



# Nota Técnica 276

## Temporização Semafórica para Ciclistas

Ming, Sun H.  
Anselmo, Márcio A.  
Carmo, José Antônio D. P.  
Duarte, Tadeu L.  
Fernandes, Marcelo A. F.  
Lopes, Denise L.  
Nahas, Caio R. F.  
Santos, Alexandre F.  
Souza, Cláudio P. A.  
Tarricone, Nílvio A.  
Toledo, Wilson V.  
Ueta, Paulo S.

Julho de 2022



# 1. INTRODUÇÃO

Na Nota Técnica 268, foi tratada a questão de visibilidade de grupo focal específico para ciclistas. Complementando aquela Nota Técnica, o presente trabalho tem como finalidade trazer elementos técnicos para a elaboração de uma temporização semafórica que atenda às necessidades dos ciclistas, subsidiando o desenvolvimento de um eventual manual de programação semafórica voltada para ciclistas. Nesse sentido, percebe-se que existe uma lacuna muito grande em termos de documentos e manuais técnicos, em português, que tratem especificamente desse assunto.

Apesar da implementação crescente de ciclovias e ciclofaixas, já com uma extensa quilometragem, muitas vezes, por falta de documentos e manuais técnicos em português, eventuais adequações feitas na temporização semafórica não são baseadas em formulações teóricas específicas para o fluxo de bicicletas. Isso pode ser um fato preocupante em termos de segurança, principalmente no que concerne ao entreverdes<sup>1</sup>. A bicicleta possui velocidade e taxa de frenagem muito diferentes das dos veículos motorizados, implicando que os tempos de entreverdes calculados para os veículos motorizados podem não ser adequados para as bicicletas. Assim, é necessário que a programação semafórica considere também as características das bicicletas e não apenas as dos veículos motorizados.

Para a elaboração de uma programação semafórica voltada para bicicletas é necessário conhecer as variáveis e os valores dos parâmetros envolvidos. Para tanto, a Seção 2 do presente trabalho teve como objetivo fazer uma pesquisa na literatura para determinar as variáveis e metodologias envolvidas, bem como os valores típicos de parâmetros como velocidade, taxa de frenagem, tempo de percepção e reação de ciclistas e comprimento da bicicleta. Com base na pesquisa realizada na Seção 2, é apresentada na Seção 3 uma sugestão de metodologia para a elaboração de uma programação semafórica considerando as necessidades e as características de ciclistas. Finalmente, a Seção 4 apresenta as considerações finais do trabalho.

Para evitar entendimentos equivocados de termos ou expressões próximas, para efeitos do presente trabalho definem-se desde já as seguintes expressões:

- Verde de segurança: é o menor tempo atribuído a um grupo semafórico<sup>2</sup> de maneira a minimizar risco ou desconforto aos usuários.
- Verde mínimo: é o parâmetro da programação semafórica que determina o menor tempo de verde que um estágio<sup>3</sup> poderá ter, quando estiver funcionando em modo atuado<sup>4</sup>.
- Duração mínima de verde para ciclista: é o menor tempo de verde que um estágio, em que anda pelo menos um movimento de ciclistas, deve ter para permitir, a partir do repouso, o escoamento de forma segura das bicicletas para fora da área de conflito da interseção antes da abertura de verde do movimento concorrente.

---

<sup>1</sup> Entreverdes é a parte da programação semafórica que compreende o período de transição do direito de passagem. O entreverdes é composto pelos períodos de amarelo e vermelho de limpeza.

O período de amarelo é dimensionado para permitir a parada segura na linha de retenção quando da mudança do sinal para vermelho.

O período de vermelho de limpeza é dimensionado para permitir a saída do veículo da área de conflito da interseção antes que os movimentos concorrentes recebam a indicação verde.

<sup>2</sup> Grupo semafórico é o conjunto de grupos focais, ligados nos mesmos circuitos elétricos do controlador e que, portanto, apresentam sempre indicação luminosa idêntica.

<sup>3</sup> Estágio é a parte do tempo do ciclo semafórico durante o qual não muda a configuração do direito de passagem, acrescido do período de transição do direito de passagem. Estágio também pode ser entendido como conjunto de intervalos luminosos formados por pelo menos um intervalo de verde e pelo período de transição para o próximo estágio.

<sup>4</sup> No modo atuado, a duração dos estágios é decorrente da ativação de detectores veiculares, permitindo extensões de verde até um máximo programado.

O verde de segurança e o verde mínimo são parâmetros configuráveis no controlador.

A “duração mínima de verde para ciclista” não precisa ser necessariamente um parâmetro de controlador. Basta que se tenha o cuidado de não configurar o tempo de verde de estágios (em que anda pelo menos um movimento de ciclistas) menor que a “duração mínima de verde para ciclista”.

## 2. PESQUISA NA LITERATURA

### 2.1. *Traffic Signs Manual – Chapter 6 – Traffic Control (2019)* [1]

O *Traffic Signs Manual*, do Reino Unido, é um Manual composto por 8 volumes (“*Chapters*”), onde o “*Chapter 6*” é o volume que trata de sinalização semafórica. O item 12 desse volume (*Facilities for Pedal Cycle Traffic*) trata de sinalização semafórica para ciclistas.

O item 12.2.2 desse Manual diz que “os estágios devem ter uma duração de verde mínima de 7 s, mas tempos de verde mais longos podem ser necessários onde os fluxos de bicicleta são altos. Os entreverdes para ciclistas são calculados usando a mesma teoria do tráfego geral, mas os valores de aceleração e velocidade dos ciclistas implicam que esses entreverdes podem ser alguns segundos mais longos. As velocidades dos ciclistas e sua capacidade de se mover também são muito afetadas pelos greides das vias. Extensões de verde podem ser acionadas por detecção quando necessário”.

A Tabela 1 a seguir reproduz a Tabela 12.1 desse Manual (Página 80, *Table 12-1 Design parameters for cyclists*), com os parâmetros de projeto para ciclistas:

**Tabela 1 – Parâmetros de projeto para ciclistas**  
(*Table 12.1 – Design Parameters for Cyclists*)

Parâmetro	Valor	Notas
Aceleração	0,5 m/s <sup>2</sup>	< 3% aclave
	0,4 m/s <sup>2</sup>	≥ 3% aclave
Velocidade de projeto	20 km/h	< 3% aclave
	15 km/h	≥ 3% aclave
Comprimento da bicicleta <sup>5</sup>	2,8 m	Esse comprimento engloba uma larga faixa de diferentes tipos de bicicleta, garantindo que a programação atenda a todos os ciclistas.

O item 12.2.3 do Manual informa que os valores da Tabela 1 (Tabela 12.1 do Manual) foram usados para o cálculo dos tempos de entreverdes, mostrados na Tabela 2 (Tabela 12.2 do Manual). Entretanto, na Tabela 1 constam os valores de aceleração, mas não os valores das taxas de frenagem. Até onde se sabe, o cálculo do tempo de amarelo é feito com base em taxas de frenagem (desaceleração) e não com base em aceleração. Além disso, o Manual também não esclarece qual é o valor do tempo de percepção e reação do ciclista adotado nos cálculos.

No item 12.2.4 pode-se ler que “a duração mínima de um estágio (tempo de verde mais tempo de transição de estágio) deve ser suficiente para permitir que um ciclista, iniciando o movimento a partir do repouso, saia da área de conflito da interseção”.

<sup>5</sup> O Manual cita um comprimento de bicicleta de 2,8 m, englobando uma larga faixa de diferentes tipos de bicicletas (eventualmente, adotando aquela de maior comprimento, para atender um número maior de ciclistas). Apenas para efeitos de comparação, os Manuais da AASHTO – *Guide for the Development of Bicycle Facilities* (2012) [2] e do OTM – *Bicycle Traffic Signals – Ontario Traffic Manual – Book 12A* (2018) [4] usam um comprimento de uma bicicleta típica de 1,8 m (e não aquela de maior comprimento). Uma provável razão para a escolha da bicicleta de 2,8 m (e não o comprimento de uma bicicleta típica) é o fato de que os cálculos levam em conta que a largura da interseção é (AB – BC) conforme a Figura 1. Assim, acredita-se que a adoção de um comprimento maior da bicicleta seja por motivo de segurança.

No item 12.2.5, encontra-se o seguinte texto: “ciclistas que cruzam a linha de retenção no último segundo do amarelo podem mover-se mais lentamente que os veículos motorizados e apresentam um risco potencial de conflito com os veículos que andam no estágio que vai ganhar o direito de passagem”.

Isso é particularmente verdadeiro quando a aproximação for em aclave, exigindo que o tempo de vermelho de limpeza seja maior por causa dos ciclistas.

No item 12.2.6, o Manual esclarece que, “para o cálculo da duração mínima do verde do estágio, a distância até o ponto de conflito deverá ser medida até o ponto mais distante da interseção”.

O Manual não fornece elementos para o cálculo da duração mínima de um estágio em que anda um movimento de ciclistas.

A Figura 1 reproduz a Figura 12.1 do Manual que mostra a diferença de distância do ponto de conflito “B” da aproximação que vai perder o direito de passagem AB e da aproximação que vai ganhar o direito de passagem BC. A Figura 1 mostra a “mão inglesa”, padrão do Reino Unido.

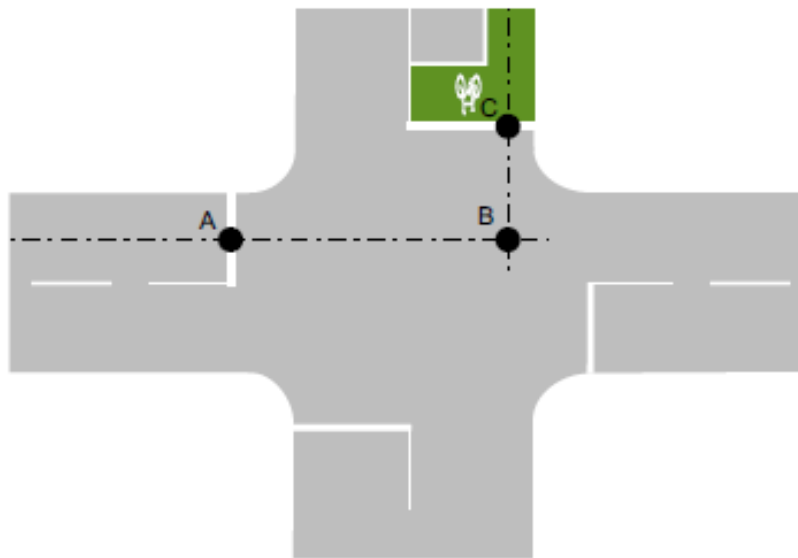


Figura 1 – Diagrama que ilustra as distâncias até o ponto de conflito B  
(Figure 12-1 Diagram illustrating distances to potential conflict point)

O Manual não fornece expressões para o cálculo de entreverdes, limitando-se a dizer que o entreverdes para ciclistas pode ser calculado usando a mesma teoria utilizada para o tráfego geral, sendo que a Tabela 2 mostra os valores já calculados.

**Tabela 2 – Cálculo de entreverdes para ciclistas**  
(adaptado de *Table 12-2 – Calculation of intergreen timings to accommodate cyclists*)

Diferença na distância até o ponto de conflito da aproximação que vai perder o direito de passagem e da aproximação que vai ganhar o direito de passagem AB – BC (Figura 1) (*)	Tempos de entreverdes para:	
	Aclive de 3% de greide ou mais	Aproximação plana ou aclive de menos de 3% de greide
1 – 3	5	5
4	6	5
5 – 9	6	6
10 – 14	8	7
15	8	8
16 – 18	9	8
19 – 21	10	9
22 – 23	11	9
24 – 27	11	10
28 – 33	13	11
34 – 36	14	12

(\*) Diferença na distância até o ponto de conflito entre a aproximação que vai perder o direito de passagem e a aproximação que vai ganhar o direito de passagem (AB menos BC na Figura 1).

Na Tabela 2 não estão indicadas as unidades, mas depreende-se que na primeira coluna, a distância (AB – BC) esteja em metros e que as segunda e terceira colunas indicam os tempos de entreverdes em segundos.

O Manual não faz o cálculo do tempo de amarelo e do vermelho de limpeza de forma individualizada. Depreende-se, assim, que os valores mostrados na Tabela 2 se referem à soma “amarelo + vermelho de limpeza”.

## 2.2. AASHTO. *Guide for the Development of Bicycle Facilities* (2012) [2]

Com relação a características das bicicletas/ciclistas, o Guia da AASHTO fornece a seguinte tabela de valores (Página 54, *Table 3-2 – Key Performance Criteria*, para um ciclista adulto típico):

**Tabela 3 – Valores características de bicicleta/ciclista**

Parâmetro	Valor
<b>Velocidade (pavimento plano)</b>	13 – 24 km/h
<b>Velocidade (declive)</b>	32 – 50 km/h
<b>Velocidade (aclive)</b>	8 – 19 km/h
<b>Tempo de percepção e reação</b>	1,0 – 2,5 s
<b>Aceleração</b>	0,5 – 1,5 m/s <sup>2</sup>
<b>Coefficiente de atrito (pavimento seco)<sup>6</sup></b>	0,32
<b>Desaceleração (pavimento seco)</b>	4,8 m/s <sup>2</sup>
<b>Desaceleração (pavimento molhado, 50 a 80% de redução de eficiência)</b>	2,4 – 3,0 m/s <sup>2</sup>

<sup>6</sup> Na Página 145, o Guia menciona que o coeficiente de atrito para uma bicicleta típica é 0,32 para pavimento seco, enquanto a Tabela 5-4 do Guia (*Minimum Stopping Sight Distance*) fornece o valor de 0,16 para o coeficiente de atrito para pavimento molhado.

Este Guia informa que os parâmetros de programação semafórica que precisam ser modificados para atender os ciclistas são: duração mínima de verde, vermelho de limpeza e extensão de verde.

- A duração mínima de verde tem o objetivo de permitir que o ciclista saia da área de conflito da interseção partindo de uma posição de repouso desde a linha de retenção.
- O período de vermelho de limpeza tem o objetivo de permitir que o ciclista que cruzou a linha de retenção no último segundo de amarelo possa sair da área de conflito da interseção antes do início do direito de passagem dos movimentos conflitantes.
- Extensão de verde para ciclista é o tempo de verde que precisa ser estendido para que uma bicicleta detectada possa sair da área de conflito da interseção antes da abertura de verde para os movimentos conflitantes.

O parâmetro “extensão de verde para ciclista”, aqui definido, tem conceituação diferente de extensão de verde do modo atuado:

- Extensão de verde para ciclista é o tempo necessário para que a bicicleta detectada saia da área de conflito da interseção antes da abertura de verde para os movimentos conflitantes.
- Extensão de verde no modo atuado é dimensionada em função de *gaps*<sup>7</sup> entre os veículos motorizados.

Obviamente, o uso do parâmetro “extensão de verde para ciclista”, conforme definido nesse guia da AASHTO, implica na instalação de sensores ou detectores para bicicletas.

O Guia esclarece que o intervalo de amarelo é baseado na velocidade de aproximação de veículos motorizados e é geralmente entre 3 a 6 segundos. De forma geral, o tempo de amarelo calculado para os veículos motorizados aplicando as fórmulas usuais também é adequado para ciclistas.

A determinação dos valores para as variáveis envolvidas leva em consideração as seguintes situações:

- Ciclista parado na linha de retenção aguardando abertura do verde
- Ciclista em movimento de aproximação

#### **Ciclista parado na linha de retenção aguardando abertura do verde**

Quando uma aproximação recebe a indicação verde, um ciclista parado na linha de retenção precisa de tempo suficiente para perceber e reagir, acelerar a partir do repouso e sair da interseção antes que os veículos da via transversal recebam a indicação verde. Esse tempo é denominado “tempo de travessia do ciclista a partir do repouso” (*Standing Bicycle Crossing Time*), aqui representado por  $BCT_{standing}$ , e é usado para determinar a duração mínima de verde para ciclista, aqui indicado como *BMG* (*Bicycle Minimum Green*).

A expressão para o cálculo de  $BCT_{standing}$  é:

$$BCT_{standing} = PRT + \frac{v}{2a} + \frac{W+L}{v} \quad (1)$$

Onde:

$PRT$  = tempo de percepção e reação do ciclista, em segundos

$v$  = velocidade de travessia do ciclista, em m/s

$a$  = aceleração do ciclista, em m/s<sup>2</sup>

$W$  = largura da interseção, em metros

$L$  = comprimento da bicicleta, em metros

<sup>7</sup> *Gap* é o intervalo de tempo entre a passagem, por uma determinada seção transversal da via, do para-choque traseiro de um veículo e o para-choque dianteiro do veículo subsequente, independentemente de utilizarem ou não a mesma faixa de rolamento.

Fonte: <http://www.sinaldetransito.com.br/glossario.php?ID=336>.



