

Dimensionamento dos tempos de entreverdes para veículos

Luis Vilanova *

Importância do tema

O dimensionamento dos tempos de entreverdes nos semáforos para veículos é levado a termo, freqüentemente, através de critérios totalmente subjetivos.

Em muitas cidades, por exemplo, existe a tendência de ajustar o tempo de *amarelo* em três segundos, independentemente das características específicas de cada local. Em situações mais críticas, programam-se *amarelos* de quatro ou cinco segundos, ou ainda, acrescenta-se um período de *vermelho de limpeza*. Tais medidas são tomadas, geralmente, quando se percebe a existência de uma situação perigosa, ou pior, quando se verifica grande quantidade de colisões. Sabe-se que alguma coisa tem de ser feita e aumentar o tempo dos entreverdes parece ser uma providência coerente. Entretanto, na maioria das vezes, não se compreende muito bem qual a relação entre a duração dos tempos de *amarelo* e *vermelho de limpeza* com o tipo de periculosidade do cruzamento semaforizado.

O assunto atinge, inclusive, aspectos legais. Cumpre à Engenharia de Trânsito implementar uma sinalização segura. Programações de tempos equivocados, que impliquem numa situação perigosa para os motoristas, podem levar a demandas judiciais.

A verdade é que convivemos, em muitos semáforos, com uma situação geradora de acidentes. A deficiência é ainda mais difícil de se aceitar porque o custo de corrigi-la é praticamente inexistente.

Outro ponto digno de atenção é que os acidentes graves acontecem, principalmente, em cruzamentos semaforizados. Por exemplo, se considerarmos os 100 cruzamentos com maior índice de acidentes do tipo “colisão com vítima” na cidade de São Paulo, encontraremos 98 com semáforos instalados. Evidentemente, não se pode inferir que a alta porcentagem ocorre, exclusivamente, devido a entreverdes mal dimensionados, mas é possível afirmar que tratar a questão de forma mais acurada reverterá em expressiva melhoria na segurança viária, pois estaremos atacando justamente os casos com maior concentração de acidentes.

O trabalho aqui apresentado pretende auxiliar os técnicos nesta iniciativa ao apresentar a formulação básica da teoria do cálculo dos tempos de entreverdes e sua aplicação prática.

Suporte teórico ao cálculo do tempo de *amarelo*

A formulação teórica envolvida se resume à aplicação direta dos princípios da Física. Vamos analisar, primeiro, o caso de terreno plano, onde a declividade é nula.

Consideremos a figura 1:

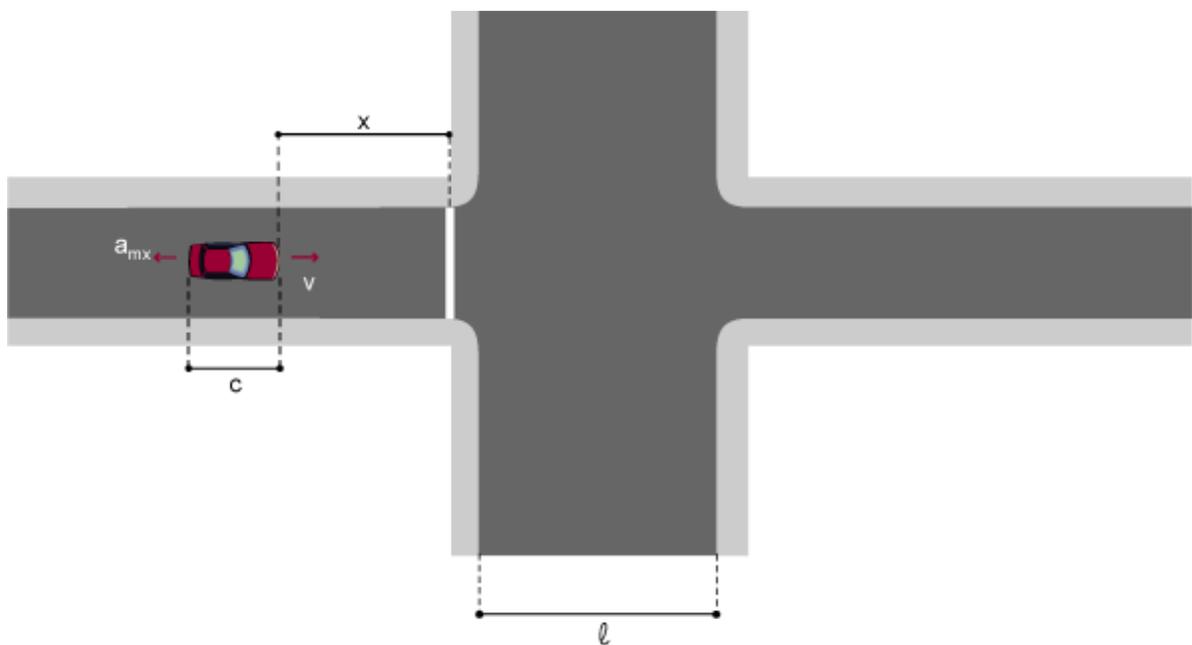


figura 1

em que,

- x - distância do veículo até a faixa de retenção quando surge a indicação amarela;
- c - comprimento do veículo;
- l - largura da via transversal;

v - velocidade do veículo;

a_{mx} - máxima desaceleração do veículo;

t_{pr} - tempo perdido pelo motorista, composto pela demora de percepção e pelo tempo necessário à reação em si.

Para que o veículo consiga frear na faixa de retenção, a seguinte relação tem de ser obedecida:

$$x \geq v * t_{pr} + \frac{v^2}{2 * a_{mx}} \quad (1)$$

Existe, portanto, uma distância crítica $x_{crítico}$ aquém da qual os veículos não conseguem frear antes da retenção. Tal distância é dada por:

$$x_{crítico} = v * t_{pr} + \frac{v^2}{2 * a_{mx}} \quad (2)$$

À seção da via que dista, exatamente, $x_{crítico}$ da faixa de retenção dá-se o nome de *seção crítica para frenagem*. Os veículos que se encontrarem à frente desta seção não conseguirão parar antes da faixa de retenção. Para estes veículos, é necessário assegurar que, pelo menos, não apareça a cor vermelha antes que eles consigam ultrapassar a faixa da retenção, donde se conclui que a duração do período de *amarelo* deve ser longa suficiente para atendê-los.

A situação mais desfavorável é a daquele veículo que está justamente na *seção crítica para frenagem* quando o semáforo muda para *amarelo*. Vamos supor que este veículo trafega a uma velocidade uniforme v . Neste caso, o tempo que ele demora para chegar na faixa da retenção determina a duração do período de *amarelo*, denominado t_{am} , e é igual a:

$$t_{am} = t_{pr} + \frac{v}{2 * a_{mx}} \quad (3)$$

Se o intervalo de *amarelo* for inferior a este valor, passa a existir uma região onde o veículo que nela se encontrar não consegue nem frear a tempo (pois está a uma distância da retenção menor do que $x_{crítico}$), nem prosseguir e cruzar a retenção antes do início do período vermelho.

