou que o método determinístico apresenta valores maiores do que o método probabilístico para o período de amarelo e valores menores para o período de vermelho de segurança devido à adoção de valores conservadores para a velocidade (85-percentil ou velocidade máxima regulamentada). Também foi mostrado que o entreverdes apresenta um antagonismo entre os períodos de amarelo e vermelho de segurança, gerando valores inconsistentes para o período de vermelho de segurança quando são adotadas velocidades maiores do que as efetivamente praticadas (quanto maior é a velocidade adotada no cálculo, menor é o tempo de vermelho de segurança calculado).

O exemplo mostrou ainda que os valores obtidos para $P_f = 1\%$ parecem ser exagerados para efeitos de aplicação prática, sendo necessária, entretanto, a análise de mais casos para poder-se determinar qual o P_f mais adequado para cada tipo de interseção e para cada situação de trânsito.

O exemplo também mostrou que, para a resolução de 1 segundo, os valores para $P_f = 5\%$ e $P_f = 10\%$ foram praticamente indistinguíveis, sugerindo a necessidade de resolução de décimos de segundo. Novamente, apenas a prática poderá dizer se é relevante esse aumento de resolução.

Quanto à facilidade de aplicação, o método probabilístico (na sua forma simplificada) é tão simples quanto o determinístico, com exceção da pesquisa de velocidade. Contudo, conforme já comentado anteriormente, talvez seja possível que se possa adquirir uma prática em estimar, de forma visual, a média e o desvio padrão (por meio de uma estimativa do coeficiente de variação) da velocidade sem que haja impacto relevante na precisão dos resultados. Contudo, somente a experiência poderá confirmar ou não essa expectativa.