O tempo gasto para o ciclista sair do repouso até atingir a velocidade  $v$  é  $v/a$ . Nesse tempo, o ciclista percorreu uma distância igual a  $v^2/2a$ . A distância restante para sair da área de conflito da interseção é  $(W - v^2/2a) + L$ . Logo, o tempo total que o ciclista vai levar para sair da área de conflito da interseção, partindo do repouso, é:

$$BCT_{standing} = PRT + \frac{v}{a} + \frac{(W - v^2/2a) + L}{v}$$

resultando na Expressão (1).

Deve-se observar que o  $BCT_{standing}$  não é o tempo de verde. É apenas o tempo necessário para que o ciclista, partindo do repouso, saia da interseção. Para isso, é possível usar o tempo de amarelo e do vermelho de limpeza após o término do verde.

A duração mínima de verde para ciclista,  $BMG$ , pode ser, então, dada pela expressão:

$$BMG = BCT_{standing} - Y - R_{clear} \quad (2)$$

Onde

$Y$  = tempo de amarelo, em segundos

$R_{clear}$  = tempo de vermelho de limpeza, em segundos

Considerando a Expressão (1), a Expressão (2) pode ser reescrita como:

$$BMG = \left( PRT + \frac{v}{2a} + \frac{W+L}{v} \right) - Y - R_{clear} \quad (3)$$

A Tabela 4 mostra os valores típicos adotados (Páginas 106 e 107, Table 4-2 – Standing Bicycle Crossing Time e Table 4-3 – Bicycle Minimum Green Time Using Standing Bicycle Crossing Time).

**Tabela 4 – Valores típicos adotados para o cálculo de  $BCT_{standing}$**

Parâmetro	Valor
<b><math>PRT</math></b>	1 s
<b><math>v</math></b>	4,5 m/s (16 km/h)
<b><math>L</math></b>	1,8 m (*)
<b><math>a</math></b>	0,5 m/s <sup>2</sup>

(\*) Comprimento de uma bicicleta típica

### Ciclista em movimento de aproximação

O “tempo de travessia com a bicicleta em movimento de aproximação” (*Rolling Bicycle Crossing Time*), aqui indicado como  $BCT_{rolling}$ , é usado para determinar o valor adequado do tempo de vermelho de limpeza e do valor da extensão de verde, se disponível.

Na estimativa do valor do  $BCT_{rolling}$  no final de uma indicação verde, devem ser consideradas a distância de frenagem  $BD$  (*Braking Distance*) e a largura da interseção.



As expressões envolvidas são mostradas a seguir.

$$BCT_{rolling} = \frac{BD+W+L}{v} \quad (4)$$

$$BD = PRT \times v + \frac{v^2}{2a} \quad (5)$$

Ou

$$BCT_{rolling} = PRT + \frac{v}{2a} + \frac{W+L}{v} \quad (6)$$

Onde:

$BD$  = distância de frenagem (Braking Distance)

$W$  = largura da interseção, em metros

$L$  = comprimento da bicicleta, em metros

$v$  = velocidade de aproximação da bicicleta, em m/s

$PRT$  = tempo de percepção e reação do ciclista, em segundos

$a$  = desaceleração da bicicleta, em  $m/s^2$

A Tabela 5 mostra os valores sugeridos (Página 108, *Table 4-4 – Rolling Bicycle Crossing Time Considering Breaking Distance*).

**Tabela 5 – Valores típicos adotados para o cálculo de  $BCT_{rolling}$**

Parâmetro	Valor
<b><math>PRT</math></b>	1 s
<b><math>v</math></b>	4,5 m/s (16 km/h)
<b><math>L</math></b>	1,8 m (*)
<b><math>a</math> (desaceleração)</b>	1,5 $m/s^2$ (**)

(\*) Comprimento de uma bicicleta típica

(\*\*) Pavimento molhado

Todos os dados apresentados são para aproximações planas. Para as aproximações em aclive ou em declive, os valores têm que ser ajustados conforme as condições locais.

A expressão para determinar o valor do período de vermelho de limpeza,  $R_{clear}$ , é:

$$Y + R_{clear} + T_{extension} \geq BCT_{rolling} \quad (7)$$

Ou:

$$R_{clear} \geq BCT_{rolling} - Y - T_{extension} \quad (8)$$

Onde:

$Y$  = tempo de amarelo, em segundos

$R_{clear}$  = tempo de vermelho de limpeza, em segundos

$T_{extension}$  = tempo de extensão de verde para ciclista, em segundos

No tópico referente à distância de visibilidade de parada (*Stopping Sight Distance*), o Guia da AASHTO (2012) [2] sugere o valor de 2,5 s para o tempo de percepção e reação, enquanto nas Tabelas 4 e 5 é sugerido o valor de 1 segundo para o  $PRT$  (tempo de percepção e reação quando da mudança do sinal para a indicação verde e tempo de percepção e reação para o cálculo de  $BCT_{standing}$  para a situação da mudança do sinal para amarelo, respectivamente). Essa distinção de

valores para o *PRT* pode ser devida ao fato de que na distância de visibilidade de parada é considerada a visibilidade de um obstáculo inesperado na pista, podendo exigir um tempo maior para o ciclista perceber e entender a situação.

Nos critérios de performance, Tabela 3 (*Table 3-2. Key Performance Criteria*), o Guia menciona uma faixa de valores de 2,4 a 3,0 m/s<sup>2</sup> (50 – 80% de redução de eficiência) para a desaceleração em pavimento molhado.

### 2.3. *Urban Bikeway Design Guide. National Association of City Transportation Officials* – NACTO (2011) [3]

Esse Guia da NACTO esclarece que não há atualmente um padrão nacional para a determinação de temporização semafórica para ciclistas. Entretanto, os parâmetros fundamentais para uma programação semafórica apropriada são a velocidade do ciclista e a largura da interseção. A seguir, estão as diretrizes gerais para a configuração semafórica, devendo, sempre que necessário, ser ajustadas para as condições locais.

No mínimo, deve ser considerada uma velocidade do ciclista de 15 percentil (isto é, uma velocidade que atenda 85% dos ciclistas) para o dimensionamento do tempo necessário para sair da área de conflito da interseção. Isso é consistente com a diretriz do MUTCD (*Manual on Uniform Traffic Control Devices*) para a travessia de pedestres.

A velocidade dos ciclistas deve ser medida em campo (para determinar a velocidade 15 percentil). Entretanto, em aproximações planas pode ser considerada uma velocidade de 15,3 km/h (9,5 mph) como um valor *default* na ausência de dados.

Uma pesquisa<sup>8</sup> que coletou dados em 15 locais nos Estados Unidos concluiu que a velocidade dos ciclistas 15 percentil é de aproximadamente 15,1 km/h (9,4 mph).

A largura da interseção *W* deve ser calculada da entrada da interseção (i.e., da linha de retenção ou da faixa de pedestres na ausência de uma linha de retenção) até o centro da última faixa de tráfego da via transversal.

O tempo total para o ciclista sair da interseção (*Total Clearance Interval*),  $C_i$ , pode ser calculado pela expressão:

$$C_i = 3 + \frac{W}{V} \quad (9)$$

Onde:

*W* = largura da interseção, calculada da linha de retenção ou da faixa de pedestres (na ausência de uma linha de retenção) até o centro da última faixa de tráfego da via transversal, em metros.

*V* = velocidade de aproximação do ciclista, em m/s.

O Guia da NACTO não explica o significado do número “3” na Expressão (9).

O Guia menciona que: “o tempo de amarelo dimensionado para veículos motorizados é tipicamente mais curto que aquele necessário para bicicletas por que a velocidade dos ciclistas é menor. O período de entreverdes para bicicletas pode ser parcialmente atendido tanto por meio do período de amarelo para veículos como por meio de um período de vermelho de limpeza”.

Esse texto do Guia da NACTO parece ser contraditório, pois, como o tempo de amarelo dos veículos pode ser mais curto do que o necessário para os ciclistas se a velocidade dos ciclistas é menor? Se a velocidade dos ciclistas é menor que a dos veículos, os ciclistas precisariam de um período de amarelo menor e não o contrário<sup>9</sup>. Em termos de segurança, o tempo de amarelo é mais crítico para veículos motorizados do que para bicicletas. Por isso, esse tempo não pode ser ajustado para ciclistas sob pena de comprometer a segurança dos veículos motorizados.

<sup>8</sup> Fonte: *Federal Highway Administration*. (2006). *Shared Use Path Level of Service Calculator*. Publication: FHWA-HRT-05-138.

<sup>9</sup> O período de amarelo é dimensionado em função da distância de parada (*braking distance*). Quanto maior a velocidade, maior é a distância de parada.

O Guia ainda esclarece que as diretrizes recomendadas devem ser complementadas por meio de estudos de engenharia específicos, uma vez que, em algumas interseções mais largas, a aplicação dos critérios pode resultar em vermelhos de limpeza extremamente longos.

#### 2.4. OTM – *Bicycle Traffic Signals* – *Ontario Traffic Manual* – *Book 12A (2018)* [4]

Este volume do Manual canadense, de 70 páginas, é destinado exclusivamente à sinalização semafórica para ciclistas.

Segundo o item 3.1 desse Manual, a temporização semafórica para bicicletas deve se ajustar à temporização do semáforo para veículos e pedestres. A maioria dos aspectos da temporização semafórica padrão não é afetada por causa dos ciclistas, mas, quando necessário, há duas mudanças potenciais que devem ser implementadas especificamente para bicicletas. São elas: o intervalo de verde mínimo e os entreverdes.

No item 3.2 desse Manual, pode-se ler que, “para realizar algumas das avaliações recomendadas, são necessárias informações atualizadas sobre os volumes e os movimentos de ciclistas. Se possível, devem estar disponíveis contagens regulares de movimentos de conversão. Se essas contagens não estiverem disponíveis, então contagens especiais podem ter que ser realizadas para avaliar adequadamente as condições da interseção”.

Ainda no item 3.2, “além disso, a análise de acidentes pode indicar problemas específicos que eventualmente podem ser minimizados por meio do uso de temporização específica para bicicleta”.

O item 3.3 do Manual de Ontario diz que “a escolha dos parâmetros operacionais dos semáforos para bicicletas depende da maneira como os movimentos de ciclistas interagem com o tráfego de uso geral em cruzamentos semaforizados. Uma série de situações diferentes são tipicamente encontradas, as quais podem sugerir mudanças ou tratamentos especiais envolvendo a temporização do semáforo, dos grupos focais e/ou da configuração dos grupos semafóricos”.

A sinalização semafórica é tratada em 5 situações:

- (a) Tráfego misto – pista compartilhada entre veículos motorizados e bicicletas (*shared roadway, includes signed routes*)
- (b) Ciclofaixa (*bicycle lane*) ou ciclovia (*cycle track*)
- (c) Travessia no canteiro para bicicleta ou multiuso (*in-boulevard bicycle or multi-use trail*)
- (d) Ciclofaixa no contrafluxo (*contraflow bicycle facility*)
- (e) Travessia de meio de quadra para bicicleta ou multiuso (*mid-block bicycle or multi-use trail*)

A Tabela 1 do Manual, reproduzida a seguir como Tabela 6, resume as possíveis intervenções de acordo com o tipo de situação.

**Tabela 6 – Possíveis intervenções de acordo com o tipo de situação.**

**Table 1 – Possible signal timing or signal phasing impacts/changes for various types of cycling facilities**

Situação	Temporização		Grupo focal		Grupo semafórico	
	Veículos	Bicicleta	Veículo	Bicicleta	Existente	Bicicleta
(a)	✓	---	✓	---	---	---
(b)	✓	✓	✓	✓	✓	✓
(c)	✓	✓	---	✓	✓	✓
(d)	✓	✓	---	✓	✓	✓
(e)	---	✓	---	✓	---	✓

O item 3.3.1 do Manual trata do tráfego misto. “A configuração mais básica é o compartilhamento entre o tráfego de bicicletas e o tráfego de veículos motorizados, sem nenhuma instalação específica para bicicletas. Nesta situação, os ciclistas deverão seguir a sinalização semafórica como os demais veículos. Não são instalados grupos focais específicos para ciclistas. Se necessário, ajustes devem ser feitos à temporização semafórica, tipicamente a duração mínima de verde e os intervalos de limpeza. Tais ajustes irão afetar o tráfego de veículos motorizados e deverão ser considerados neste contexto.”

O item 3.3.2 do Manual trata da ciclofaixa ou ciclovia. “Quando a ciclofaixa está imediatamente adjacente ao meio-fio, mas operando em um espaço dedicado, uma variedade de opções está disponível nos cruzamentos semaforizados. A condição mais básica é que as bicicletas operem como se compartilhassem as faixas de uso geral, sem alterações na sinalização semafórica ou na temporização. Uma pequena alteração seria a adição de grupos focais específicos para bicicletas, mas operando no mesmo grupo semafórico que o tráfego geral. Tal como acontece com a situação da pista compartilhada, ajustes na temporização podem ser apropriados em algumas situações. As situações mais complexas proporcionariam uma separação parcial ou completa na operação para bicicletas em relação ao tráfego paralelo de veículos e/ou pedestres, por meio do uso de grupos focais específicos para bicicletas.”

O item 3.3.3 do Manual trata de travessia no canteiro para bicicleta ou multiuso. “Quando a ciclovia fica no canteiro, a travessia torna-se parte da interseção e geralmente utiliza o mesmo tempo do semáforo da via paralela. Existem opções que determinam se os ciclistas serão controlados pelos grupos focais de pedestres (apenas desmontados e andando), ou pela adição de grupos focais específicos para bicicletas.”

O item 3.3.4 do Manual trata de ciclofaixa no contrafluxo. “Quando uma ciclofaixa é construída em uma rua de mão única com os ciclistas andando na direção oposta ao tráfego de uso geral, no mínimo, um grupo focal específico para bicicletas é necessário. A necessidade de ajuste da temporização e/ou de grupo semafórico separado para bicicleta é baseada em requisitos geométricos e de segurança.”

O item 3.3.5 do Manual trata de travessia de meio de quadra para bicicleta ou multiuso. “Uma travessia multiuso ou para bicicletas em meio de uma quadra pode exigir o uso de controle semafórico. Para travessias exclusivas para bicicletas, o tráfego de ciclistas será controlado por grupos focais específicos de bicicleta e a temporização será baseada exclusivamente nas necessidades das bicicletas. Para uma travessia multiuso, os pedestres também serão atendidos pela travessia e, juntamente com as indicações separadas para os dois grupos de usuários, os tempos serão os mais longos dos dois com base nas necessidades do grupo de usuários.”

O item 3.4 do Manual diz que: “Há uma ampla gama de fatores que afetam o desempenho e o comportamento do ciclista. Tal como acontece com o tráfego de veículos, as características da interseção, como greide, visibilidade ou velocidade podem ter um impacto na tomada de decisão e no desempenho do ciclista. Assim, se for decidido ajustar os tempos dos semáforos, deve-se aprender o máximo possível sobre a operação específica da interseção antes de implementar as alterações.”

O item 3.5 do Manual trata do tempo de verde mínimo (*Minimum Green Interval*). “Um ciclista em repouso não é capaz de acelerar tão rapidamente quanto um veículo motorizado. Em projetos de temporização semafórica, deve-se prever tempo suficiente no início do intervalo de verde para permitir que as bicicletas acelerem a partir do repouso e cruzem a interseção antes do início do estágio conflitante. Como acontece com a maioria das recomendações neste guia, a justificativa para alterar o tempo do semáforo é baseada em um volume razoavelmente alto de tráfego de bicicletas e/ou uma condição ou situação específica relacionada ao tráfego de ciclistas na interseção que justifique a alteração.

O tempo que um ciclista leva para cruzar uma interseção é baseado em três componentes principais. São eles: o tempo de percepção e reação, que inclui o tempo para reagir à mudança do sinal para verde e começar a pedalar (*PRT*); um período de tempo para acelerar até a velocidade normal de percurso – a aceleração de partida (*ACC*); e o tempo restante

para cruzar a interseção na velocidade normal de percurso – o tempo de limpeza para sair da área de conflito da interseção (*TCLEAR*).

Os primeiros dois componentes podem ser combinados e convertidos em uma constante *SU*.

A duração mínima de verde, mais o período de amarelo e mais o período de vermelho de limpeza deve ser maior ou igual ao tempo total de travessia necessário. A fórmula básica é:

$$G_{min} + Y + R_{clear} \geq SU + TCLEAR \quad (10)$$

Onde:

$G_{min}$  = duração mínima do intervalo de verde, em segundos

$Y$  = duração do intervalo de amarelo, em segundos

$R_{clear}$  = duração do intervalo de vermelho de limpeza, em segundos

$SU$  = tempo de percepção e reação mais o tempo para aceleração a partir do repouso até a velocidade normal de percurso, em segundos (valor sugerido: 6 segundos)

$TCLEAR$  = é o período de tempo necessário para o ciclista completar o resto do percurso até sair da área de conflito da interseção após atingir a velocidade de percurso, em segundos =  $(W + L)/V$ . Este período não cobre a distância percorrida durante a aceleração.