Rampas

Nas rampas, deve-se passar a considerar a projeção da aceleração da gravidade na reta em que se move o veículo. Esta projeção é igual a $g * \text{sen } \alpha$, em que g é a aceleração da gravidade e o ângulo α representa a inclinação da rampa. Para ângulos pequenos, como são os casos práticos dos greides das vias, pode-se substituir $\text{sen } \alpha$ por $\text{tg } \alpha$. Com tal simplificação, pode-se representar a projeção da gravidade por $g * D$, em que D é a declividade da rampa, sinônimo de $\text{tg } \alpha$.

Quando o veículo encontra-se numa descida, a projeção da gravidade tem o mesmo sentido do movimento do veículo e irá anular parte da desaceleração aplicada. Com uma desaceleração resultante menor, o veículo precisa de mais distância para poder parar, ou seja, a distância crítica $x_{\text{crítico}}$ aumenta, implicando na necessidade de tempos de amarelo maiores do que em terrenos planos.

Por outro lado, nos aclives, a projeção da gravidade se somará à desaceleração, levando a distâncias críticas e tempos de amarelo menores.

Reescrevemos as expressões (2) e (3), acrescentando o efeito da declividade.

A distância crítica é dada por:

$$x_{\text{crítico}} = v * t_{pr} + \frac{v^2}{2 * (a_{mx} \pm g * D)} \quad (4)$$

Enquanto que o tempo de amarelo é calculado pela expressão:

$$t_{am} = t_{pr} + \frac{v}{2 * (a_{mx} \pm g * D)} \quad (5)$$

Em que,

g - aceleração da gravidade, igual a 9,8 m/s²;

D - declividade da via, igual à tangente do ângulo da rampa.

Os outros termos já foram definidos na apresentação das equações (2) e (3).

Nas expressões (4) e (5), a parcela $g \cdot D$ recebe sinal negativo nas descidas e positivo nas subidas.

O exemplo seguinte servirá para fixar melhor as noções teóricas até aqui apresentadas e introduzir algumas novas. Consideremos uma aproximação semaforizada numa descida com inclinação igual a 8%, que apresenta os seguintes dados:

$$v = 14,0 \text{ m/s};$$

$$a_{mx} = 3,1 \text{ m/s}^2$$

$$t_{pr} = 1,2 \text{ s}$$

$$D = 8 / 100 = 0,08$$

Aplicando a equação (4), encontramos a posição da seção crítica:

$$x_{crítico} = 14,0 * 1,2 + \frac{14,0^2}{2 * (3,1 - 9,8 * 0,08)}$$

$$x_{crítico} = 59.1 \text{ m}$$

A equação (5) fornece o intervalo necessário de *amarelo*:

$$t_{am} = 1,2 + \frac{14,0}{2 * (3,1 - 9,8 * 0,08)}$$

$$t_{am} = 4,2 \text{ s}$$

Vamos analisar, na figura 2, qual o efeito de implementar um período de *amarelo* inferior ao necessário no exemplo recém apresentado. Imaginemos que o valor programado fosse igual a três segundos.

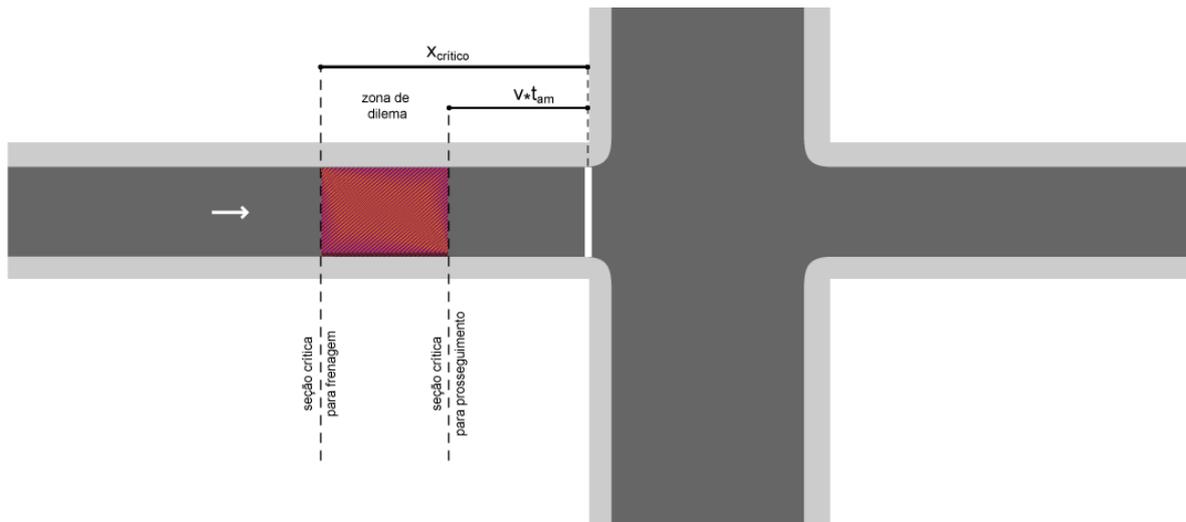


figura 2

Supondo velocidade constante de 14,0 m/s, um veículo, em 3 segundos, vai percorrer 42,0 metros. Portanto, se ele se encontrar a menos de 42,0 metros da retenção quando do início do sinal amarelo, poderá prosseguir normalmente e ultrapassar a retenção sem problemas, ainda no *amarelo*. Porém se estiver a mais de 42,0 metros, será obrigado a parar. Chamamos à seção correspondente a este limite (42,0 metros antes da retenção, no exemplo) de *seção crítica para prosseguimento*.

Entretanto, verificamos, no exemplo, que os veículos só conseguem parar quando estão além da seção situada a 59,1 metros da retenção. Assim sendo, existe uma região, entre os 42,0 e os 59,1 metros, onde o motorista não consegue nem prosseguir e passar ainda no *amarelo*, nem frear e parar corretamente na faixa de retenção.

Isso ocorre sempre que a *seção crítica para prosseguimento* estiver situada mais perto do cruzamento do que a *seção crítica para frenagem*. Dá-se o nome de *zona de dilema* a esta região provocada pelo dimensionamento insuficiente do período de *amarelo*.

Suporte teórico ao cálculo do tempo de *vermelho de limpeza*

Consideremos a figura 3:

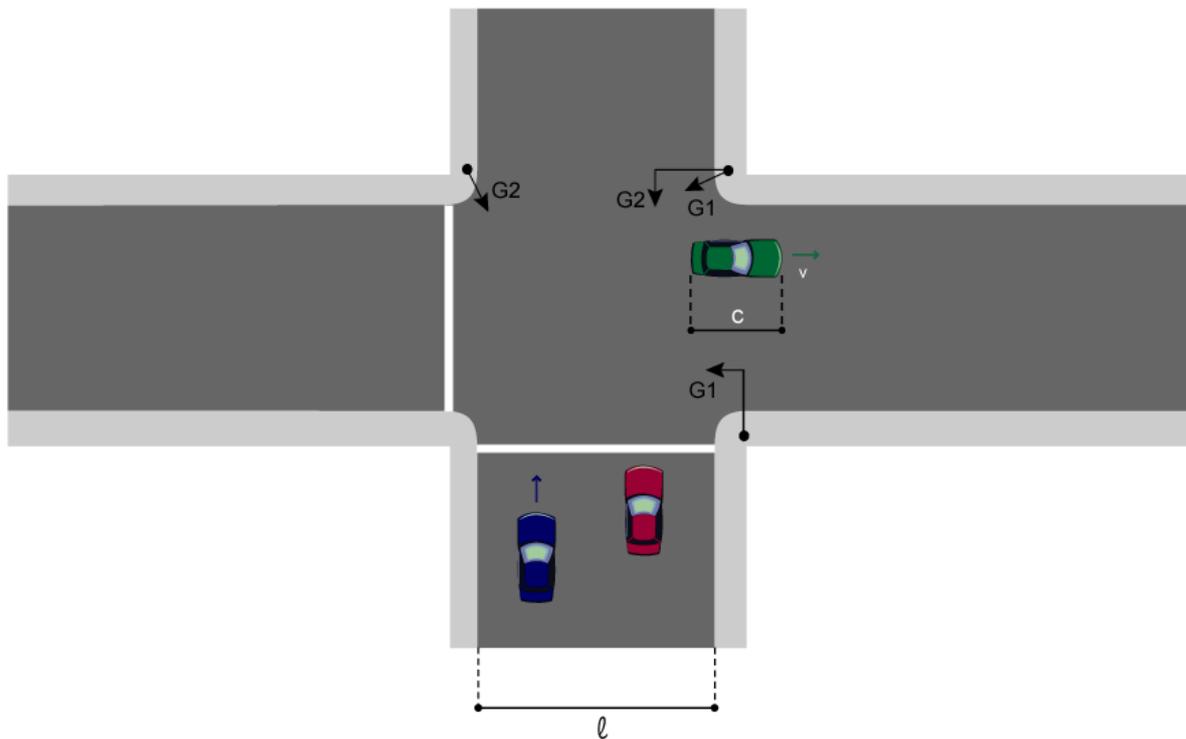


figura 3

em que,

- l - largura da via transversal;
- c - comprimento do veículo;
- v - velocidade do veículo.

Não basta que o veículo verde ultrapasse sua faixa de retenção no período de *amarelo*. Ele deve, ainda, sair da área de conflito do cruzamento antes que possa vir a colidir com os veículos da transversal. A fim de garantir que não exista tal conflito, a solução é intercalar, imediatamente após o período de *amarelo*, um outro, denominado *vermelho de limpeza*. Neste período, que dura somente alguns poucos segundos, o veículo verde, que já passou pela retenção, mas que ainda se encontra na área do cruzamento, já está recebendo a indicação de foco vermelho. Enquanto isso, o semáforo ainda permanece em vermelho para os veículos da transversal. A figura 4 traz o detalhe desta configuração.

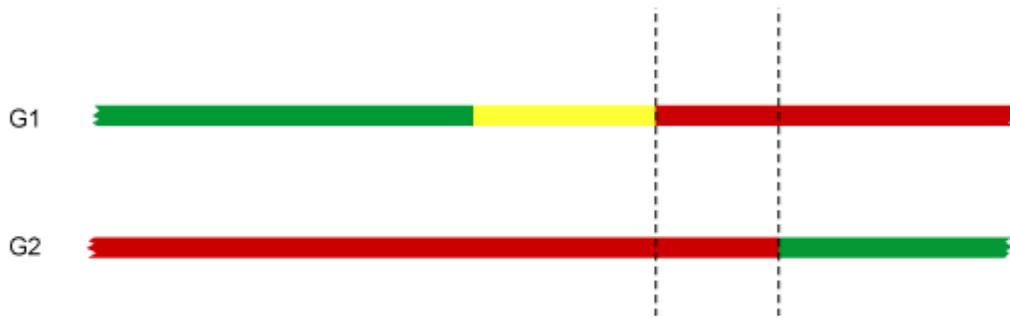


figura 4

Para assegurar que o veículo verde tenha saído totalmente da área do cruzamento quando o semáforo da transversal for para verde, o comprimento do *vermelho de limpeza*, representado por t_{vl} , deve ser igual a:

$$t_{vl} = \frac{l + c}{v} \quad (6)$$

Existe, entretanto, um aspecto complementar a ser considerado. Os veículos da transversal não entram imediatamente na área de conflito no mesmo instante em que acende seu verde. Ocorre certa demora que pode ser explicada pela noção do tempo de percepção e de reação. Isso nos leva a crer que podemos descontar, da equação (6) certa parcela, que denominamos “tempo de invasão” (t_{in}), encarregada de representar o tempo que um veículo demora para invadir a área de conflito depois que acendeu seu verde. A introdução deste novo conceito conduz à equação (7), para o cálculo do *vermelho de limpeza*:

$$t_{vl} = \frac{l + c}{v} - t_{in} \quad (7)$$

É importante ressaltar que não estamos nos referindo ao veículo que estava parado na faixa de retenção esperando o verde. O caso crítico, e é o que deve receber atenção, é o do veículo que vinha se aproximando do cruzamento pela transversal numa faixa em que não havia nenhum outro parado. Mesmo esse veículo possui um tempo de invasão não nulo, mas é muito menor do que aquele a que está sujeito seu vizinho, parado na retenção. Na figura 5, deve ser medido o t_{in} do veículo verde que está se aproximando do cruzamento no seu vermelho e não do veículo azul, que está parado. Dependendo do instante que o semáforo virar verde, o veículo verde não vai nem chegar a parar. Mesmo nesse caso, porém, existirá um pequeno intervalo de tempo entre o instante em

que surge o verde e aquele em que o veículo verde consegue entrar, efetivamente, na área de conflito, podendo vir a atingir o veículo vermelho.

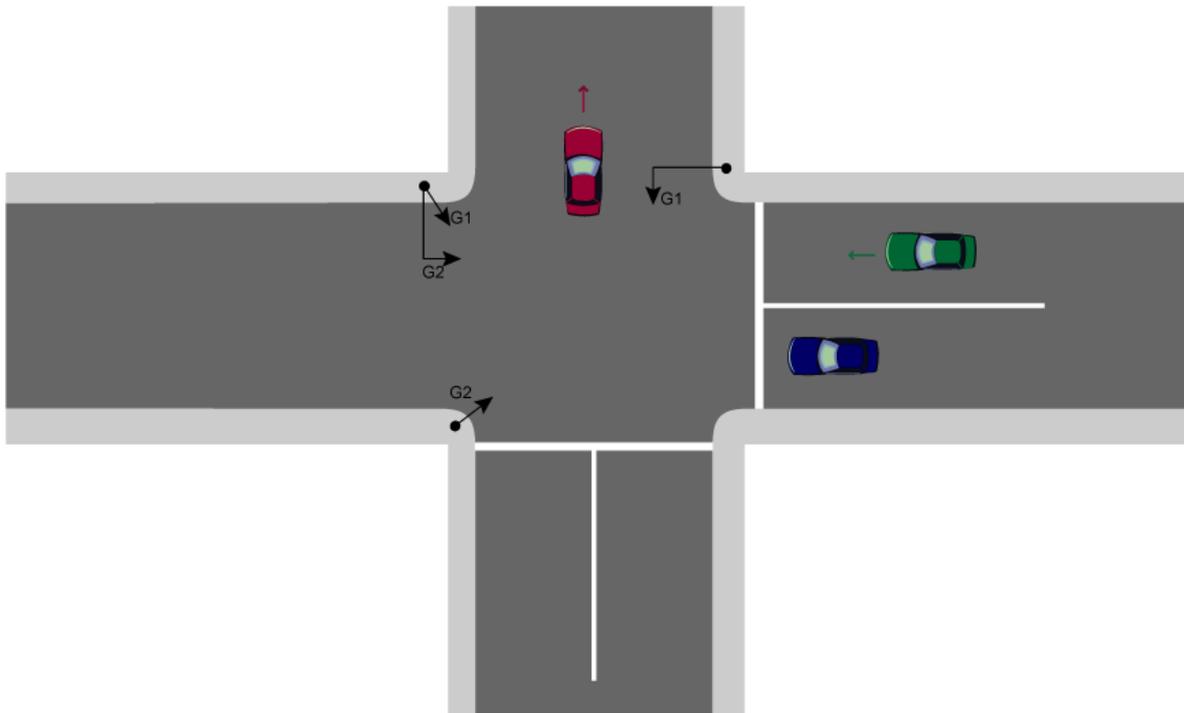


figura 5

Deve-se empregar com extremo cuidado o desconto do tempo de invasão. Existem locais que possuem características que impedem sua utilização, ou seja, em que se deve adotar t_{in} igual a zero. Mostramos um possível exemplo na figura 6.