A expressão completa é:

$$G_{min} \geq SU + \frac{W+L}{V} - (Y + R_{clear}) \quad (11)$$

onde:

$V$  = velocidade de percurso do ciclista, em m/s (valores sugeridos: 4.0 m/s a 5.6 m/s ou 14 a 20 km/h)

$W$  = largura da interseção, em metros

$L$  = comprimento da bicicleta, em metros (valor sugerido: 1,8 m)

A Tabela 2 do Manual, aqui reproduzida como Tabela 7, apresenta os valores calculados para a duração mínima do estágio quando há movimento de ciclistas.

Tabela 7 – Duração mínima de estágio  
 Table 2 – Minimum Bicycle Signal Timing

Largura da interseção $W$ (m)	Duração mínima do estágio (s) $(G_{min} + Y + R_{clear})$
12	9,1
15	9,7
20	10,8
25	12,0
30	13,1
35	14,2
40	15,3
45	16,4
50	17,5
55	18,6
$(G_{min} + Y + R_{clear}) \geq SU + (W + L)/V$ Foi assumido $SU = 6$ s; $L = 1,8$ m; $V = 4,5$ m/s.	

O item 3.6 do Manual trata do cálculo dos intervalos de amarelo e do vermelho de limpeza.

As bicicletas têm características de desempenho muito diferentes dos veículos motorizados. As bicicletas apresentam uma velocidade máxima mais baixa e um tempo e distância de parada menores. Por outro lado, se uma bicicleta entrar na interseção um pouco antes ou durante o período de amarelo, a velocidade mais baixa pode significar que o intervalo do vermelho de limpeza seja insuficiente.

No caso de haver um estágio exclusivo para ciclistas, quando todos os veículos motorizados que lhes são conflitantes estão retidos, então devem ser implementados entreverdes específicos para bicicletas.

A expressão para o cálculo do entreverdes para bicicletas é:

$$Y + R_{clear} = \left[ PRT + \frac{V}{2d} \right] + \left[ \frac{W+L}{V} \right] \quad (12)$$

onde:

$PRT$  = tempo de percepção e reação do ciclista, em segundos (valor sugerido: 1 segundo)

$V$  = velocidade de percurso do ciclista, em m/s (valores sugeridos: 4.0 a 5,6 m/s ou 14 a 20 km/h)

$d$  = desaceleração do ciclista, em  $m/s^2$  (valor sugerido:  $3.0 m/s^2$ )

$W$  = largura da interseção, em metros

$L$  = comprimento da Bicicleta, em metros (valor sugerido: 1,8 m)

$$Y = \left[ PRT + \frac{V}{2d} \right] \quad (13)$$

$$R_{clear} = \left[ \frac{W+L}{V} \right] \quad (14)$$

As expressões podem resultar em tempos de amarelo muito curtos e intervalos de vermelho de limpeza muito longos. Esses resultados podem ser usados para estágios específicos para ciclistas. No entanto, em tráfego misto, o amarelo deve permanecer conforme definido para o tráfego de veículos motorizados. O intervalo de vermelho de limpeza para interseções muito estreitas (12 – 15 m) será quase o mesmo que o necessário para bicicletas. Para interseções maiores, se o intervalo de vermelho de limpeza for definido com base na exigência total para o ciclista, a duração desse intervalo pode ser tão longa que os motoristas podem considerar que o semáforo está com defeito. Sugere-se que o intervalo de vermelho de limpeza adicional para fins de bicicleta seja limitado a 1 segundo.

O Apêndice A do Manual recomenda, na ausência de dados de pesquisas no local em questão, a adoção dos seguintes valores:

$PRT$  (para sair do repouso) = 1,0 s

$V$  = 4,0 a 5,6 m/s (14 a 20 km/h)

$a$  = aceleração = 1,0 m/s<sup>2</sup>

$L$  = 1,8 m

$SU$  = 6,0 s

$W$  = largura da interseção, em metros, medida da linha de retenção até a extremidade da faixa de pedestres na esquina posterior ou marca equivalente, se não houver sinalização

$PRT$  (para parar) = 2,5 s

$d$  = desaceleração = 3,0 m/s<sup>2</sup>

O Apêndice A ainda apresenta uma tabela com os valores dos parâmetros de outras fontes.

**Tabela 8 – Valores sugeridos de outras fontes**

Grandeza	Fonte	Valor
$V$	NACTO	15,4 km/h
$W$	NACTO	Da linha de retenção até o centro da faixa mais distante
$V$ , plano	AASHTO (2012)	13 – 24 km/h
$V$ , plano	California	16,1 km/h
$V$	TAC	20 km/h
$V$	CROW	20 km/h
$V$ , declive	AASHTO (2012)	32 – 50 km/h
$V$ , aclave	AASHTO (2012)	8 – 19 km/h
$PRT$	AASHTO (2012)	1,0 – 2,5 s
$PRT$	CROW	1,0 s
Desaceleração, seco	AASHTO (2012)	4,8 m/s <sup>2</sup>
Desaceleração, molhado	AASHTO (2012)	2,4 – 3,0 m/s <sup>2</sup>
Desaceleração	CROW	1,5 m/s <sup>2</sup>
$L$	AASHTO (2012)	1,8 m
$a$	AASHTO (2012)	0,5 – 1,5 m/s <sup>2</sup>
$A$	CROW	0,8 – 1,2 m/s <sup>2</sup>
$SU$	California	6 s
$T_{min}$ (*)	TAC	5 – 15 s

(\*) O Apêndice não esclarece o significado de  $T_{min}$ .



## 2.5. Guidelines for Determining Traffic Signal Change and Clearance Intervals – An ITE Proposed Recommended Practice (2015) [5]

Este Guia do ITE (*Institute of Transportation Engineers*) reporta que o Manual do ITE, *Traffic Control Devices Handbook*, 2nd Edition (2013) [6], estabelece que a temporização semafórica deve fornecer tempo adequado para que os ciclistas que entrarem no cruzamento legalmente no final da fase verde possam concluir sua travessia antes que o tráfego conflitante receba uma indicação em verde. A abordagem do *Handbook* determina que o intervalo de amarelo seja calculado de acordo com as práticas recomendadas com base na velocidade dos veículos motorizados. Normalmente, esse intervalo não deve ser modificado para acomodar ciclistas, pois pode resultar em efeitos imprevisíveis no tráfego de veículos motorizados.

O intervalo do vermelho de limpeza pode ser ajustado por um tempo de extensão,  $e$ , para fornecer o tempo adicional necessário para a “limpeza” do ciclista.

No entanto, o intervalo do vermelho de limpeza não pode ser excessivamente longo; isso pode afetar a capacidade da interseção e pode encorajar os motoristas a entrar na interseção após o final do intervalo do amarelo.

A seguinte fórmula pode ser usada para determinar o tempo envolvido na aproximação de um ciclista no final da fase verde,  $BCT_R$  (*Bicycle Crossing Time*):

$$BCT_R = t + \frac{V}{2a} + \frac{W+L}{V} \quad (15)$$

Onde:

$BCT_R$  = *Bicycle crossing time – rolling entry*, em segundos;

$t$  = tempo de percepção e reação, tipicamente 1 segundo;

$V$  = velocidade de aproximação do ciclista, em m/s, tipicamente 4,5 m/s (16 km/h) (pode ser maior);

$a$  = desaceleração da bicicleta – pavimento molhado: tipicamente 1,5 m/s<sup>2</sup>

$W$  = largura da interseção, em metros;

$L$  = comprimento da bicicleta, tipicamente 2 m.

Note que a Expressão (15) é igual à Expressão (6) do  $BCT_{rolling}$ .

O valor de  $BCT_R$  da Expressão (15) pode ser usada para a determinação do entreverdes:

$$BCT_R \leq e + Y + R_{clear} \quad (16)$$

Onde:

$BCT_R$  = *Bicycle crossing time – rolling entry*, em segundos;

$e$  = tempo de extensão, em segundos;

$Y$  = tempo de amarelo, tipicamente 3 a 6 segundos;

$R_{clear}$  = tempo de Vermelho de limpeza, tipicamente 0 a 6 segundos

## 2.6. (Wachtel et al) Signal Clearance Timing for Bicyclists (1995) – ITE Journal [7]

Note que as Expressões (1) e (3) são válidas apenas quando o ciclista atinge a velocidade de percurso antes de sair da área de conflito da interseção. Isto é, após o término do período da aceleração, o ciclista percorre o restante da área da interseção com velocidade constante (velocidade de percurso).

Este artigo do ITE *Journal* fornece a expressão para o caso em que a velocidade de percurso não é atingida na área da interseção, isto é, o ciclista percorre toda a extensão da área da interseção em movimento uniformemente acelerado e só atinge a velocidade de percurso após a área de conflito da interseção.

Neste caso, usando a mesma notação das Expressões (1) e (3), tem-se, respectivamente:

$$BCT_{standing} = PRT + \sqrt{\frac{2(W+L)}{a}} \quad (17)$$

$$BMG = \left( PRT + \sqrt{\frac{2(W+L)}{a}} \right) - Y - R_{clear} \quad (18)$$

### 2.7. (Taylor) Analysis of Traffic Signal Clearance Interval Requirements for Bicycle-Automobile Mixed Traffic (1993) [8]

No artigo, a zona de dilema é representada esquematicamente pela Figura 1, aqui reproduzida como Figura 2.

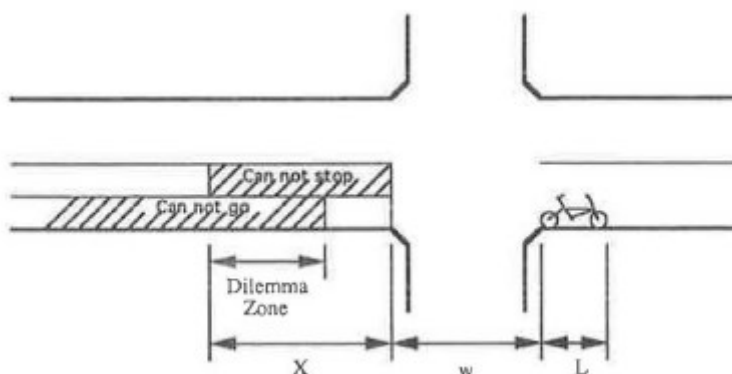


Figura 2 – Representação esquemática da zona de dilema  
(Figure 1 Dilemma zone)

A zona de dilema é uma área onde não se consegue mais parar na linha de retenção com segurança (com risco de colisão traseira) e também não se consegue sair da área de conflito da interseção antes da abertura de verde do movimento conflitante (com risco de colisão angular). Se for flagrado na zona do dilema no instante da mudança para o amarelo, um ciclista não pode fisicamente tomar uma decisão correta e segura (pois ela não existe). Portanto, a zona de dilema representa uma área de insegurança e a programação semafórica tem como objetivo reduzir o máximo possível o seu comprimento. Maiores detalhes sobre a zona de dilema podem ser vistos na Nota Técnica 212 – Dimensionamento do Entreverdes: Uma Abordagem Probabilística [9].

O artigo de Taylor coloca que “decisões difíceis devem ser tomadas pelo Engenheiro de Tráfego ao considerar as compensações entre o possível aumento do atraso no tráfego de veículos motorizados ou colocar os ciclistas em perigo, criando zonas de dilema para eles. Deve a programação semafórica ser alterada se houver apenas um ciclista por ano? Provavelmente não. E se for um ciclista por dia, por hora, por minuto, ou até com mais frequência? As expressões a seguir têm como objetivo ajudar nessa decisão”.

$$P = \frac{D}{v \times C} \quad (19)$$

Onde:

$P$  = probabilidade de um ciclista estar na zona de dilema

$D$  = comprimento da zona de dilema

$v$  = velocidade de aproximação do ciclista

$C$  = tempo de ciclo

A Expressão (19) é derivada assumindo que o ciclista chega à interseção em qualquer ponto do ciclo do semáforo com a mesma probabilidade. Em outras palavras, a chegada do ciclista ao cruzamento é aleatória em relação ao instante de início do sinal amarelo. Uma vez que a luz amarela ocorre uma vez a cada ciclo e o ciclista percorre uma distância igual a  $v \times C$  durante o tempo de ciclo, é igualmente provável que o ciclista esteja em qualquer ponto da aproximação no trecho  $v \times C$  quando ocorre o período de transição do direito de passagem. Esta distância  $v \times C$  inclui a zona de dilema de comprimento  $D$ . Então, a probabilidade  $P$  de um ciclista ser flagrado na zona do dilema na mudança do direito de passagem é simplesmente a razão de  $D$  para a distância que o ciclista pode percorrer durante o tempo de ciclo ( $v \times C$ ).

O comprimento da zona de dilema  $D$  pode ser expresso por<sup>10</sup>:

$$D = v \times t_{pr} + \frac{v^2}{2 \times d} - v \times ci + w + L \quad (20)$$

Onde:

$t_{pr}$  = tempo de percepção e reação

$d$  = desaceleração

$ci$  = tempo de limpeza, desde o momento da percepção da mudança do direito de passagem até a saída da área de conflito da interseção, sem aceleração

$w$  = largura da interseção

$L$  = comprimento da bicicleta

Esta formulação assume que não há aceleração (o ciclista pedala com velocidade constante até sair da área de conflito da interseção). Para a formulação com aceleração deve ser adicionado na Expressão (20) o termo:

$$- \frac{a(ci - t_{pr})^2}{2} \quad (21)$$

Onde:

$a$  = aceleração

A hipótese de mesma probabilidade de chegada do ciclista em qualquer ponto da aproximação no trecho ( $v \times C$ ) não é verdadeira quando houver a influência de semáforos adjacentes numa rede coordenada. Neste caso, a chegada dos ciclistas não é aleatória.

A probabilidade da Expressão (19) fornece uma ideia de quão inseguro é o período de transição de mudança do direito de passagem para o ciclista. Quanto maior for  $P$ , maior será a condição de insegurança. Uma medida mais representativa pode ser obtida multiplicando  $P$  pelo fluxo de ciclistas. Se  $P$  for alto, mas o fluxo de ciclistas for baixo, a condição de insegurança pode não ser preocupante. O pior caso é quando tanto  $P$  quanto o fluxo de ciclistas tiverem valores altos. Pode ser assumido como um parâmetro de projeto o valor crítico de  $P \times F$ , onde  $F$  é o fluxo de ciclistas. Isto é, pode-se

<sup>10</sup> Uma dedução da formulação do comprimento da zona de dilema pode ser encontrada na Nota Técnica 212 [9].

determinar o período de entreverdes tal que o valor de  $P \times F$  seja menor ou igual ao valor crítico assumido como parâmetro de projeto.

## 2.8. (Thompson et al) *Bicycle-Specific Signals: Results from a State-of-the-Practice Review* (2013) [10]

Este artigo faz uma revisão sobre a sinalização semafórica específica para ciclistas. Sobre a temporização semafórica, o artigo traz as expressões de AASHTO (2012) [2] referente às expressões para *BMG* (*Bicycle Minimum Green*), Expressão (3), e *BCT<sub>rolling</sub>* (*Rolling Bicycle Crossing Time*), Expressões (4), (5) e (6), apresentadas anteriormente.

O artigo traz também a expressão recomendada pelo MUTCD da Califórnia para a duração mínima de verde para ciclista, designada como  $G_{min}$ .

$$G_{min} + Y + R_{clear} > 6s + \frac{(W+6ft)}{14,7 ft/s} \quad (22)$$

Onde:

$Y$  = tempo de amarelo, em segundos;

$W$  = distância da linha de retenção até a extremidade da última faixa conflitante.

Na Expressão (22), o comprimento da bicicleta é admitido como 6 pés (1,8 m) e é adotada uma velocidade de percurso do ciclista de 14,7 pés/segundo (4,48 m/s).

O artigo ressalta que a fórmula de *BMG* da AASHTO (2012) [2], Expressão (3), e a do MUTCD da Califórnia [11] para  $G_{min}$ , Expressão (22), são basicamente equivalentes. Com o valor *default* de 1 segundo para a percepção e reação, velocidade de 14,7 pés/segundo (4,49 m/s) e aceleração de 1,5 pés/s<sup>2</sup> (0,46 m/s<sup>2</sup>), a soma dos dois primeiros termos da Expressão (3) vale aproximadamente 6 segundos, conforme a Expressão (22).

## 2.9. Verde antecipado para ciclistas (*Leading Bicycle Interval*)

Para reduzir o nível de conflito entre ciclistas que seguem em frente e veículos que fazem conversão à direita, existe a solução de antecipar o verde para os ciclistas em relação aos veículos motorizados. Esta solução normalmente é utilizada em conjunto com o avanço da linha de retenção para ciclistas em relação à linha de retenção para veículos motorizados.

A ideia é permitir que o grupo de ciclistas que estava aguardando a abertura do semáforo possa seguir em frente antes dos veículos, de forma que, quando o semáforo abrir para os veículos, aqueles que vão fazer a conversão à direita, irão fazê-la sem conflito com os ciclistas.