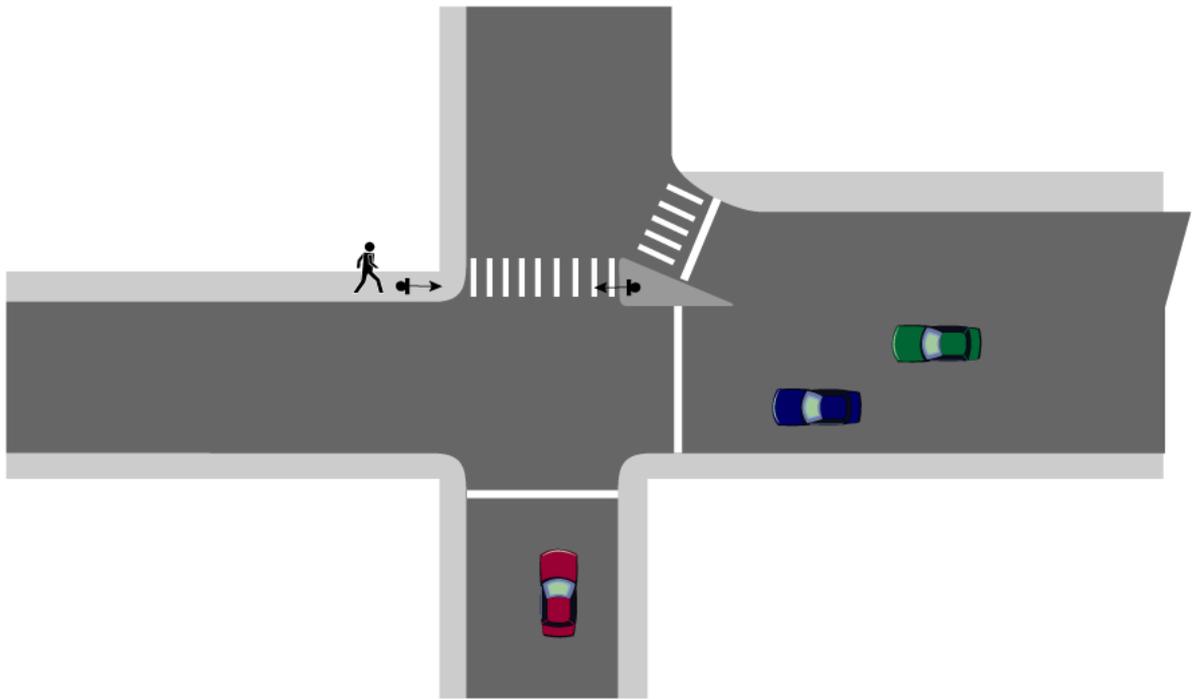


figura 6

Não podemos pensar, somente, na possível colisão dos veículos. Muito mais crítico é o possível conflito entre o veículo e um pedestre que vai atravessar na faixa desenhada na figura. Nesta situação, a pior área de conflito se situa na faixa de pedestres, após a área do cruzamento. O pedestre começa sua travessia quase imediatamente após o início de seu verde, podendo ser colhido pelo veículo vermelho se não houver um vermelho de limpeza suficiente. Aliando a este fato a maior fragilidade do pedestre, recomendamos que se considere o tempo de invasão igual a zero sempre que existirem focos de pedestre neste tipo de situação.

Na verdade, após perceber a periculosidade do assunto, o que acaba acontecendo é que nos vem a inclinação de ignorar, a favor da segurança, o desconto do tempo de invasão em todos os casos. O argumento que nos impede de assegurar que esta é sempre a melhor solução é o de que ela pode levar a vermelhos de limpeza maiores do que o necessário. Isso não é bom, pois programações exageradamente conservadoras de tempos de semáforos passam a ser desacreditadas pelos motoristas, gerando desrespeito e, conseqüentemente, situações de risco. Deixamos aqui a proposta de que o técnico estude a utilização, ou não, do termo t_{in} em cada caso concreto.

Vamos, agora, construir um exemplo numérico para ilustrar o cálculo do tempo de *vermelho de limpeza* (t_{vl}), analogamente ao que fizemos para o *amarelo*. Consideremos uma aproximação onde se medem os seguintes valores:

$$\begin{aligned}l &= 18,0 \text{ m;} \\c &= 5,0 \text{ m;} \\v &= 15,0 \text{ m/s.} \\t_{in} &= 0,8 \text{ s}\end{aligned}$$

Aplicando a expressão (7), obtemos o valor da duração do *vermelho de limpeza*:

$$t_{vl} = \frac{18,0 + 5,0}{15,0} - 0,8$$

$$t_{vl} = 0,7 \text{ s} \rightarrow t_{vl} = 1,0 \text{ s}$$

É importante perceber que o *vermelho de limpeza* tem uma relação direta com a largura da transversal e inversa com a velocidade da via para a qual ele está sendo dimensionado. Assim, quanto maior a velocidade da via, menor a necessidade que ela tem deste recurso. Vias com velocidades altas precisam de amarelos maiores e vermelhos de limpeza menores.

As funções do *amarelo* e do *vermelho de limpeza*

A metodologia apresentada até aqui pressupõe que a função do período de *amarelo* é a de garantir que todos os veículos possam ultrapassar a faixa de retenção antes que seu semáforo mude para vermelho, enquanto que o papel do *vermelho de limpeza* é o de assegurar que o semáforo dos veículos da transversal não vá para o verde enquanto houver ainda veículos da outra via na área de conflito do cruzamento.

Essa, atualmente, é a visão mais moderna e quase unânime entre os técnicos, atualmente. Entretanto, nem sempre tal abordagem predominou. A primeira apreciação teórica do assunto “entreverdes” foi desenvolvida por Gazis em 1959. Na sua proposta, o período de *amarelo* seria responsável pelas duas funções descritas no parágrafo anterior. Portanto, o tempo de duração do *amarelo* seria calculado por:

$$t_{am} = t_{pr} + \frac{v}{2 * a_{mx}} + \frac{l+c}{v} \quad (8)$$

Nesse caso, não se imaginava a utilização do *vermelho de limpeza*. O intervalo de *amarelo* se encarregaria de “levar” o veículo não só até a faixa de retenção, mas até uma seção fora da área de conflito. Ainda hoje em dia, existem técnicos que preferem se orientar por essa abordagem.