Para a implementação do *Leading Bicycle Interval* é necessária a configuração de um grupo semafórico específico para o movimento de ciclistas.

O tempo de antecipação deve ser suficiente para permitir a saída do pelotão de ciclistas. Segundo o Manual de Seattle *"Bike Intersection Design – Seattle Streets Illustrated"* (2017) [12], esse tempo de antecipação de verde para ciclistas deve ser de no mínimo 3 segundos.

## 2.10. Implementação de *"green wave"* para bicicletas

Este item tem por objetivo mostrar as implementações de coordenação semafórica conhecida como onda verde *"green wave"* em cidades como Copenhagen (Dinamarca), Amsterdam e Rotterdam (Holanda) e Melbourne (Austrália).

A onda verde é um tipo de coordenação semafórica em que uma corrente de trânsito recebe indicação luminosa verde numa sequência de semáforos de uma determinada rede, desde que os veículos viajem a uma velocidade constante, previamente estabelecida no projeto. Normalmente, a onda verde não funciona bem para o tráfego de veículos motorizados, quando o volume de conversão da via transversal for alto e houver fila remanescente do ciclo anterior no semáforo a jusante. A eficiência da onda verde também é menor em vias de mão dupla. Em geral, em vias de mão dupla, direciona-se a onda verde no sentido de maior fluxo, por exemplo, pico da manhã no sentido Bairro-Centro e no pico da tarde no sentido oposto.

### 2.10.1. Copenhagem

Em Copenhagem há um fluxo diário de 36 mil ciclistas, usando 454 km de ciclofaixas<sup>11</sup>. Segundo a matéria cujo título é “*Green Waves for Bicycles in Copenhagen*” (2016) [13], cerca de 36% da população usa bicicleta para ir trabalhar ou para ir para escola, resultando em 1,1 milhão de quilômetros pedalados por dia.

A Figura 3 mostra uma foto com o alto volume de ciclistas em Copenhagem.



Figura 3 – “Congestionamento” de bicicletas em *Dronning Louises Bro* – Copenhagem  
(Fonte: <https://ecf.com/news-and-events/news/green-wave-cyclists> [14])

A título de exemplo, a interseção de *Nørrebrogade* com *Søtorvet* apresenta um fluxo diário de 36 mil ciclistas por dia<sup>12</sup>.

<sup>11</sup> <https://futuredistributed.org/stories/copenhagen-cycling/>

<sup>12</sup> <http://www.webikeeugene.org/2011/02/17/the-copenhagen-green-wave/comment-page-1/>

A Figura 4 mostra um contador de bicicletas.



Figura 4 – Contador de bicicletas

(Fonte: <http://www.webikeugene.org/2011/02/17/the-copenhagen-green-wave/comment-page-1/>)

Conforme menciona a matéria “Green Waves for Bicycles in Copenhagen” (2016) [13], a onda verde foi implementada inicialmente em 3 vias: Nørrebrogade (projeto piloto implementado em 2004), Østerbrogade e Farimagsgade. Esta fase foi denominada de “Green Wave V1.0”. A fase seguinte, denominada de “Green Wave V2.0”, utiliza detecção de bicicletas. Se houver um grupo com 5 ou mais ciclistas, o tempo de verde é estendido até que os ciclistas passem.

A avaliação do “Green Wave V1.0” feita em Nørrebrogade mostrou que o tempo médio de percurso diminuiu em 17% para o ciclista que pedalou na velocidade de 20 km/h (velocidade de projeto estipulada para a onda verde). O número de paradas reduziu de 6 para 1. Entretanto, o transporte por ônibus foi afetado, cujo tempo de percurso aumentou em 14%. Outro efeito constatado é que o uso de uma velocidade de projeto estática para a onda verde não é eficiente pois não considera variações de velocidade devido ao clima (vento, chuva, neve etc.) ou devido a lentidões causadas por alto volume de ciclistas na ciclofaixa.

A Figura 5 mostra uma foto com os ciclistas andando na neve.



Figura 5 – Ciclistas pedalando na neve.

(Fonte: <http://www.copenhagenize.com/2014/08/the-green-waves-of-copenhagen.html> [15])



As figuras a seguir (Figuras 6, 7 e 8) foram obtidas de *Green Wave for Cyclists* (2018) [14].

A Figura 6 mostra um diagrama com o efeito da onda verde de 20 km/h sobre todos os modais.

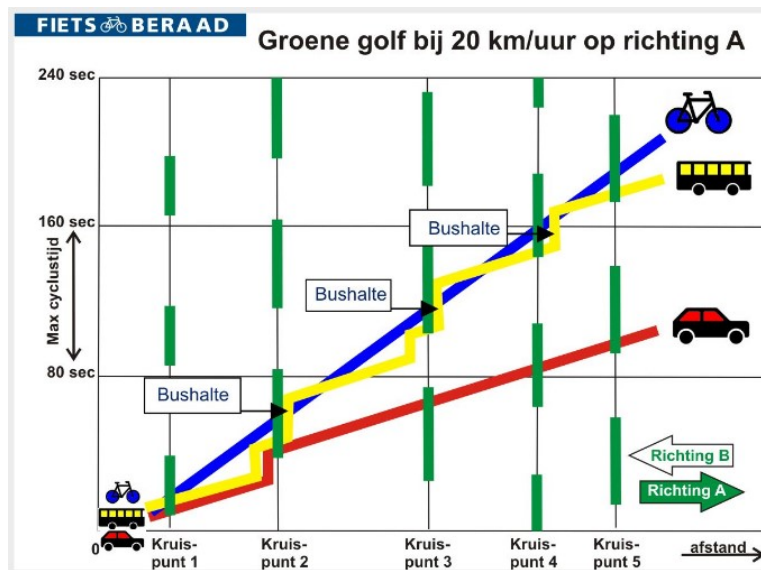


Figura 6 – Efeito da onda verde sobre os vários modais

(Fonte: <https://ecf.com/news-and-events/news/green-wave-cyclists> [14])

A Figura 7 mostra a sinalização (vertical e horizontal) indicativa da onda verde.



Figura 7 – Sinalização horizontal e vertical indicativa da onda verde

(Fonte: <https://ecf.com/news-and-events/news/green-wave-cyclists> [14])



A Figura 8 mostra uma comparação antes e após a implementação da onda verde.

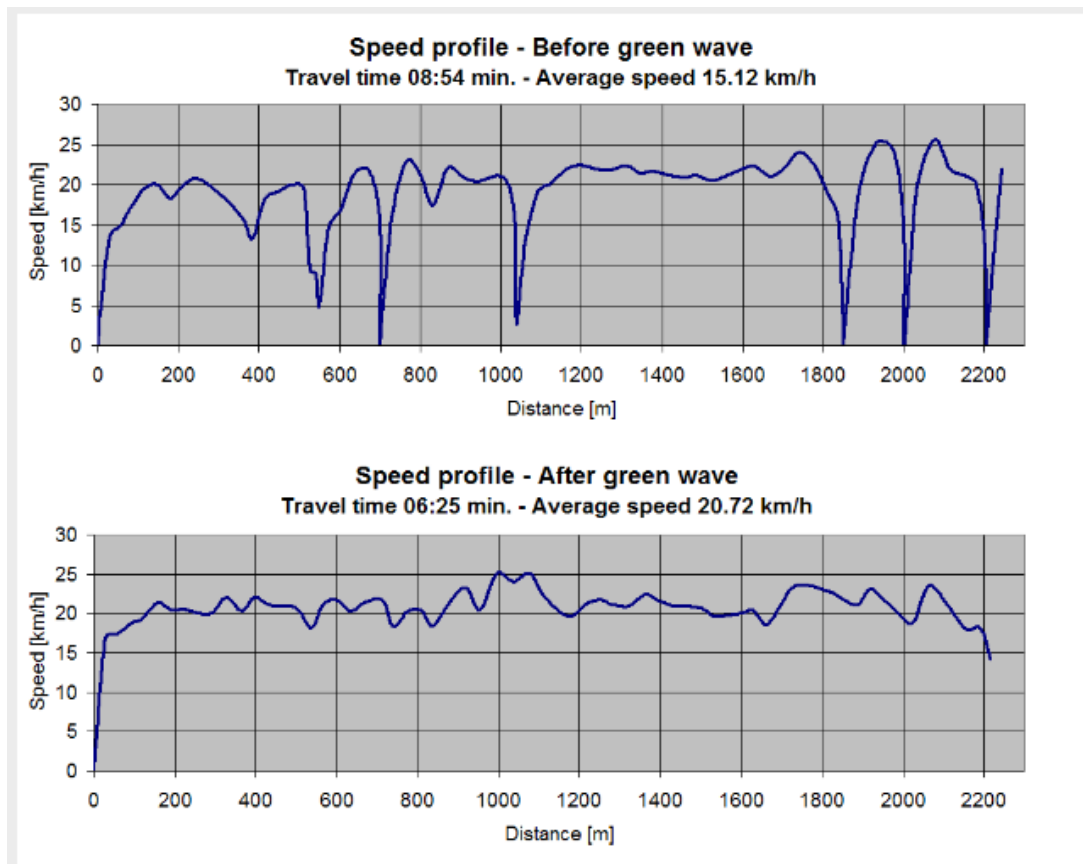


Figura 8 – Comparação da velocidade do ciclista antes e após  
(Fonte: <https://ecf.com/news-and-events/news/green-wave-cyclists> [14])

A matéria cujo título é “The Green Waves of Copenhagen” (2014) [15] traz fotos do uso de contadores regressivos para bicicletas.

A Figura 9 mostra um contador regressivo para bicicletas colocado no meio de quadra (antes da interseção semaforizada).



Figura 9 – Contador regressivo para bicicletas no meio de quadra

(Fonte: <http://www.copenhagense.com/2014/08/the-green-waves-of-copenhagen.html> [15])

Em Frederiksberg, esses contadores regressivos estão posicionados ao longo da via (e não nos cruzamentos). Embora não haja onda verde presente, eles têm a mesma função. Eles fazem a contagem regressiva para cada mudança do semáforo. Se o semáforo estiver vermelho, é uma contagem regressiva para verde e vice-versa. Isso significa que se pode acelerar um pouco ou aplicar o freio para manter o ritmo.

A Figura 10 mostra um contador regressivo para bicicletas no cruzamento.

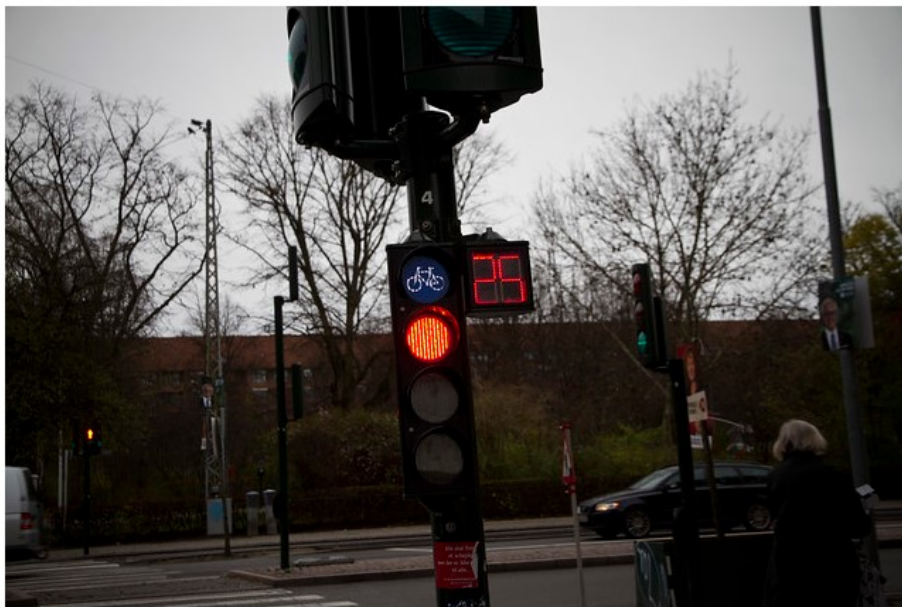


Figura 10 – Contador regressivo para bicicleta no cruzamento

(Fonte: <http://www.copenhagense.com/2014/08/the-green-waves-of-copenhagen.html> [15])

O contador regressivo da Figura 10 não tem relação com onda verde. É uma contagem regressiva simples no semáforo, permitindo que os ciclistas vejam quanto tempo levará até que o semáforo mude.

### 2.10.2. Amsterdam

Apesar de Amsterdam ser uma cidade com uso intensivo de bicicletas e ser famosa por sua infraestrutura cicloviária, não foi possível localizar muitos detalhes sobre implementação de ondas verdes em cruzamentos semaforizados.

Única referência encontrada foi em *News from Amsterdam – Green Wave for Cyclists Tested* (2007) [16], que reporta o seguinte:

“Amsterdam criou uma onda verde para ciclistas ao longo da Raadhuisstraat. Ciclistas pedalando a uma velocidade entre 15 a 18 km/h não pararão nos semáforos. Testes mostraram que o transporte público também se beneficiou com a medida, enquanto houve um prejuízo para o fluxo de veículos. Em média, os bondes tiveram um ganho de 1,5 minutos e os ônibus que saem da cidade ganharam cerca de 3 minutos. Veículos que saem da cidade perderam 45 segundos. Não foram fornecidos dados sobre o efeito da medida para a velocidade dos ciclistas.”

Portanto, com relação ao transporte público, Amsterdam obteve um resultado oposto ao daquele obtido em Copenhague.

### 2.10.3. Rotterdam

Rotterdam implantou um sistema de onda verde denominado “Evergreen”.

Foram encontradas duas referências sobre esse sistema: “*Evergreen – A New Kind of Green Wave for Cyclists*” (2010) [17] e “*Video: Rotterdam to Get Green Wave System to Help Cyclists Beat the Lights*” (2010) [18]<sup>13</sup>.

A Figura 11 mostra o esquema de *Evergreen*.

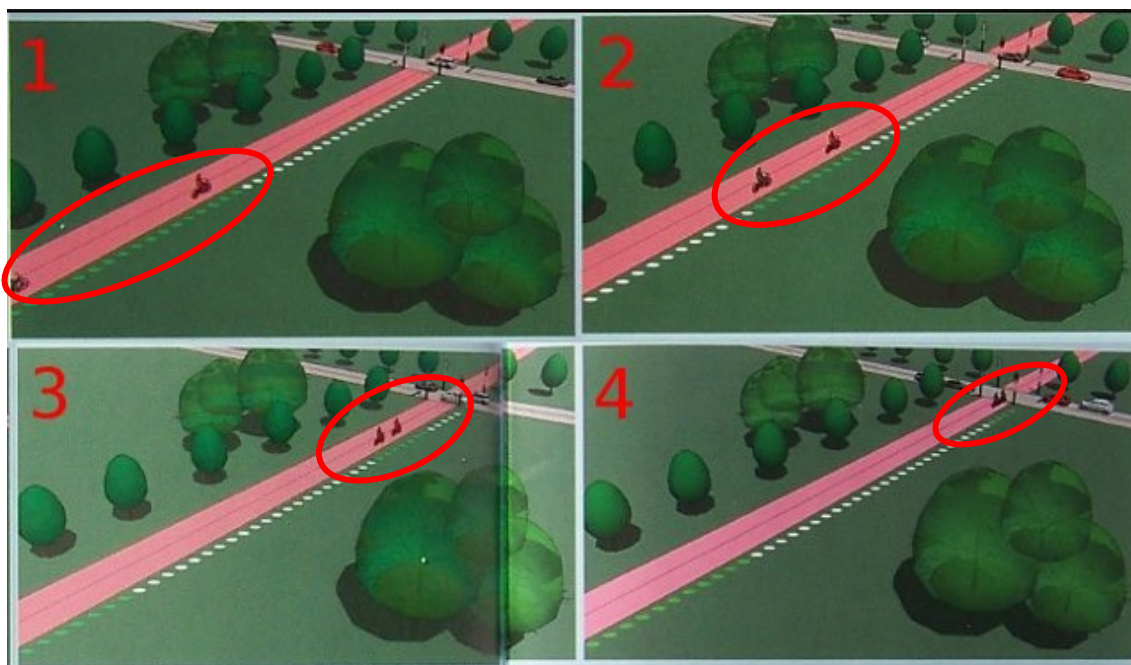


Figura 11 – Onda verde denominada “Evergreen”

(Fonte: <http://www.aviewfromthecyclepath.com/2010/03/evergreen-new-kind-of-green-wave-for.html> [17])

<sup>13</sup> Neste link, embora o título da matéria contenha a palavra “video”, não foi encontrado nenhum vídeo.

LEDs embutidos junto à ciclovia a partir de algumas centenas de metros antes do cruzamento ajudam os ciclistas a avaliar a velocidade correta para evitar a parada no próximo semáforo.