Nós escolhemos não endossar esse enfoque porque conduz a tempos de *amarelo* demasiadamente longos, o que contraria a concepção básica do *amarelo*: “Você deve parar quando vê o sinal amarelo, a não ser que isso possa representar uma situação de risco”. Se o *amarelo* for excessivamente longo, os motoristas que freqüentam o local vão acabar percebendo, com o passar do tempo, que não há necessidade de parar quando ele aparece, o que vai acarretar a perda de sua credibilidade. Essa falsa ilusão vai provocar que, algum dia, conforme a distância a que estava da retenção quando recebeu o sinal amarelo, o motorista se veja colhido pelo sinal vermelho no meio da área de conflito, e o que é pior: com o verde já aberto para a transversal.

Entretanto, reconhecemos a consistência de uma crítica feita por muitos à orientação que preferimos seguir: o motorista vai ter de atravessar a área de conflito sob o sinal vermelho e pode ser levado a crer que a transversal já está em verde, gerando uma sensação de insegurança.

Ambos os enfoques têm suas vantagens e desvantagens. Nossa escolha apoiou-se em aplicações práticas que fizemos usando os dois métodos. Percebemos que a utilização do *vermelho de limpeza*, apesar de gerar uma sensação de insegurança, (ou talvez por isso mesmo!?) cria uma situação de fato muito mais segura ao intercalar um intervalo de vermelho para os dois lados.

Nesse ponto, algumas pessoas podem imaginar que encontraram uma solução óbvia se dimensionarem o *amarelo* por *Gazis* e o *vermelho de limpeza* pelo método aqui abordado. Entretanto, no trânsito, principalmente na área de semáforos, a margem de segurança não funciona como em outros setores da engenharia. Como já sustentamos antes, se os motoristas sentirem que as durações dos tempos do semáforo são incoerentes, passarão a desacreditá-los e, conseqüentemente, desrespeitá-los. Tomemos o exemplo de semáforo só para travessia de pedestres, situado no meio do quarteirão. Alguns técnicos programam a duração do estágio para travessia do pedestre muito mais longo do que o necessário, acreditando estar a favor da segurança. Mas o que ocorre,

na prática, é exatamente o contrário. Os motoristas acabam percebendo que ficam parados sem necessidade, pois todos os pedestres já atravessaram. Com o tempo, o semáforo passará a ser desrespeitado pelos veículos, gerando, agora sim, uma situação potencialmente perigosa.

Outro procedimento posto em prática, e, evidentemente, incorreto, é a substituição parcial do *amarelo* pelo *vermelho de limpeza*. Tomemos o caso de um cruzamento perigoso, onde os veículos da transversal entram na área de conflito antes que os veículos da outra via a tenham abandonado. Sem estudar mais detidamente a causa do problema, ataca-se apenas seu efeito, programando indiscriminadamente um intervalo de limpeza como solução-padrão. Ora, se o problema provinha de um tempo de *amarelo* insuficiente, a intervenção não vai conseguir resolver o risco de acidentes. Uma observação interessante é que, nestes casos, opta-se, geralmente, por utilizar valores maiores de *vermelho de limpeza* nas vias que apresentam maior velocidade, o que contraria frontalmente o conceito de que justamente nas vias mais velozes é que este parâmetro deve ser menor.

Quantificação dos parâmetros

Como vimos, a formulação teórica é bastante simples. A grande dificuldade reside em determinar quais são os valores numéricos que devem ser aplicados aos parâmetros intervenientes em cada situação enfrentada. Como os tempos de *amarelo* e *vermelho de limpeza* são de uma ordem de grandeza bastante pequena, qualquer pequeno desvio nos valores escolhidos para representar as grandezas v e a_{mx} implicará em variação significativa dos tempos de entreverdes.

Os valores que passamos a propor tomaram por base, por um lado, a literatura existente sobre o assunto e, por outro, nossa experiência em programação de semáforos.

Tempo de percepção e reação

Chama-se de tempo de percepção e reação, t_{pr} , ao intervalo de tempo que o motorista demora para começar a frear. Compõe-se de duas parcelas:

- a) tempo de percepção: o intervalo entre a entrada do *amarelo* e sua percepção pelo motorista;
- b) tempo de reação: o intervalo entre a percepção e o início da ação de frear.

Este é o parâmetro que gera menos polêmica. As pesquisas desenvolvidas, internacionalmente, apontam para valores situados numa faixa bastante estreita, entre 0,8 e 1,2 s. Entretanto, não podemos esquecer que pode haver uma variação significativa em alguns casos particulares devido a fatores específicos, como, por exemplo, utilização de álcool, cansaço, problemas de visão, etc.

Sugerimos adotar o valor de t_{pr} igual a 1,2 segundo, acima do qual se encontram pouquíssimas recomendações.

Velocidade

A bibliografia recomenda, na maioria dos casos, que a velocidade adotada, v , seja aquela correspondente ao 85 percentil, ou seja, levantado o perfil de velocidades individuais dos veículos em determinada aproximação, devemos escolher o valor abaixo do qual se situem 85% das amostras. Dessa forma, apenas 15% dos veículos apresentariam velocidade maior do que a velocidade de projeto.

Não aconselhamos seguir esta orientação devido a motivos práticos. O levantamento do perfil de velocidades instantâneas é uma tarefa complexa e exige instrumentos específicos, que geralmente não são disponíveis.

Nossa proposta é a de que seja considerada a velocidade máxima permitida para a via analisada. Dessa forma, estaremos dentro do terreno legal, o que significa que estaremos propiciando uma situação segura a todos os motoristas não-infratores.

Pode-se, é claro, argumentar que muitos veículos trafegam a velocidades superiores à permitida. Sugerimos, então, que em locais (ou horários) em que isso se der, passem a ser consideradas as velocidades mais altas que realmente ocorrem. Parece razoável, por exemplo, adotar este procedimento nas situações com pouco movimento de trânsito como é o caso do período da madrugada.

Em casos mais complexos, pode ser imprescindível recorrer ao levantamento do perfil de velocidades, único meio de precisar melhor a velocidade a ser utilizada. Nesse caso, consideramos muito baixo o ponto de corte de 85%, recomendado pela literatura internacional. Não parece razoável permitir que 15% dos veículos deixem de ser atendidos. Propomos que, no mínimo, seja adotado o valor igual a 95%.

Máxima desaceleração aceitável

Ao contrário do que pode parecer à primeira vista, a máxima desaceleração, a_{mx} , não corresponde ao maior valor que é possível aplicar ao veículo sob o ponto de vista puramente mecânico, pois neste caso obrigaríamos os motoristas a realizarem freadas extremamente bruscas. Na verdade, o valor assumido deve ser bem menor do que este, pois deve atender aos aspectos segurança e conforto do motorista.

As recomendações encontradas, na literatura internacional sobre o assunto, para o valor a ser adotado como máxima desaceleração aceitável, variam de 2,0 m/s² a 4,2 m/s², com maior concentração entre 2,4 e 3,6 m/s². A AASHTO recomenda 3,4 enquanto o excelente “Principles of Highway Engineering and Traffic Analysis” adota 3,05 m/s², valor também endossado pelo regulamento argentino. O manual australiano indica 3,0 m/s².

A desaceleração é aplicada no denominador da expressão (5) que calcula o tempo de *amarelo*, o que traz por conseqüência que pequenos desvios na máxima desaceleração impliquem em desvios representativos no resultado final. Por isso, a quantificação deste parâmetro é a que apresenta maior dificuldade.

Outros elementos complicadores na determinação da máxima desaceleração aceitável são a complexidade em estabelecer valores quantitativos para fatores subjetivos, como é o caso do fator conforto, e a intervenção de outros fatores físicos como, por exemplo, a condição da pista (molhada, seca, escorregadia, etc.), o tipo de veículo, o estado dos pneus e dos freios.

Recomendamos o valor de 3,1 m/s², que tem nos levado a bons resultados práticos durante o desenrolar de nossos trabalhos profissionais.

Os controladores somente aceitam valores inteiros para o tempo de amarelo. O arredondamento necessário ganha papel importante na sua determinação, pois

é um intervalo que dura somente alguns poucos segundos. Sugerimos fazer os cálculos com $3,1 \text{ m/s}^2$. Se o décimo de segundo resultante for maior do que 5, arredonda-se para o inteiro superior. Se for igual ou menor, verifica-se a qual desaceleração corresponderia o inteiro inferior. Aceita-se o arredondamento para baixo se a desaceleração correspondente for igual ao patamar $3,4 \text{ m/s}^2$, adotado pela AASHTO. Caso contrário, seleciona-se o inteiro superior.

Largura da transversal

A largura da transversal (l) é a distância de guia a guia da transversal, independentemente da presença, ou não, de estacionamento junto ao meio-fio, conforme pode ser visto na figura 3.

Comprimento do veículo

Sugerimos adotar, de forma geral, o valor de cinco metros para representar o comprimento do veículo (c). Nos casos em que houver porcentagem significativa de veículos maiores, como ônibus e caminhões, deverá ser empregada a dimensão que melhor os represente.

Tempo de invasão

Encontram-se, equivocadamente, em alguns artigos que tratam do tema, valores para o tempo de invasão (t_{in}) da ordem de três segundos. Isso só faria sentido se estivessemos considerando o veículo que está parado na faixa de retenção, aguardando o verde. Como já abordamos antes, o enfoque tem de ser dado ao veículo, em movimento, que se aproxima do cruzamento.

Foi feita uma pesquisa específica, pela CET de São Paulo, na qual se mediu os valores individuais de t_{in} dos veículos, em movimento, que estavam chegando ao cruzamento quando receberam o foco verde. Foram realizadas 100 amostras e o menor valor encontrado foi igual a 1,2 segundos.

Devido à complexidade que cerca este parâmetro, e que já foi mencionada anteriormente, sugerimos que seja adotado este valor de 1,2 s como o valor-padrão para os casos em que for possível descontar o tempo de invasão. A favor da segurança, acreditamos não ser recomendável utilizar o valor

correspondente a 85%, mesmo tendo deparado, na bibliografia, com algumas indicações neste sentido.

Limite inferior do intervalo de amarelo

Existem algumas situações especiais que exigem intervalos de amarelo bastante pequenos. Isso ocorre, por exemplo, em rampas ascendentes de vias de baixa velocidade.

Recomendamos veementemente que não sejam programados valores inferiores a 3 segundos. Como o tempo de ação e reação, sozinho, já solicita 1,2 segundos, a dúvida seria se poderíamos escolher o valor de 2 segundos para o amarelo. Este valor garante somente 0,8 s para a tarefa de desaceleração, o que não permite praticamente nenhuma margem de segurança.

Determinação do tempo de *amarelo* para algumas situações-tipo

Vamos desenvolver a aplicação do método para algumas situações que ocorrem freqüentemente a fim de que o leitor possa ter noção dos tempos de *amarelo* a que se chega nas aplicações práticas.

Tomemos o exemplo de uma via arterial, sem regulamentação específica de velocidade. Neste caso, a velocidade máxima é igual a 60 km/h (16,7 m/s), pelo Código de Trânsito Brasileiro. A aproximação do semáforo dá-se num trecho plano.

O tempo de *amarelo*, calculado pela equação (5) será:

$$t_{am} = 1,2 + \frac{16,7}{2 * (3,1 - 9,8 * 0)}$$

$t_{am} = 3,9$ s, que será arredondado para 4 segundos.

É importante ressaltar que encontramos muitas vias por aí com características arteriais que recebem tempos de amarelo de apenas 3 segundos!

Vamos aplicar, agora, a equação (5) para uma via do tipo coletora, onde v é igual a 40 km/h (11,1 m/s) e a aproxima-se do semáforo numa rampa ascendente com inclinação igual a 5% .

$$t_{am} = 1,2 + \frac{11,1}{2 * (3,1 + 9,8 * 0,05)}$$

$t_{am} = 2,7$ s. Tanto por causa do arredondamento como para respeitar o limite inferior de amarelo, será programado o valor de 3 segundos.

Para finalizar vamos ver o que acontece numa via em que considerarmos a velocidade máxima igual a 80 km/h (22,2 m/s) e que se aproxima do semáforo numa rampa descendente de 10%.

$$t_{am} = 1,2 + \frac{22,2}{2 * (3,1 - 9,8 * 0,1)}$$

$$t_{am} = 6,4 \text{ s}$$

Vamos calcular para qual desaceleração corresponde o arredondamento inferior de 6 segundos.

$$6 = 1,2 + \frac{22,2}{2 * (x - 9,8 * 0,1)}$$

O resultado é $x = 3,3 \text{ m/s}^2$, inferior a $3,4 \text{ m/s}^2$, o que nos permite aceitar o valor de 6 segundos.

Determinação do tempo de *vermelho de limpeza* para algumas situações práticas

No caso do *vermelho de limpeza*, não se pode falar propriamente em situações-tipo, como no cálculo do tempo de *amarelo*, porque a largura da via transversal não obedece a padrões fixos. Mesmo assim, vamos desenvolver a aplicação do método para alguns valores de largura em torno dos quais devemos encontrar os casos reais a fim de que possamos ter uma noção da ordem de grandeza do *vermelho decorrente*.