A onda verde é representada por um conjunto de LEDs que vão se tornando verdes na mesma velocidade da sua progressão. Os quadros 1 a 4 da Figura 11 mostram a progressão da faixa de LEDs verdes representando a progressão da onda verde. Os ciclistas podem perceber o avanço da onda verde por meio da progressão do conjunto dos LEDs verdes.

Se o ciclista estiver andando junto aos LEDs verdes, ele estará sincronizado com o ritmo da progressão da onda verde. Enquanto o ciclista acompanhar o ritmo de avanço dessa faixa de LEDs verdes, ele não irá parar no semáforo adiante.

Os LEDs à frente dos LEDs verdes piscam com uma frequência menor para indicar ao ciclista de que ele está adiantado em relação à onda verde e que precisa reduzir a velocidade até que fique na região dos LEDs verdes.

Os LEDs atrás dos LEDs verdes piscam com uma frequência maior indicando ao ciclista de que ele está atrasado em relação à onda verde e que precisa acelerar para ficar na faixa de progressão da onda verde (representada pelos LEDs verdes).

### 2.10.4 Melbourne

Conforme a matéria encontrada em “How ‘Green Waves’ Can Make City Riding Better – Melbourne” (2019) [19], a onda verde foi implantada em Albert Street em abril de 2018.

Acredita-se que a onda verde de Albert Street seja a única no mundo com velocidades de projeto diferentes em cada trecho.

A Figura 12 mostra o mapa com as diferentes velocidades.

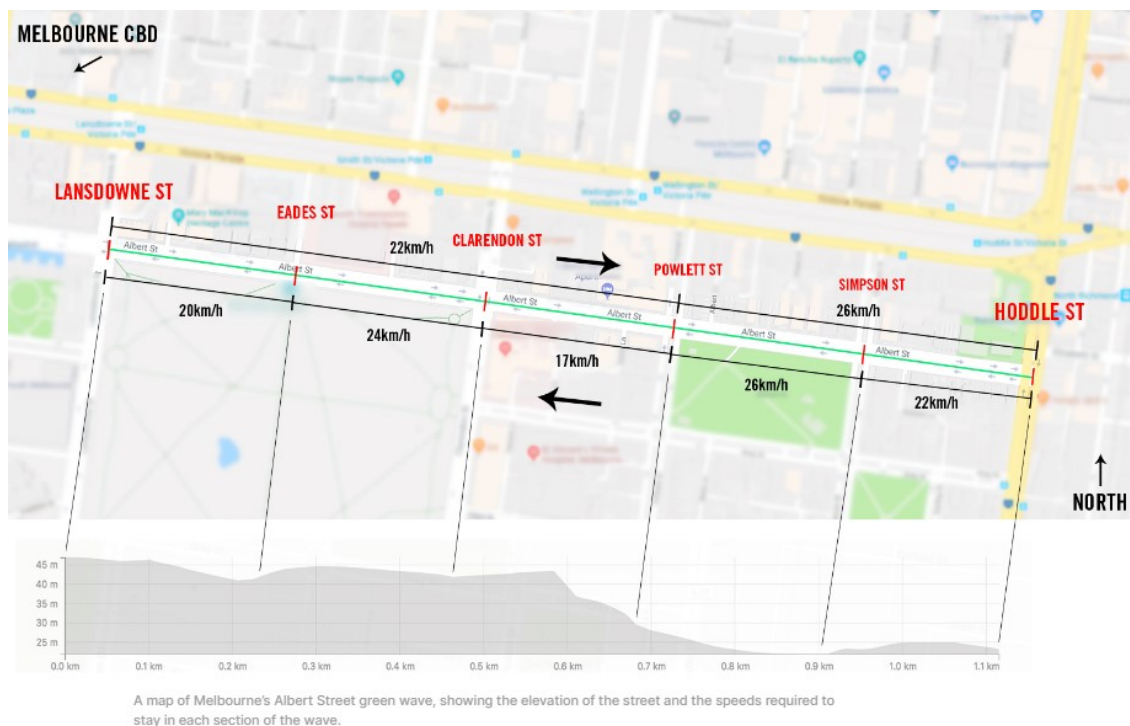


Figura 12 – Albert Street e as diversas velocidades de onda verde

(Fonte: <https://cyclingtips.com/2019/02/how-green-waves-can-make-inner-city-cycling-safer-and-more-efficient/> [19])



A topografia da via é a seguinte:

Sentido leste:

- Landsdowne Street para Powlett Street (predominantemente declive): 22 km/h
- Powlett Street para Hoddle Street (plano): 26 km/h

Sentido oeste:

- Hoddle Street para Simpson Street (predominantemente plano): 22 km/h
- Simpson Street para Powlett Street (levemente em aclave): 26 km/h
- Powlett Street para Clarendon Street (aclive): 17 km/h
- Clarendon Street para Eades Street (plano): 24 km/h
- Eades Street para Lansdowne Street (levemente em aclave): 20 km/h

No trecho Landsdowne Street para Powlett Street, por se tratar de declive, facilmente se chega a velocidades de 30 km/h. Entretanto, por motivo de segurança foi adotada para onda verde uma velocidade de projeto de 22 km/h.

De forma geral, os resultados obtidos foram: no sentido oeste, o tempo de percurso foi 53 segundos menor no pico da manhã. No sentido leste, foi 3 segundos menor. Parece ser não significativo, mas isso é devido a dois fatores. Primeiro, o semáforo em Hoddle St, entrada da rede, opera com ciclo de 160 segundos, o dobro do semáforo em Landsdowne St, semáforo de saída da rede. Isso significa que quem entrou no início da onda verde em Hoddle St, vai ficar preso em Hoddle St metade do tempo. Segundo, a onda verde foi projetada para reduzir a velocidade em declives. A velocidade de 33 km/h antes da onda verde passou a ser de 28 km/h.

### **2.11. (Taylor et al) *Coordinating Traffic Signals for Bicycle Progression* (2000) [20]**

Este artigo trata da coordenação semafórica para bicicletas em vias compartilhadas com o tráfego motorizado, mostrando técnicas de análise por meio de diagramas espaço-tempo (Figuras 13 a 19), procurando-se obter benefícios para a bicicleta a partir da progressão dos automóveis.

A variabilidade da velocidade da bicicleta é provavelmente a consideração mais importante para a sua progressão numa rede semaforizada. O modelo de velocidade constante não parece se aplicar tão bem às bicicletas quanto aos automóveis numa formação de pelotão. Por causa das diferenças entre os ciclistas em termos de força, aptidão física e habilidade, bem como diferenças na tecnologia e manutenção da bicicleta, as velocidades da bicicleta são normalmente distribuídas entre cerca de 12,9 e 32,2 km/h (8 e 20 mph). Além disso, os volumes das bicicletas não são suficientemente altos para a formação de pelotões (nos Estados Unidos), não havendo a uniformização das velocidades. Um método possível de uniformizar as velocidades das bicicletas, de modo que elas se beneficiem de um projeto de progressão, seria informar aos ciclistas a velocidade de progressão do projeto, selecionada de forma que uma alta porcentagem deles pudesse mantê-la. No entanto, isso traz outro aspecto da variabilidade da velocidade da bicicleta, que é até que ponto os ciclistas conseguem manter constante a velocidade. Deve-se notar que a maioria das bicicletas não tem velocímetros.

Outro aspecto importante é o greide da via. Diferentes velocidades de progressão da bicicleta podem ser necessárias para diferentes seções da via. Além disso, o vento tem um impacto significativo na velocidade da bicicleta, semelhante em magnitude ao greide. Sistemas adaptáveis avançados podem ser projetados para se ajustar em tempo real com base nas condições atuais do vento.

Os volumes bastante baixos de tráfego de bicicletas nos Estados Unidos sugerem uma largura de banda<sup>14</sup> bastante estreita, da ordem de 10 segundos ou menos. Larguras de banda estreitas podem ser problemáticas por causa da variabilidade da velocidade da bicicleta. Por exemplo, em uma velocidade de progressão de bicicleta de 19,3 km/h (12 mph) uma bicicleta levaria 56,8 s para percorrer 305 m (1.000 pés). Se um ciclista tiver a velocidade de 17,7 km/h (11 mph), para percorrer a mesma distância seriam necessários 62,0 segundos, ou 52,5 segundos a 20,9 km/h (13 mph). Há uma grande probabilidade de que pequenos desvios de velocidade fariam com que um ciclista perca uma faixa de progressão de 10 segundos.

Os diagramas de espaço-tempo mostrados a seguir usam intervalos de verde efetivo (espaço em branco) e vermelho efetivo (linha sólida). Eles não mostram explicitamente intervalos de amarelo e vermelho de limpeza. Doravante, o termo “via-coordenada” é usado para identificar a via que é coordenada para a progressão.

No pior caso, um esquema de progressão para automóvel poderia sistematicamente fazer um ciclista, viajando a uma velocidade específica, parar a cada semáforo, infligindo, assim, paradas e atrasos máximos ao ciclista. Isso ocorreria, por exemplo, para bicicletas viajando a uma velocidade ( $V_b$ ) que é a metade da velocidade de progressão do automóvel ( $V_a$ ) em uma via com semáforos uniformemente espaçados. Este caso é mostrado no diagrama de espaço-tempo da Figura 13 (Figura 1 do artigo), onde  $I_{cr}$  representa a intersecção crítica.

Observação: a largura de banda é limitada pelo menor intervalo de verde na seção coordenada para progressão. Este menor intervalo de verde ocorre normalmente na intersecção crítica, onde geralmente há maior demanda de tráfego na via transversal.

A velocidade efetiva da bicicleta é apenas  $V_a/3$  (considerando as paradas), embora a velocidade de deslocamento real do ciclista é  $V_a/2$ . Se os volumes das bicicletas fossem maiores, essa situação provavelmente poderia ser melhorada.

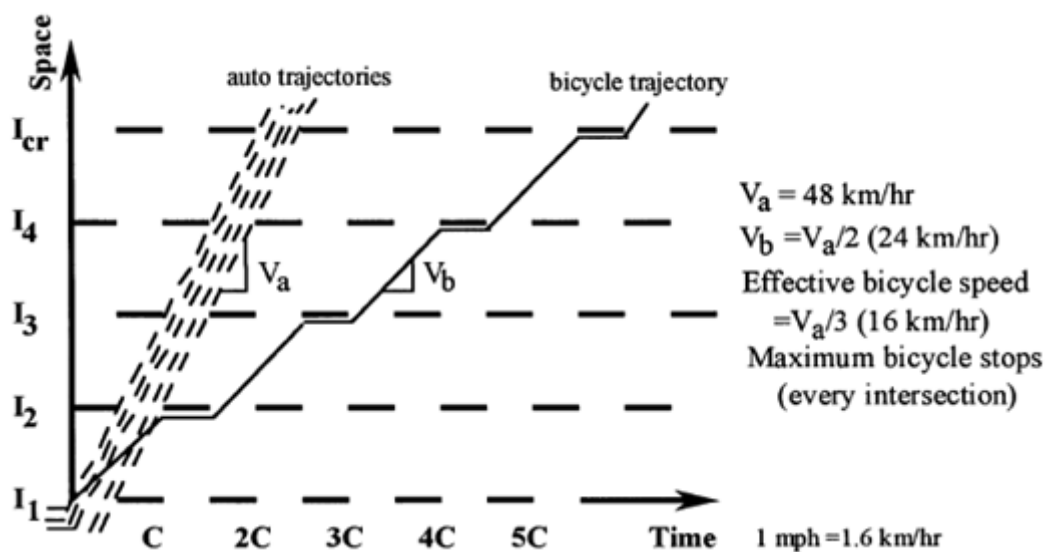


Figura 13 – Situação com o pior caso para a bicicleta

(Figure 1 – Example worst case for bicycle delay and stops from automobile progression)

A primeira coisa que se deve considerar é a tentativa de aumentar a velocidade da bicicleta por meio da postagem de uma velocidade de progressão. Contudo, possíveis aumentos na velocidade da bicicleta são limitados pelo conforto do ciclista. Qualquer aumento de  $V_b$ , na faixa de  $V_a/2$  até  $2V_a/3$  resultará em melhorias mostradas no diagrama da Figura 14 (Figura 2 do artigo). Os ciclistas agora alcançam uma velocidade efetiva de  $V_a/2$  e 50% na redução do número de paradas (em relação à Figura 13), mas deve exercer esforço suficiente para viajar mais rápido do que  $V_a/2$ . Teoricamente, o ciclista

<sup>14</sup> A largura de banda é definida como a quantidade máxima de tempo de verde, em segundos, em que um grupo de veículos, viajando a uma velocidade constante previamente definida, consegue passar por uma sequência de interseções semaforizadas sem parar.

precisa apenas viajar a uma velocidade ligeiramente superior a  $V_a/2$ . Contudo, a variabilidade da velocidade e o fato de que a chegada a um cruzamento sob uma indicação de sinal amarelo pode ser perigosa favorece o argumento para uma velocidade significativamente maior do que  $V_a/2$ . Aumentos da velocidade acima de  $2V_a/3$  trazem maiores benefícios. No entanto, mesmo se a velocidade de progressão do automóvel for de apenas 48,3 km/h (30 mph),  $V_b$  precisaria estar acima de 32,2 km/h (20 mph) para atingir aqueles benefícios extras.

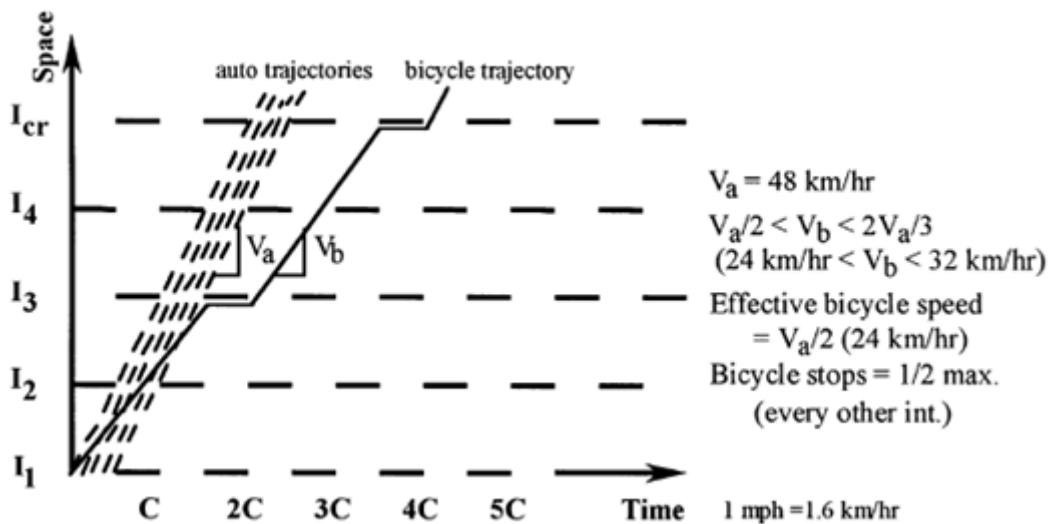


Figura 14 – Efeito do aumento da velocidade da bicicleta  
 (Figure 2 – Effect of increasing bicycle progression speed)

Pode-se também obter uma banda de progressão (estreita) para bicicletas em velocidades de  $V_a/2$ , dando parte do tempo excedente para interseções não críticas ( $I_1, I_2, I_3, I_4$ ) da “via-coordenada”, como mostrado na Figura 15 (Figura 3 do artigo). Isso fará com que o atraso total dos automóveis (incluindo o das ruas transversais) fique acima do mínimo, mas deve resultar em menos atraso total dos automóveis do que se fosse dado todo o tempo excedente para a “via-coordenada”, como é comumente feito. Se alguém alongar o verde da “via-coordenada” em  $I_2$  e  $I_4$  em, digamos, 10 segundos, encurtando o vermelho na mesma medida, é obtida uma largura de faixa de progressão para a bicicleta de 10 segundos. Este esquema apresenta uma possível preocupação com a segurança, pois aumenta a probabilidade de os ciclistas chegarem em alguns cruzamentos próximo a mudanças do direito de passagem.

Este é apenas um caso específico que mostra um uso possível para diferentes alocações de tempo de verde excedente. A alocação do tempo de verde excedente é uma técnica geral para negociar o aumento do atraso das ruas transversais com os benefícios da “via-coordenada”.