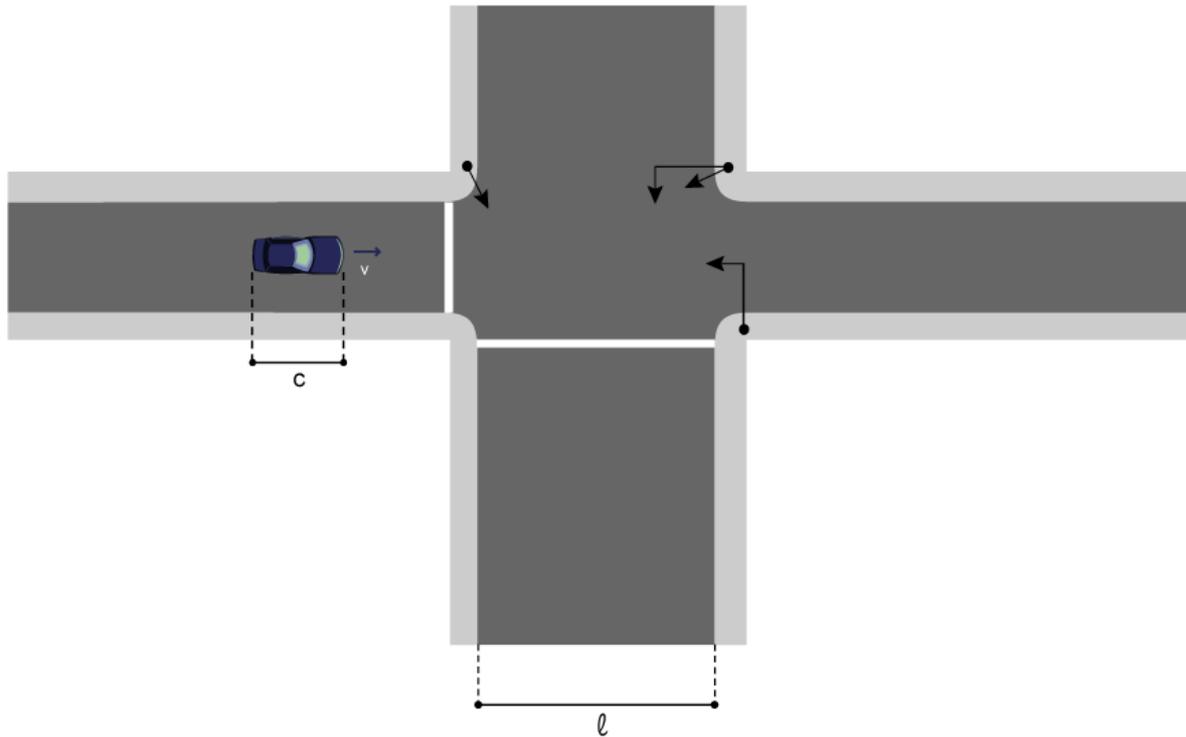


figura 7

Imaginemos, primeiro, o exemplo de uma via do tipo coletora ($v = 11,1$ m/s) que cruza com uma transversal de 18,0 metros de largura. Adotamos $c = 5,0$ m e $t_{in} = 1,2$ s.

O tempo de *vermelho de limpeza*, a ser recebido pelo veículo A, será calculado pela expressão (5):

$$t_{vl} = \frac{18,0 + 5,0}{11,1} - 1,2$$

$$t_{vl} = 0,9 \text{ s} \rightarrow t_{vl} = 1,0 \text{ s}$$

Vamos pensar, agora, numa rua com características de via local ($v = 8,3$ m/s) que cruza com uma avenida de duas pistas separadas por canteiro central, cuja largura é igual a 30,0 metros. Continuamos considerando $c = 5,0$ m e $t_{in} = 1,2$ s.

$$t_{vl} = \frac{30,0 + 5,0}{8,3} - 1,2$$

$$t_{vl} = 3,0 \text{ s}$$

Resultados obtidos em algumas aplicações práticas em São Paulo

O primeiro acompanhamento que foi feito sobre o tema ocorreu em 1982, no cruzamento R. da Consolação x R. Caio Prado, onde não existia *vermelho de limpeza* e foi programado um intervalo de dois segundos após o *amarelo* para a rua Caio Prado. A consequência foi contrastante. Nos seis meses anteriores à intervenção tinham ocorrido 14 colisões com vítima e 10 atropelamentos. Nos seis meses posteriores, estes números caíram para 9 colisões com vítima e 4 atropelamentos. Ou seja, obtivemos uma redução de 36% nas colisões e 60% nos atropelamentos! Aliás, este resultado tão expressivo foi a principal motivação para o desenvolvimento do trabalho de estudo dos enteverdes em São Paulo e que é aqui apresentado.

A partir daí a metodologia foi sendo aplicada por alguns técnicos em seus trabalhos rotineiros, porém não de uma forma sistematizada.

A grande oportunidade para disseminar a maior atenção ao dimensionamento do enteverdes veio com a implantação do Projeto CTA - Controle de Semáforos em Tempo Real. Durante o ano de 1997, foram reprogramados 133 semáforos da área central, utilizando a metodologia aqui apontada. Em fevereiro de 1999, elaborou-se estudo comparativo de acidentes entre as situações “antes” e “depois” destes cruzamentos com o propósito de analisar o efeito das medidas tomadas.

A situação “antes” foi representada pelo período compreendido entre janeiro/1994 até maio/1996 enquanto que a situação “depois” foi retratada pelo ano de 1997. Apesar de ter ocorrido forte diminuição no número de colisões sem vítimas, decidiu-se não incluir este tipo de dado no estudo, pois se trata de indicador não confiável em estudos desta natureza. Os parâmetros analisados foram as colisões com vítimas e os atropelamentos.

A fim de evitar que o efeito de outras medidas contemporâneas - principalmente a entrada em vigor do novo Código Brasileiro de Trânsito que reduziu significativamente a incidência de acidentes - levasse a conclusões

equivocadas, tomou-se o cuidado de normalizar os dados correspondentes à situação “depois”, adotando-se como base de referência para este procedimento os números totais de acidentes que ocorreram na cidade por ocasião dos dois períodos envolvidos, antes e depois da implantação de referido código. Assim, tomado este cuidado, pode-se aceitar que os resultados obtidos foram, exclusivamente, resultado do impacto da nova programação semafórica. Deve-se atentar, porém, para o fato de que a principal novidade do Projeto CTA foi a implementação do controle em tempo real, onde os tempos dos estágios vão se adaptando continuamente às necessidades do trânsito. Assim, é impossível identificar qual parcela das melhorias obtidas no item segurança provêm de uma programação de tempos de ciclo, de defasagens e de estágios mais ajustada à realidade e qual parcela pode ser atribuída ao maior cuidado com o entreverdes. De qualquer forma, os resultados foram tão importantes que não podem deixar de ser citados neste trabalho. Vamos a eles.

Colisões com vítima:

Quantidade na situação “antes”: 210 colisões/ano

Quantidade da situação “antes” projetada para a situação “depois”, considerando apenas o novo código: 200 colisões/ano

Quantidade que efetivamente ocorreu após a implantação do Projeto CTA: 162 colisões/ano

Porcentagem de redução de acidentes: $(162 - 200) / 200 = -19\%$

Atropelamentos:

Quantidade na situação “antes”: 141 atropelamentos/ano

Quantidade da situação “antes” projetada para a situação “depois”, considerando apenas o novo código: 125 atropelamentos/ano

Quantidade que efetivamente ocorreu após a implantação do Projeto CTA: 70 atropelamentos/ano

Porcentagem de redução de atropelamentos: $(70 - 125) / 125 = -44\%$

Os elevados índices de redução constatados (19% para as colisões com vítimas e 44% para os atropelamentos) indicam, claramente, que existiu uma relação estatisticamente significativa entre a implementação do projeto e a melhoria das condições de segurança. Como dissemos antes, é impossível separar a influência do controle em tempo real e do redimensionamento dos entreverdes no resultado final. Acreditamos que os dois elementos contribuíram para

diminuir o número de acidentes. Tempos de estágio mais adequados reduzem o problema do desrespeito à sinalização e, conseqüentemente, tornam mais seguro o cruzamento. Entretanto, os elementos que são os responsáveis diretos pela segurança do trânsito num semáforo são os componentes do entreverdes e, portanto, parece correto afirmar que sua determinação mais acurada foi o principal fator contribuinte.

O intervalo amarelo + vermelho

Em vários países, dentre os quais temos o Reino Unido, Hong Kong, China Central, Paquistão, Alemanha, Polônia, Dinamarca, Groelândia e Israel, a seqüência de cores inclui um intervalo em que os focos amarelo e vermelho ficam acesos simultaneamente antes da indicação verde surgir. É importante ressaltar que os veículos que estão perdendo o direito de passagem já estão no vermelho quando seus movimentos conflitantes recebem a sinalização amarelo+vermelho. Um dos objetivos dessa solução é chamar a atenção dos motoristas que estão no vermelho para a iminente abertura, dando tempo para que se preparem para partir. Porém, o objetivo mais importante é assegurar um intervalo de segurança entre o final de verde para certo movimento e a abertura do verde para seus movimentos conflitantes, a exemplo do que fazemos, aqui no Brasil, com o vermelho de limpeza. No Reino Unido, o intervalo com amarelo+vermelho deve ser programado sempre entre o vermelho e o verde e sua duração é padronizada em dois segundos. Aliás, o Reino Unido também impõe o valor mínimo de três segundos para o intervalo de amarelo.

Há muitos anos, no Brasil, também era aplicada a idéia de avisar os veículos parados de que seu verde estava para surgir. Entretanto, a forma de viabilizar essa idéia apresentava dois grandes erros, o que acabou gerando um grande número de acidentes. O primeiro erro é que em vez de usar uma indicação específica, como o amarelo+vermelho, por exemplo, mostrava-se simplesmente o foco amarelo. A conseqüência é que o motorista que chegava ao semáforo naquele intervalo não sabia se o amarelo que estava vendo era o amarelo antes do verde ou o amarelo depois do verde. O segundo erro, mais grave ainda, é que os veículos que estavam perdendo direito de passagem ainda estavam no amarelo durante este intervalo. Dessa forma, havia um intervalo durante o qual todos os veículos do cruzamento recebiam amarelo, tanto os que perdiam o direito de passagem como os que estavam para ganhá-lo. Evidentemente, o número de acidentes causado por esse tipo de programação foi enorme e a solução foi abandonada.

Uma pequena discussão final

As expressivas melhorias obtidas em termos de acidentes em São Paulo nos animam a convocar nossos colegas de todo o Brasil para um trabalho de verificação dos tempos de entreverdes dos semáforos de suas cidades.

A metodologia é simples, o custo é praticamente nulo e o esforço necessário em termos de homens-hora é também bastante reduzido.

A dificuldade que pode surgir em algumas situações específicas é a do levantamento dos parâmetros necessários. Talvez seja inviável para alguns Departamentos de Trânsito estipular valores de velocidade, desaceleração máxima, etc. quando as características da via estudada se afastarem muito da situação média considerada no presente estudo. Entretanto, mesmo nessas dificuldades, a adoção do método com parâmetros estimados pelo técnico será preferível à inação.

Não se deve esquecer, também, que o melhor jeito de cuidar do trânsito é a vistoria direta. Independentemente dos cálculos teóricos, a simples observação dos veículos que passam no fim do estágio pode indicar, claramente, se alguma intervenção tem de ser providenciada. Podemos seguir duas regras simples: caso se verificar uma porcentagem significativa de veículos que atravessam a retenção já no vermelho, faz-se necessário aumentar o *amarelo*; caso se verificar uma porcentagem significativa de veículos que ainda se encontram na área do cruzamento quando ela começa a ser invadida pelos veículos da transversal, faz-se necessário aumentar o *vermelho de limpeza*.

Vale a pena, também, colocar algumas palavras sobre o aspecto fluidez. Já nos deparamos, em alguns meios, com a opinião de que aumentar o período de entreverdes significa prejudicar a fluidez por causa do aumento do “tempo morto” do semáforo. Tal argumento não é válido porque o “tempo morto” não é uma simples repetição do tempo de entreverdes. O “tempo morto”, no fundo, é a parcela do ciclo que não consegue ser aproveitada pelos veículos quando da troca de estágios e depende da necessidade de segurança que o cruzamento efetivamente demanda. Em palavras mais simples: não adianta deixar verde para um veículo enquanto a área do cruzamento está ocupada por um veículo conflitante. Entretanto, o cerne da questão é que, mesmo se o

argumento tivesse consistência, nunca poderíamos sacrificar o fator segurança em prol da melhoria da fluidez.

Outro mito que é necessário desfazer é que *amarelos* muito superiores a três segundos passam a ser interpretados pelos motoristas como um simples prolongamento do verde e perdem sua eficácia como aviso de que é necessário frear imediatamente. Na seção “As funções do *amarelo* e do *vermelho de limpeza*” levantamos a preocupação de que tempos de *amarelo* maiores do que o necessário acarretam a perda da credibilidade da sinalização. Porém se as condições específicas de uma determinada via solicitam um intervalo de *amarelo* de, por exemplo, seis segundos, não há porque se preocupar com perda de credibilidade simplesmente por ser muito longo, pois os motoristas “sentem” que o tempo programado é adequado e precisa ser respeitado.

Julgamos importante ressaltar, também, que a metodologia proposta inclui, intrinsecamente, boa dose de margem de segurança. Ela considera que os veículos que resolvem não frear quando recebem o sinal amarelo permanecem com a mesma velocidade com que estavam se aproximando. Entretanto, nesses casos, é prática generalizada acelerar para não ser colhido por um veículo da transversal; agindo assim, minimizam a necessidade do *vermelho de limpeza*. Outro ponto a favor da segurança, e que é mais importante ainda, é que estamos assumindo a desaceleração máxima de $3,1 \text{ m/s}^2$, atentando principalmente para o conforto do motorista. Mas se for necessário, em situações de risco, é possível frear a taxas ainda maiores do que o dobro deste valor, reduzindo sobremaneira o comprimento exigido do *amarelo*.

Esperamos que este trabalho possa ajudar nossos colegas a enfrentar melhor a questão da segurança viária nos semáforos. E ficamos aguardando sugestões, discordâncias, resultados de aplicações, etc., para ir incorporando novos conhecimentos a este primeiro esboço.

** Luis Vilanova é especialista em controle e monitoração de trânsito e trabalha atualmente na Gerência de Desenvolvimento Tecnológico da CET/SP.*

Bibliografia

Wohl, M. and Martin, B. (1967) *Traffic System Analysis for Engineers and Planners*

Valdes, A. (1988) *Ingenieria de Trafico*

Vilanova, L.M. (1988) - Nota Técnica 108 - CET SP - *Dimensionamento do tempo de amarelo.*

Green, M. - Transportation Human Factors (2000) - *“How long does it take to stop?” Methodological analysis of driver perception-brake time.*

Site: www.visualexpert.com/Resources/green_transportation_hf.pdf

A Policy on Geometric Design of Highways and Streets (2001) - AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials)

Eccles K.A. and McGee H.W. - Institute of Transportation Engineering (2001) - *A history of the yellow and all-red intervals for traffic signals.*

Site: www.ite.org/library/yellowintervals.pdf

Rouphail N. and Tarko A. and Li J. - Federal Highway Administration and Institute of Transportation Engineering (2002) - *Traffic Flow Theory - A state-of-the-art-report - Chapter 9 “Traffic flow at signalized intersections”*

Site: www.tfhrc.gov/its/tft/chap9.pdf

Federal Highway Administration and Institute of Transportation Engineering (2003) - *Making intersections safer: a toolbox of engineering countermeasures to reduce red-light running.*

Site: safety.fhwa.dot.gov/rlr/rlrreport

Mannering F.L., Kilaresky W.P. e Washburn S.S. (2005) - *Principles of Highway Engineering and Traffic Analysis.*