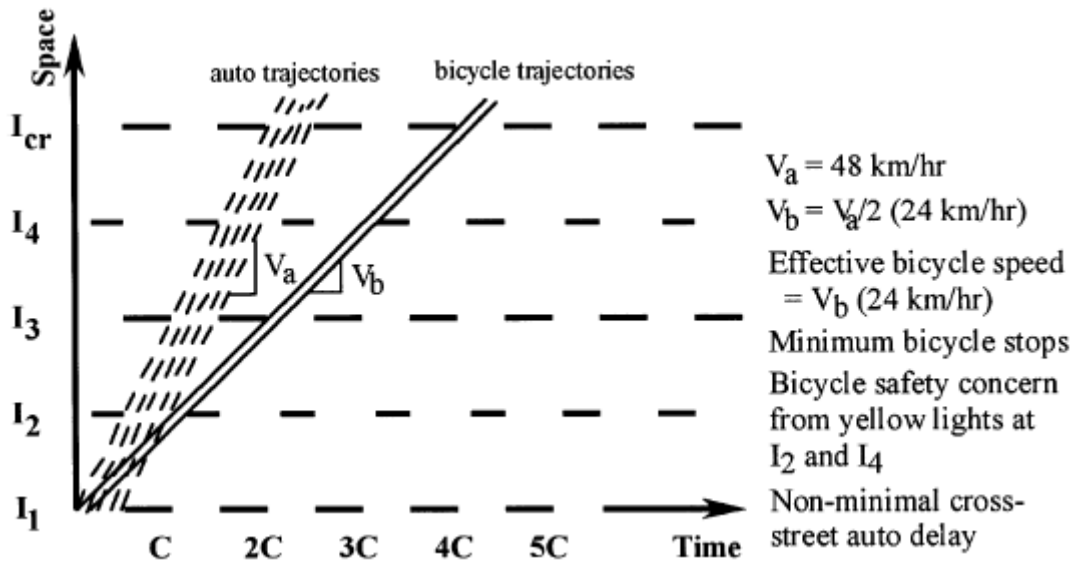


Figura 15 – Alocação do tempo de verde excedente para estreitar a largura de banda para bicicletas  
(Figure 3 – Allocation of excess green time to “sneak through” bicycle progression bandwidth)

Em vez de ou além de aumentar a velocidade da bicicleta, pode-se considerar diminuir a velocidade do automóvel para reduzir atrasos e paradas para os ciclistas. Velocidades mais baixas dos automóveis também fornecem um ambiente para os ciclistas mais confortável e seguro. É fácil mostrar, a partir do desenho mostrado na Figura 13 que, embora as condições melhorem para os ciclistas quando a velocidade do automóvel é reduzida, automóveis incorrem em maior atraso. Em Taylor (1998) [23], consta a Figura 4.5 (aqui reproduzida como Figura 16) que ilustra o caso.

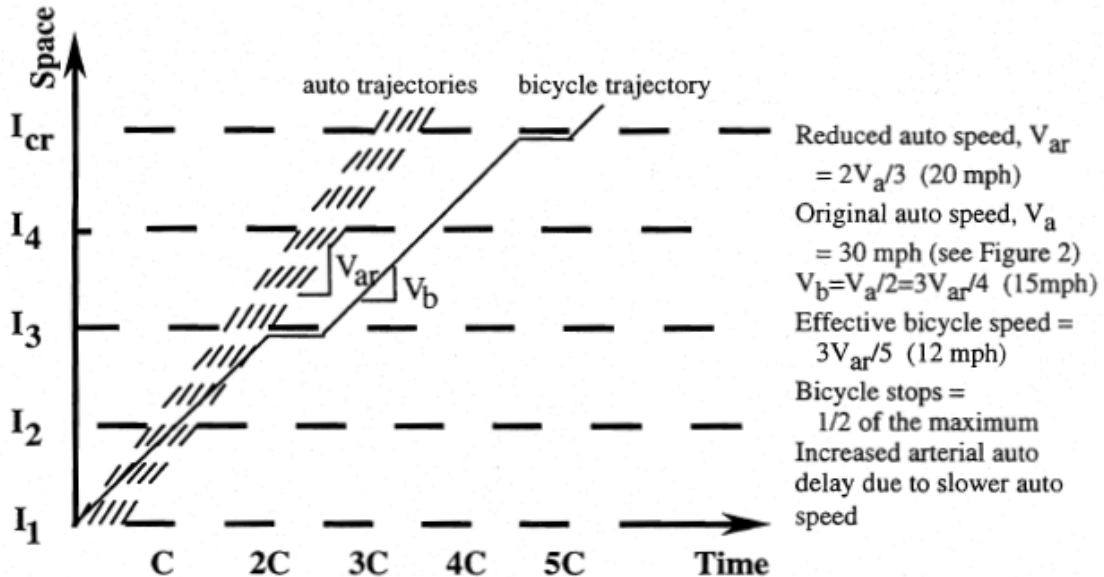


Figura 16 – Redução da velocidade de progressão do automóvel  
(Figure 4.5 – Reduced automobile progression speed. Fonte: Taylor (1998) [23])

No limite, pode-se projetar para automóveis e bicicletas progredindo na mesma velocidade. Isso provavelmente é viável apenas onde a velocidade de progressão seja em torno de 32,2 a 40,3 km/h (20 a 25 mph), o que exigiria ciclistas muito rápidos (ou via em declive) e velocidades lentas do automóvel.

Como Newell (1989) [21] apontou, sob certas condições, que o mesmo atraso pode ser alcançado para automóveis se as interseções a montante da interseção crítica ( $I_{cr}$ ) forem operadas na metade do tempo de ciclo de  $I_{cr}$ . Se as interseções não estiverem saturadas, o atraso de automóveis será reduzido aproximadamente à metade. A Figura 17 (Figura 4 do artigo) ilustra condições de atraso melhores para automóveis (em relação àquelas apresentadas na Figura 13), embora aumente o número de paradas, mas são obtidos benefícios substanciais para as bicicletas. As bicicletas agora têm uma faixa de progressão mais ampla e não chegam sistematicamente às interseções nos instantes de mudança do direito de passagem. O impacto desta técnica não se estende a jusante do  $I_{cr}$ .

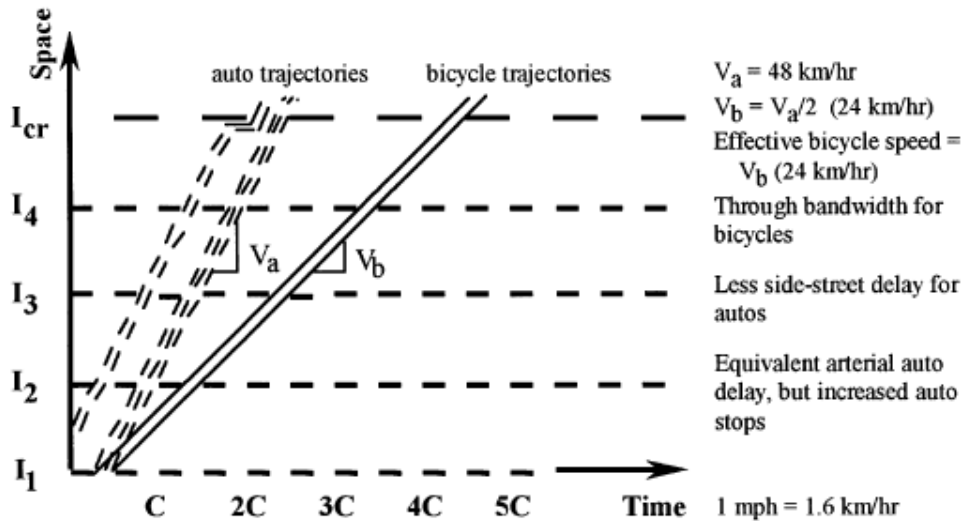


Figura 17 – Esquema de ciclos “metade” nas interseções a montante  
(Figure 4 – Half cycles for noncritical upstream intersections)

A técnica de “dispersão de parada” de Newell (1989) [21] pode fornecer oportunidades para melhorar a progressão da bicicleta, uma vez que existem inúmeras soluções possíveis para interseções a montante de  $I_{cr}$  que minimizam atrasos e paradas para automóveis. As Figuras 18-a e 18-b correspondem à Figura 5 do artigo, que é composta por 2 diagramas: 18-a mostra o “caso-base”, com a máxima largura de banda para os automóveis; 18-b mostra um exemplo possível que oferece uma melhoria substancial da progressão da bicicleta em relação ao “caso-base”. Nos diagramas das Figuras 18-a e 18-b,  $I_{wide}$  representa uma interseção larga, em aclave. A chave para o método de Newell é que a parada causada pelo intervalo de verde mínimo efetivo da interseção crítica ocorrerá, não importa o que aconteça. Então, deve-se apenas assegurar que nenhuma parada ou atraso adicional seja causado. O impacto desta técnica também não se estende a jusante do  $I_{cr}$ .

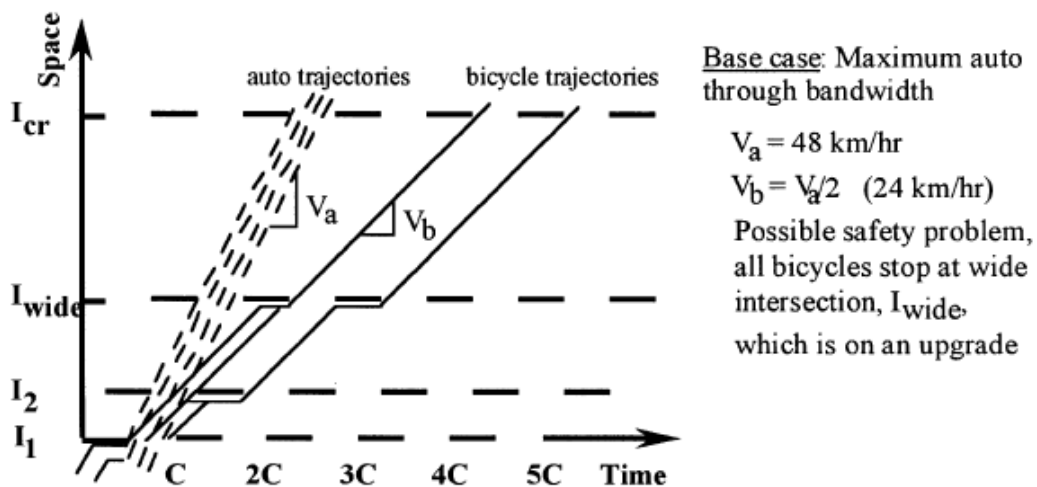


Figure 18-a – “Caso-base”: máxima largura de banda para os automóveis em aclave

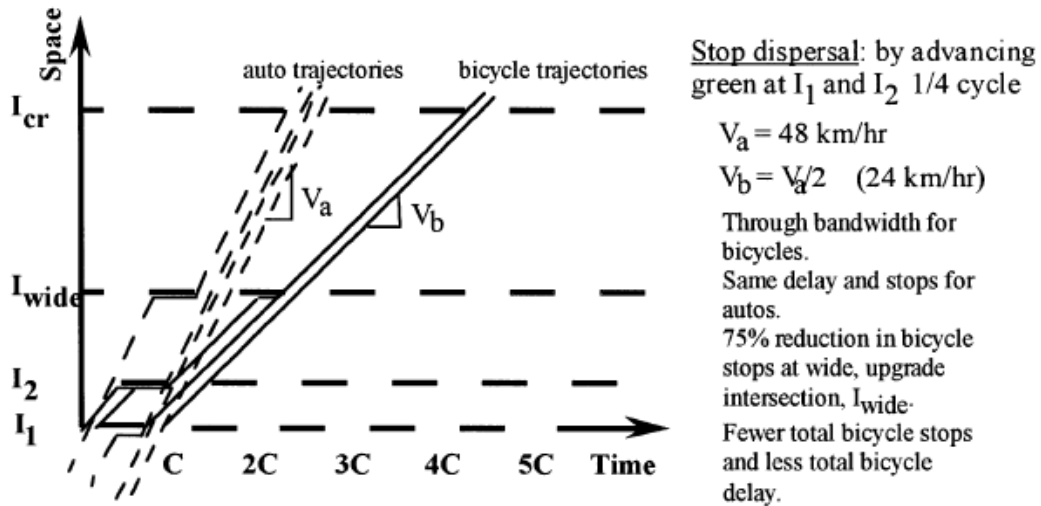


Figure 18-b – Técnica de dispersão de parada  
(Figure 5 – Newell's stop dispersal technique)

O ajuste do tempo de ciclo da interseção crítica também pode ser usado para melhorar as condições das bicicletas. Uma demonstração de uma melhoria causada pelo aumento do tempo de ciclo em 25% é mostrada em Taylor (1998) [22]. No entanto, em muitos casos, apenas faixas estreitas são obtidas, uma vez que pode haver um limite superior para tempos de ciclo aceitáveis. A consideração de tal estratégia também requer uma avaliação cuidadosa das compensações entre o aumento do atraso e os benefícios da progressão para as bicicletas. Em Taylor (1998) [23], consta a Figura 4.8 (reproduzida aqui como Figura 19), onde é ilustrado este caso.

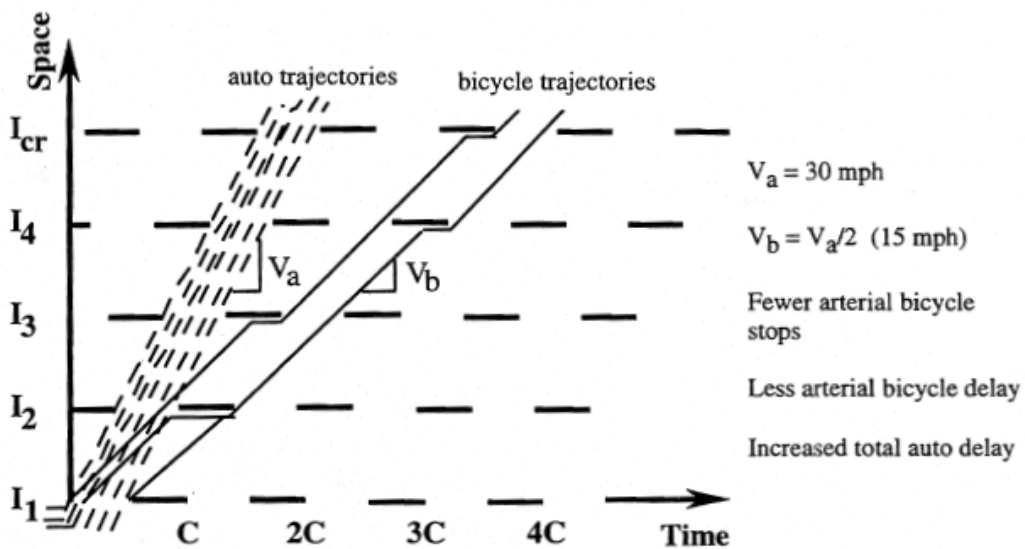


Figura 19 – Aumento do tempo de ciclo  
(Figure 4.8 – Increased cycle time. Fonte: Taylor (1998) [23])

Em uma simples troca de benefícios de progressão de automóvel para benefícios de progressão de bicicleta, pode-se ajustar a defasagem para criar uma solução com uma progressão para bicicleta adequada. Isso reduzirá a largura de banda da progressão e aumentará as paradas e o atraso para automóvel.

As Figuras 13 a 19 ilustram casos em que esquemas de progressão de automóveis em vias de mão única podem impactar negativamente as bicicletas e apresentam alguns conceitos e técnicas para reduzir esses impactos.

Finalmente, deve-se notar que os métodos desenvolvidos para projetar esquemas de progressão para automóveis podem também ser usados para bicicletas. No entanto, nesses projetos, fatores como a variabilidade da velocidade, segurança, dimensionamento da largura de banda e outras considerações para bicicletas devem ser avaliados. Possíveis impactos negativos para o tráfego geral precisam também ser considerados. Um projeto de progressão semafórica sempre envolve a questão se os benefícios para bicicletas superam os impactos negativos para os demais modais (ou vice-versa).

### 3. PROPOSTA

Em função do que foi pesquisado na literatura na Seção 2, faz-se a seguinte proposta para a temporização semafórica voltada para ciclistas:

- A temporização semafórica voltada para ciclistas só deve ser considerada em aproximações semaforizadas onde houver movimento de ciclistas em ciclofaixas e ciclovias.
- A presente proposta pretende apresentar recomendações para o dimensionamento de 3 intervalos:
  - a) Duração mínima de verde para ciclista, doravante, designada como *DMVC*.
  - b) Tempo de amarelo.
  - c) Tempo de vermelho de limpeza.

Quanto à defasagem para ciclista, não será apresentada uma proposta de metodologia para o seu dimensionamento, limitando-se o presente trabalho a fazer considerações gerais com base no material pesquisado na Seção 2.

O presente trabalho não pretende fornecer valores “prontos”, mas disponibilizar as ferramentas e a metodologia para que se possa fazer um dimensionamento dos tempos do semáforo de forma mais adequada possível.

Tão importantes quanto as ferramentas e a metodologia são os valores dos parâmetros a serem usados nos cálculos. A qualidade e a correção dos resultados dependerão diretamente desses valores. O ideal seria que, para cada local, fossem feitas pesquisas para a obtenção dos dados necessários. Mas, quase sempre isso não é possível. Na ausência de dados, não resta alternativa senão adotar valores encontrados ou recomendados na literatura. Entretanto, mesmo na literatura, pode se encontrar valores muito diferentes dependendo das fontes pesquisadas. Assim, sempre será necessário fazer uma análise criteriosa dos dados para garantir que são condizentes com a realidade do local em estudo.

#### 3.1. Tempo de amarelo

No caso de estágio em que andam movimentos veiculares motorizados e de ciclistas, o tempo de amarelo deve ser aquele dimensionado para os veículos motorizados, não devendo ser ajustado para bicicletas, mesmo quando houver grupo focal específico para ciclistas. Em geral, o tempo de amarelo dimensionado para veículos motorizados atende plenamente as necessidades dos ciclistas (pois a velocidade dos ciclistas é menor que a dos veículos motorizados).

No caso de estágio exclusivo para bicicleta, o tempo de amarelo do grupo semafórico para ciclista correspondente poderá ser calculado usando a mesma expressão usada para os veículos motorizados, conforme abaixo (empregando a mesma notação adotada pelo Manual Brasileiro de Trânsito, Volume V [24]), com as devidas adaptações:

$$t_{am} = t_{pr} + \frac{v_a}{2(a_{ad} \pm ig)} \quad (23)$$

Onde:

$t_{am}$  = tempo de amarelo, em segundos

$t_{pr}$  = tempo de percepção e reação do ciclista para a frenagem, em segundos

$v_a$  = velocidade de aproximação do ciclista, em m/s

$a_{ad}$  = desaceleração segura do ciclista, em m/s<sup>2</sup>

$i$  = greide da aproximação, em m/m (“+” para aclive e “-” para declive)

$g$  = aceleração da gravidade ( $g = 9,8 \text{ m/s}^2$ )

A Expressão (23) acima e a (13), apresentada anteriormente, são idênticas, com exceção da notação.

A Tabela 9 mostra os valores para o tempo de amarelo em função dos valores dos parâmetros pesquisados na literatura na Seção 2 (para aproximação plana).

**Tabela 9 – Valores do tempo de amarelo para ciclistas**

$v_a$	Parâmetro	Valor	Fonte	$t_{am}$ (s)
20 km/h	$t_{pr}$	1 s	AASHTO (2012) [2]	3
	$a_{ad}$	1,5 m/s <sup>2</sup> (*)		
	$t_{pr}$	2,5 s	OTM (2018) [4]	3
	$a_{ad}$	3 m/s <sup>2</sup>		
30 km/h	$t_{pr}$	1 s	AASHTO (2012) [2]	4
	$a_{ad}$	1,5 m/s <sup>2</sup> (*)		
	$t_{pr}$	2,5 s	OTM (2018) [4]	4
	$a_{ad}$	3 m/s <sup>2</sup>		

(\*) Pavimento molhado

Cabe salientar que a Tabela 9 foi obtida usando-se valores conservadores em favor da segurança, considerando-se pavimento molhado.

### 3.2. Tempo de vermelho de limpeza

O dimensionamento correto do tempo de vermelho de limpeza é essencial para ciclistas, principalmente em interseções largas e em active, de forma a garantir que o ciclista saia da área de conflito da interseção antes da abertura do verde para os movimentos concorrentes.

A expressão para o cálculo do tempo necessário é:

$$t_{vl} = \frac{W+L}{v_p} \quad (24)$$

Onde:

$W$  = largura da interseção, medida conforme a Figura 20, em metros

$L$  = comprimento da bicicleta, em metros

$v_p$  = velocidade de percurso do ciclista, em m/s

Figura 20 – Medida de  $W$

$W$  não deve ser entendido simplesmente como “largura da interseção”, mas sim, como a largura da área de conflito da interseção, aí incluindo as faixas de pedestres nas esquinas anterior e posterior, como mostra a Figura 20.

Segue um exemplo numérico da Expressão (24) para uma interseção plana, para diferentes valores de  $W$ , usando-se os seguintes valores:

$L = 1,8$  m

$v_p = 20$  km/h (para aproximações planas)

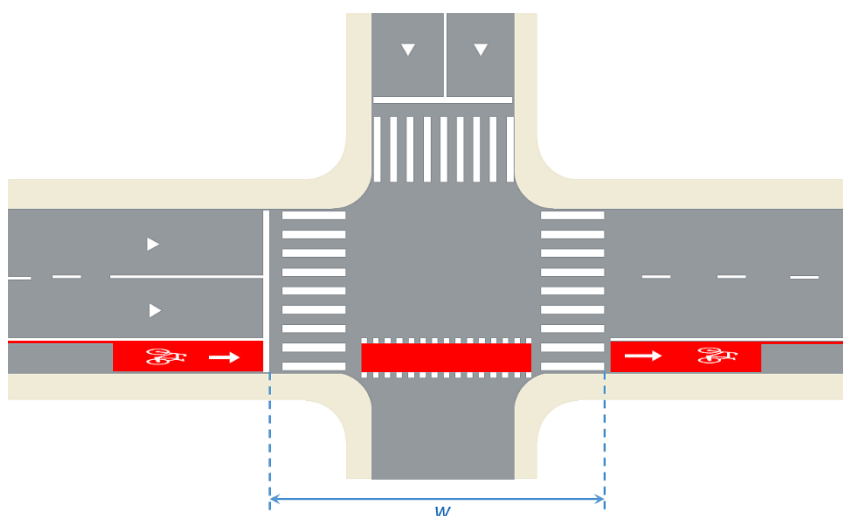


Tabela 10 – Tempo de vermelho de limpeza em interseções planas

$W$ (m)	$t_{vl}$ (s)
10	2
15	3
20	4
25	5
30	6
35	7
40	8
45	8

Em casos de acive, deve-se considerar uma velocidade  $v_p$  menor do que a velocidade em interseções planas. A Tabela 1 (do item 2.1, anteriormente apresentado) que reproduz a “Table 12.1 – Design Parameters for Cyclists” do Manual inglês “Traffic Signs Manual” (2019) [1] fornece uma velocidade de projeto de 15 km/h para acives com greide superior ou igual a 3%.

Para interseções muito largas e em acive, se o intervalo de vermelho de limpeza for definido totalmente com base na necessidade do ciclista, a duração desse intervalo pode ser tão longa que os motoristas podem considerar que o semáforo está com defeito.



Por exemplo, para uma interseção com  $W = 40$  m e greide de 3% e considerando os seguintes valores:

$v_c$  = velocidade dos carros = 40 km/h

$v_b$  = velocidade das bicicletas em aclives de 3% = 15 km/h

$L_c$  = comprimento dos carros = 5 m

$L_b$  = comprimento das bicicletas = 1,8 m

Então, tem-se:

$t_{vlc}$  = tempo de vermelho de limpeza para carros =  $(W + L_c)/v_c = 4$  s

$t_{vlb}$  = tempo de vermelho de limpeza para bicicletas =  $(W + L_b)/v_b = 10$  s

No exemplo, para atender as necessidades dos ciclistas, seriam necessários 6 segundos adicionais no tempo de vermelho de limpeza.

O Manual canadense “OTM – *Bicycle Traffic Signals*” (2018) [4] sugere que o tempo do intervalo de vermelho de limpeza adicional para atender os ciclistas seja limitado a 1 segundo.

Deve-se considerar também que o aumento do tempo de vermelho de limpeza pode implicar em aumento do tempo de ciclo e de atrasos a todos os usuários do sistema viário. Assim, deve-se ponderar entre a necessidade real do ciclista e os impactos negativos. Por exemplo, se o fluxo de ciclistas for de 1 ciclista por hora, vale a pena aumentar o tempo de vermelho de limpeza em todos os ciclos com todos os seus impactos negativos? A partir de qual fluxo de ciclistas, deve-se implementar o tempo de vermelho de limpeza adicional para atender os ciclistas?

Um possível critério seria o uso das Expressões (19) e (20) apresentadas no item 2.7, propostas no artigo de Taylor (1993) [8], e estabelecer como um parâmetro de projeto o número máximo de ciclistas que poderiam ficar na zona de dilema em um ciclo. No entanto, esse critério é válido apenas para interseções isoladas. Para interseções de uma rede semafórica, o método não é aplicável, uma vez que a chegada dos ciclistas não seria mais aleatória.

Seja  $N$  o número máximo de ciclistas admissível que fica na zona de dilema em um ciclo. Então:

$$N = \frac{F}{3600} \times C \times P \quad (25)$$

Onde:

$F$  = fluxo mínimo de ciclistas a partir do qual deve-se considerar o tempo de vermelho de limpeza para ciclistas, em número de ciclistas por hora

$P$  = probabilidade de um ciclista ficar em zona de dilema, dada pela Expressão (27).

$C$  = tempo de ciclo, em segundos

$$F = \frac{3600 \times N}{C \times P} \quad (26)$$

Considere o seguinte exemplo:

$N = 1$  ciclista por ciclo

$C = 80$  segundos

$P = 5\%$

Então:  $F = \frac{1 \times 3600}{80 \times 5\%} = 900$  ciclistas por hora. Isto é, se o fluxo for de 900 ciclistas por hora ou mais, então seria implementado o tempo de vermelho de limpeza para ciclistas.

Para o cálculo de  $P$ , considere as Expressões (19) e (20), incluindo o fator greide:

$$P = \frac{D}{v \times C} = \frac{v \times t_{pr} + \frac{v^2}{2(a_{ad} \pm ig)} - v \times t_{ent} + W + L}{v \times C} \quad (27)$$

Onde:

$D$  = comprimento da zona de dilema  $D$

$v$  = velocidade do ciclista

$C$  = tempo de ciclo

$t_{pr}$  = tempo de percepção e reação

$a_{ad}$  = desaceleração

$i$  = greide

$g$  = aceleração da gravidade (9,8 m/s<sup>2</sup>)

$t_{ent}$  = tempo de entreverdes total (amarelo + vermelho de limpeza) dimensionado para veículos

$W$  = largura da interseção, medida conforme a Figura 20

$L$  = comprimento da bicicleta

Por exemplo, considerando os seguintes valores:

$v = 20$  km/h

$C = 80$  segundos

$t_{pr} = 1$  segundo

$a_{ad} = 1,5$  m/s<sup>2</sup>

$i = 0\%$  (interseção plana)

$t_{ent} = 6$  segundos

$W = 20$  m (medida conforme a Figura 20)

$L = 1,8$  m

Efetando os cálculos, tem-se que  $P = 1\%$

O ideal seria que houvesse detecção na travessia de ciclistas, de forma que o vermelho de limpeza fosse estendido somente quando necessário. Entretanto, além da instalação de detectores para bicicletas, seria necessário que os controladores estivessem preparados para essa nova função, sendo que atualmente não se tem conhecimento da existência de controladores com essa capacidade no mercado nacional.

### 3.3. Duração mínima de verde para ciclista – $DMVC$

Com base na Expressão (3) da AASHTO (2012) [2] e considerando o greide da interseção,  $DMVC$  pode ser calculado como:

$$DMVC = t_{pr} + \frac{v_p}{2(a \pm ig)} + \frac{W+L}{v_p} - t_{am} - t_{vl} \quad (28)$$

Onde:

$t_{pr}$  = tempo de percepção e reação do ciclista para sair do repouso, em segundos

$v_p$  = velocidade de percurso do ciclista após o final do período de aceleração, em m/s

$a$  = aceleração do ciclista a partir do repouso até atingir a velocidade de percurso  $v_p$ , em  $m/s^2$

$i$  = greide da interseção, em m/m (“+” para alicive e “-” para declive)

$g$  = aceleração da gravidade ( $g = 9,8 \text{ m/s}^2$ )

$W$  = largura da interseção, medida conforme a Figura 20, em metros

$L$  = largura da bicicleta, em metros

$t_{am}$  = tempo de amarelo, em segundos

$t_{vl}$  = tempo de vermelho de limpeza, em segundos

A Expressão (28) vale para o caso em que a velocidade de percurso  $v_p$  é atingida antes de o ciclista sair da interseção. No caso de interseções estreitas, onde a velocidade de percurso  $v_p$  é atingida depois que o ciclista já saiu da interseção (isto é, o ciclista acelera durante todo o transcurso da área da interseção), a expressão para  $DMVC$  passa a ser, com base na Expressão (18):

$$DMVC = \left( t_{pr} + \sqrt{\frac{2(W+L)}{a \pm ig}} \right) - t_{am} - t_{vl} \quad (29)$$

As Expressões (28) e (29) podem ser reescritas como uma única expressão:

$$DMVC = \begin{cases} t_{pr} + \frac{v_p}{2(a \pm ig)} + \frac{W+L}{v_p} - t_{am} - t_{vl} & \text{se } \frac{v_p^2}{2(a \pm ig)} < (W + L) \\ \left( t_{pr} + \sqrt{\frac{2(W+L)}{a \pm ig}} \right) - t_{am} - t_{vl} & \text{se } \frac{v_p^2}{2(a \pm ig)} \geq (W + L) \end{cases} \quad (30)$$

Isto é, para interseções, onde:

- $W > \frac{v_p^2}{2(a \pm ig)} - L$ , vale a Expressão (28)
- $W \leq \frac{v_p^2}{2(a \pm ig)} - L$ , vale a Expressão (29)

No caso particular de  $W = \frac{v_p^2}{2(a \pm ig)} - L$ :

$$DMVC = t_{pr} + \frac{v_p}{a \pm ig} - t_{am} - t_{vl} \quad (31)$$

A Tabela 11 ilustra exemplos numéricos para interseções planas, considerando-se os seguintes valores:

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

$v_p = 20 \text{ km/h}$  (para aproximações planas)

$a = 0,5 \text{ m/s}^2$

$i = 0\%$  (interseção plana)

$L = 1,8 \text{ m}$

**Tabela 11 – Exemplos numéricos para  $DMVC + t_{am} + t_{vl}$ , em interseções planas**

$W$ (m)	$\frac{v_p^2}{2(a \pm ig)} - L$ (m)	$DMVC + t_{am} + t_{vl}$ (s)	Expressão
10	29	8	(29)
15	29	9	
20	29	10	
25	29	11	
30	29	12	(28)
35	29	13	
40	29	14	
45	29	15	

Na Tabela 11, a segunda coluna (da esquerda para direita) mostra a distância percorrida pelo ciclista durante o período de aceleração, desde o repouso até atingir a velocidade de percurso. As linhas em amarelo são os casos em que a largura da interseção  $W$  é menor que essa distância, enquanto as linhas em verde são os casos em que  $W$  é maior ou igual a essa distância.

Utilizando a Tabela 11, segue um exemplo numérico da determinação do valor de  $DMVC$ , com os seguintes valores (interseção plana):

$$W = 45 \text{ m}$$

$$t_{am} = 3 \text{ s (tempo de amarelo)}$$

$$t_{vl} = 4 \text{ s (tempo de vermelho de limpeza)}$$

Então:

$$DMVC = 15 - 3 - 4 = 8 \text{ s}$$

A Tabela 12 mostra exemplos numéricos para interseções com aclive de 3%, utilizando-se das Expressões (28), (29) e (31) e considerando-se os seguintes valores:

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

$$v_p = 15 \text{ km/h (para aproximações com aclive de 3\%)}$$

$$a = 0,5 \text{ m/s}^2$$

$$i = 3\%$$

$$L = 1,8 \text{ m}$$

Tabela 12 – Exemplos numéricos para  $DMVC + t_{am} + t_{vl}$ , em interseções com 3% de acive, utilizando-se das Expressões (28), (29) e (31)

$W$ (m)	$\frac{v_p^2}{2(a \pm ig)} - L$ (m)	$DMVC + t_{am} + t_{vl}$ (s)	Expressão
10	40	12	(29)
15	40	14	
20	40	16	
25	40	17	
30	40	19	
35	40	20	
40	40	21	(31)
45	40	22	(28)

Utilizando a Tabela 12, segue um exemplo numérico da determinação do valor de  $DMVC$ , com os seguintes valores (interseção com 3% de acive):

$$W = 45 \text{ m}$$

$$t_{am} = 3 \text{ s (tempo de amarelo)}$$

$$t_{vl} = 4 \text{ s (tempo de vermelho de limpeza)}$$

Então:

$$DMVC = 22 - 3 - 4 = 15 \text{ s}$$

A Tabela 12 foi elaborada levando-se em conta que a aceleração resultante  $a_{res}$  em função do greide de 3% é:

$$a_{res} = a - ig = 0,5 - 3\% \times 9,8 = 0,21 \text{ m/s}^2$$

Entretanto, a Tabela 1 – Parâmetros de projeto para ciclistas (Table 12.1 – Design Parameters for Cyclists) do Manual inglês *Traffic Signs Manual – Chapter 6 – Traffic Control* (2019) [1] recomenda o valor de  $0,4 \text{ m/s}^2$  de aceleração para interseções com greide de 3%.

Utilizando o valor de  $0,4 \text{ m/s}^2$ , a Tabela 12 pode ser recalculada conforme a Tabela 13, utilizando-se dos seguintes valores:

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

$$v_p = 15 \text{ km/h (para aproximações com acive de 3\%)}$$

$$a = 0,4 \text{ m/s}^2 \text{ (para aproximações com acive de 3\%)}$$

$$L = 1,8 \text{ m}$$

**Tabela 13 – Exemplos numéricos para  $DMVC + t_{am} + t_{vl}$ , em interseções com 3% de acive, utilizando-se das Expressões (28), (29) e (31), com  $a = 0,4 \text{ m/s}^2$  (já considerando o acive de 3%)**

$W$ (m)	$\frac{v_p^2}{2a} - L$ (m)	$DMVC + t_{am} + t_{vl}$ (s)	Expressão
10	20	9	(29)
15	20	10	
20	20	11	(31)
25	20	13	(28)
30	20	14	
35	20	15	
40	20	16	
45	20	17	

Tomando o mesmo exemplo numérico da determinação do valor de  $DMVC$ , com os seguintes valores (interseção com 3% de acive):

$$W = 45 \text{ m}$$

$$t_{am} = 3 \text{ s (tempo de amarelo)}$$

$$t_{vl} = 4 \text{ s (tempo de vermelho de limpeza)}$$

Então:

$$DMVC = 17 - 3 - 4 = 10 \text{ s}$$

Observe que, no caso de acive de 3%, conforme o valor adotado para aceleração seja de 0,21 ou 0,4  $\text{m/s}^2$ , para uma interseção com  $W = 45 \text{ m}$ , o valor de  $DMVC$  variou de 15 s para 10 s, respectivamente.

### 3.4. Defasagem para ciclistas

No item 2.10 deste trabalho foi vista a implementação de onda verde para bicicletas em algumas cidades do mundo. A onda verde pode ser muito mais eficiente para bicicletas do que para veículos motorizados, pois geralmente não há conversões de vias transversais e não há fila remanescente do ciclo anterior (o escoamento das bicicletas é muito mais rápido). Nas cidades onde foi implementada a onda verde, em geral o resultado foi bastante benéfico para o fluxo de ciclistas, com redução de atraso e do número de paradas. Entretanto, como apontado no artigo apresentado no item 2.11, também há problemas que dificultam a obtenção de um bom resultado, tais como:

- Variabilidade da velocidade das bicicletas (em termos de tecnologia da bicicleta e da aptidão física dos ciclistas), além de fatores decorrentes do clima (vento, chuva etc). Devido ao baixo fluxo, a largura de banda das bicicletas pode ser muito estreita, de forma que qualquer desvio da velocidade pode fazer com que o ciclista fique fora da onda verde.
- Dificuldade de comunicação da velocidade de progressão da onda verde aos ciclistas. Além disso, pode ser difícil ao ciclista manter constante a velocidade ou fazer ajustes durante o percurso, devido à falta de velocímetro.
- Rotas compostas por trechos com greides distintos, com a necessidade de haver velocidades diferentes de progressão, o que torna as dificuldades para o ciclista ainda maiores.



Sempre é bom lembrar que, em geral, um benefício aos ciclistas pode ter impactos negativos para o transporte público e para os automóveis, gerando, além do aumento de atraso e número de paradas, maior emissão de poluentes e de poluição sonora. O benefício aos ciclistas deve ser suficientemente grande para compensar eventuais prejuízos aos outros usuários do sistema viário. Assim, uma progressão para os ciclistas somente deverá ser considerada quando o fluxo de ciclistas atingir um volume crítico, tal que o benefício gerado aos ciclistas seja maior que o custo causado aos demais usuários. Fluxos como os encontrados nas cidades do norte da Europa, como na Holanda e na Dinamarca, justificam plenamente a implementação de progressão específica para os ciclistas.

## 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base na pesquisa da literatura realizada na Seção 2, foi proposta uma metodologia para a temporização semafórica voltada para ciclistas na Seção 3.

A metodologia proposta prevê o dimensionamento de 3 parâmetros:

- Tempo de amarelo
- Tempo de vermelho de limpeza
- Duração mínima de verde para ciclistas (*DMVC*)

### 4.1. Tempo de amarelo

Foi visto que o tempo de amarelo dimensionado para veículos motorizados atende as necessidades dos ciclistas, não devendo sofrer nenhum ajuste. No caso de estágio exclusivo para ciclistas, foi apresentada a expressão matemática para o cálculo do tempo de amarelo necessário. Pelos exemplos numéricos apresentados, verifica-se que esse tempo de amarelo será da ordem de 3 a 4 segundos.

### 4.2. Tempo de vermelho de limpeza

Quanto ao dimensionamento do tempo de vermelho de limpeza, pela aplicação da metodologia proposta em exemplos numéricos verifica-se que, provavelmente, na maior parte dos casos pode ser necessário um tempo de vermelho de limpeza maior do que aquele dimensionado para os veículos motorizados. Nos casos de interseções largas e/ou em active o tempo de vermelho de limpeza resultante poderá ser excessivamente longo.

Deve-se ter em mente que o aumento do tempo de vermelho de limpeza irá gerar aumento do tempo de ciclo e atrasos para todos os usuários do sistema. Assim, deve-se avaliar com muito cuidado a implementação desse tempo adicional, ponderando os benefícios e os custos. Por exemplo, se o fluxo de ciclistas for de apenas 1 ciclista por hora, o benefício compensaria o custo do acréscimo desse tempo em todos os ciclos?

No item 3.2 é apresentado um método que fornece um critério para a implementação desse tempo adicional. O critério é baseado na definição de um parâmetro de projeto: número máximo admissível de ciclistas por ciclo que podem ser flagrados na zona de dilema. Em função desse número é determinado o fluxo mínimo de ciclistas, a partir do qual seria implementado o tempo adicional de vermelho de limpeza. Entretanto, esse método só é válido para interseções isoladas.

Uma alternativa seria limitar o acréscimo do tempo de vermelho de limpeza a um valor previamente definido. Por exemplo, o Manual canadense “OTM – *Bicycle Traffic Signals*” (2018) [4] sugere que o acréscimo seja limitado a 1 segundo.

O ideal é que sejam instalados detectores de bicicletas, de forma a estender o tempo de vermelho de limpeza apenas quando necessário, isto é, quando houver ciclistas na área de conflito da interseção<sup>15</sup>. Para tanto, é necessário que os controladores de tráfego estejam preparados para essa função, sendo que atualmente não se tem notícia da existência de controladores com essa função no mercado nacional.

---

<sup>15</sup> O conceito de área de conflito da interseção está ilustrado na Figura 20.

### 4.3. Duração mínima de verde para ciclistas – *DMVC*

As Tabelas 12 e 13 mostraram os valores para  $DMVC + t_{am} + t_{vl}$  para interseções com aclive de 3%, para larguras de interseção  $W$  variando de 10 a 45 m, considerando respectivamente a aceleração de  $0,21 \text{ m/s}^2$ , dada por  $(a - ig) = (0,5 - 3\% \times 9,8)$ , e a de  $0,4 \text{ m/s}^2$ , conforme valor recomendado pela Tabela 12.1 do Manual inglês Traffic Signs Manual – Chapter 6 – Traffic Control (2019) [1] para aclives de 3%.

A divergência dos valores dessas tabelas não significa que haja algum erro. Trata-se apenas de abordagens diferentes que resultam em valores distintos. Os valores dos parâmetros são o resultado de aspectos culturais e comportamentais. Valores recomendados em outros países não necessariamente são válidos no Brasil ou em São Paulo, ou mesmo em bairros diferentes de uma mesma cidade. Daí a importância de não se seguir de forma automática valores prontos ou tabelas previamente calculadas. Sempre que possível, deve-se validar os valores na prática, para verificar se são condizentes com a realidade do local em estudo. Por isso, o objetivo do presente trabalho sempre foi buscar os conceitos teóricos, com base nos quais são desenvolvidos critérios para permitir uma tomada de decisão a mais correta possível.

No caso específico da divergência dos valores das Tabelas 12 e 13, qual seria a forma de se fazer uma validação na prática? Uma possível resposta para esse caso é: fazer uma pesquisa expedita medindo-se em campo o tempo que o ciclista leva para sair da área de conflito da interseção a partir da linha de retenção saindo do repouso. A validação seria feita fazendo-se a comparação da média dos valores medidos em campo com os valores das Tabelas.

Pela aplicação da metodologia apresentada no item 3.3 em exemplos numéricos, verifica-se que, provavelmente, na maioria dos casos, o *DMVC* será inferior ao verde de segurança. Neste caso, nenhuma alteração precisará ser feita na duração do estágio. Entretanto, sempre é aconselhável efetuar os cálculos, fazendo-se as devidas validações, para garantir que o *DMVC* é menor que o verde de segurança.

Nos casos em que o *DMVC* é maior que o verde de segurança, deve-se garantir que a duração do tempo de verde do estágio seja no mínimo igual a *DMVC* em todos os planos.

### 4.4. Defasagem

Embora a metodologia apresentada na Seção 3 não tenha contemplada nenhuma proposta sobre a defasagem, vale destacar alguns tópicos importantes constatados na pesquisa feita na Seção 2.

A onda verde, embora não seja eficiente para veículos motorizados, pode gerar benefícios relevantes para as bicicletas. Na Seção 2 é apresentada a experiência na implementação de onda verde para bicicletas em algumas cidades.

O item 2.10.1 traz a experiência de Copenhague, que apresenta um alto fluxo de ciclistas, muitas vezes com fluxos de “congestionamento” (segundo “*Green Waves for Bicycles in Copenhagen*” (2016) [13], mais de 1/3 da população da cidade usa bicicleta). Apesar dos resultados positivos, foram constatadas algumas dificuldades, tais como a variação da velocidade dos ciclistas, principalmente devido à intensidade do fluxo (lentidão) e ao clima (neve, vento, chuva etc). Copenhague implementou uma segunda fase do projeto, com a implantação de detectores, de forma a estender o verde para ciclistas atrasados (em relação à onda verde).

O item 2.10.3 apresenta a experiência em Rotterdam, onde foi implementado o projeto “*Evergreen*”. Nesse projeto, os ciclistas podem ajustar a sua velocidade verificando os LEDs implantados junto à via. Essa sinalização indica ao ciclista

que está adiantado (em relação à onda verde) que ele precisa reduzir a velocidade, enquanto indica ao ciclista que está atrasado (em relação à onda verde) que ele precisa acelerar.

O item 2.10.4 reporta a experiência de Melbourne, que apresenta trechos com diferentes relevos, implicando em velocidades distintas de progressão da onda verde.

O item 2.11 apresenta o artigo (Taylor *et al*) *Coordinating Traffic Signals for Bicycle Progression* (2000) [20], com uma análise das interações entre a progressão dos automóveis e bicicletas. Por esse artigo, pode-se verificar basicamente que:

- A largura de banda para bicicletas pode ser bastante estreita, de forma que qualquer variação da velocidade fará com que o ciclista fique fora da banda.
- Um benefício na progressão para bicicletas gera um aumento no atraso dos automóveis, e vice-versa.

Embora o artigo não trate especificamente de transporte coletivo, pode-se estender a argumentação da análise para o transporte público, isto é, uma melhoria na progressão das bicicletas pode refletir em uma piora do desempenho operacional do transporte público.

Novamente, a decisão de se implementar uma defasagem ótima para bicicletas precisa ser tomada avaliando os benefícios e os custos gerados. Para cidades como Copenhagen, onde o fluxo de ciclistas representa um percentual bastante significativo em relação ao fluxo dos demais modais, não há dúvidas de que o benefício da progressão para bicicletas se justifica. Para fluxos de ciclistas menos significativos, é necessária uma análise bastante criteriosa, devendo-se ter consciência do impacto dos custos a serem gerados a todos os usuários, incluindo passageiros do transporte coletivo e pedestres.

## 5. BIBLIOGRAFIA

- [1] *Traffic Signs Manual – Chapter 6 – Traffic Control* (2019). Published for the Department for Transport under Licence from the Controller of Her Majesty's Stationery Office. [Arquivo: 2745]  
[https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment\\_data/file/851465/dft-traffic-signs-manual-chapter-6.pdf](https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/851465/dft-traffic-signs-manual-chapter-6.pdf)
- [2] AASHTO. *Guide for the Development of Bicycle Facilities* (2012), 4th ed. Washington, D.C., [Arquivo: 2910]  
<https://njdotlocalaidrc.com/perch/resources/aashto-gbf-4-2012-bicycle.pdf>
- [3] *Urban Bikeway Design Guide. National Association of City Transportation Officials – NACTO* (2011)  
<http://www.c4cguide.org/>. [Arquivo: 2574]
- [4] *Bicycle Traffic Signals – Ontario Traffic Manual – Book 12A – March 2018* [Arquivo: 2936]
- [5] *Guidelines for Determining Traffic Signal Change and Clearance Intervals – An ITE Proposed Recommended Practice* (2015) [Arquivo: 2062]
- [6] *Traffic Control Devices Handbook, 2nd Edition – ITE* (2013)
- [7] Wachtel, A., J. Forester, and D. Pelz. *Signal Clearance Timing for Bicyclists*. *ITE Journal*, Vol. 65, No. 3, 1995, pp. 38–45. [Arquivo: 1045]
- [8] Taylor, Dean B. *Analysis of Traffic Signal Clearance Interval Requirements for Bicycle-Automobile Mixed Traffic*. *Transportation Research Record* 1405 (1993) [Arquivo: 918]
- [9] Ming, Sun Hsien. Dimensionamento do Entreverdes: Uma Abordagem Probabilística, Nota Técnica 212. Companhia de Engenharia de Tráfego – CET-SP.  
<http://www.cetsp.com.br/media/20797/nt212.pdf>
- [10] Thompson, S. R., C. M. Monsere, M. Figliozzi, P. Koonce, and G. Obery. *Bicycle-Specific Signals: Results from a State-of-the-Practice Review*. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 2387, 2013, pp. 1–9. [Arquivo: 919]
- [11] *California Manual on Uniform Traffic Control Devices*. California Department of Transportation, Sacramento, 2012
- [12] *Bike Intersection Design – Seattle Streets Illustrated* (2017) [Arquivo: 2882]  
<https://streetsillustrated.seattle.gov/design-standards/bicycle/bike-intersection-design/>
- [13] *Green Waves for Bicycles in Copenhagen*, 08 April 2016  
<https://www.centreforpublicimpact.org/case-study/green-waves-bicycles-copenhagen/>  
Acesso: 12/07/2021
- [14] Buczynski, Aleksander. *Green Wave for Cyclists*. 10 September 2018  
<https://ecf.com/news-and-events/news/green-wave-cyclists>  
Acesso: 12/07/2021
- [15] *The Green Waves of Copenhagen*. 05 August 2014  
<http://www.copenhageneize.com/2014/08/the-green-waves-of-copenhagen.html>  
Acesso: 12/07/2021
- [16] *News from Amsterdam – Green Wave for Cyclists Tested*. 08 November 2007  
[https://www.nieuwsuitamsterdam.nl/English/2007/11/green\\_wave.htm](https://www.nieuwsuitamsterdam.nl/English/2007/11/green_wave.htm)  
Acesso: 12/07/2021

- [17] Hembrow, David. "Evergreen" – *A New Kind of Green Wave for Cyclists*. 08 March 2010  
<http://www.aviewfromthecyclepath.com/2010/03/evergreen-new-kind-of-green-wave-for.html>  
Acesso: 12/07/2021
- [18] Macmichael, Simon. *Video: Rotterdam to Get Green Wave System to Help Cyclists Beat the Lights*. 09 March 2010  
<https://road.cc/content/news/15440-video-rotterdam-get-green-wave-system-help-cyclists-beat-lights-video>  
Acesso: 14/07/2021
- [19] Neef, Matt De. *How 'Green Waves' Can Make City Riding Better – Melbourne*. 14 February 2019  
<https://cyclingtips.com/2019/02/how-green-waves-can-make-inner-city-cycling-safer-and-more-efficient/>  
Acesso: 12/07/2021
- [20] Taylor, Dean B.; Mahmassani, Hani S. *Coordinating Traffic Signals for Bicycle Progression*. Transportation Research Record 1705, Paper No. 00-0280, 2000 [Arquivo: 967]
- [21] Newell, G. F. *Theory of Highway Traffic Signals. Report UCB-ITS-RR89-7*. Institute of Transportation Studies, University of California, Berkeley, 1989. [Arquivo: 4126]
- [22] Taylor, D. *Contributions to Bicycle-Automobile Mixed-Traffic Science: Behavioral Models and Engineering Applications*. Ph.D. Dissertation. University of Texas, Austin, 1998.
- [23] Taylor, Dean Brantley; Mahmassani, Hani S. *Behavioral Models and Characteristics of Bicycle-Automobile Mixed-Traffic: Planning and Engineering Implications*. Research Report SWUTC/98/60056-1. Center for Transportation Research University of Texas at Austin. October 1998.
- [24] Manual Brasileiro de Sinalização de Trânsito – Volume V, Sinalização Semafórica. Conselho Nacional de Trânsito – CONTRAN, 2014