

REPROGRAMAÇÃO DE
SEMÁFOROS

MÉTODO DE OBSERVAÇÃO
DE CAMPO

Eng. SERGIO EJZENBERG
São Paulo/SP, 2005

REPROGRAMAÇÃO DE SEMÁFOROS

MÉTODO DE OBSERVAÇÃO DE CAMPO

ÍNDICE	2
APRESENTAÇÃO	3
1. INTRODUÇÃO	4
1.1 ESSÊNCIA DO MÉTODO DE OBSERVAÇÃO DE CAMPO	4
1.2 CONCEITOS BÁSICOS	5
2. TRATAMENTO DE APROXIMAÇÕES OCIOSAS	8
2.1 DEFINIÇÕES	8
2.2 MEDIDA DA OCIOSIDADE EM APROXIMAÇÕES	9
2.3 CÁLCULO DA OCIOSIDADE EM APROXIMAÇÕES	9
2.4 CÁLCULO DO TEMPO DE VERDE MÍNIMO	10
3. TRATAMENTO DE APROXIMAÇÕES CONGESTIONADAS	11
3.1 DEFINIÇÕES E CONCEITOS	11
3.2 MEDIDA DO CONGESTIONAMENTO EM APROXIMAÇÕES	12
3.3 CÁLCULO DO TEMPO DE VERDE ADICIONAL	12
3.4 CÁLCULO DO TEMPO DE VERDE MÍNIMO	13
4. GRAU DE SATURAÇÃO DE CRUZAMENTOS	14
4.1 TAXA DE OCUPAÇÃO DE APROXIMAÇÕES	14
4.2 CÁLCULO DO GRAU DE SATURAÇÃO DE UM SEMÁFORO	14
4.3 DIAGRAMA DE FLUXO DE SATURAÇÃO EM SEMÁFORO	16
4.4 TEMPO PERDIDO DE WEBSTER	19
5. CÁLCULO DOS NOVOS TEMPOS DE CICLO E DE VERDE	21
5.1 TEMPO DE ENTREVERDE NO CICLO E NA HORA	21
5.2 TEMPO DE CICLO MÍNIMO	22
5.3 TEMPO DE CICLO ÓTIMO	23
5.4 ESCOLHA DO TEMPO DE CICLO DO SEMÁFORO	25
6. CÁLCULO DOS TEMPOS DE VERDE DO SEMÁFORO	26
7. DETERMINAÇÃO DOS ENTREVERDES	27
7.1 TEMPO DE AMARELO	27
7.2 TEMPO DE VERMELHO GERAL PARA VEÍCULOS	28
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	29
9. ANEXOS	30



REPROGRAMAÇÃO DE SEMÁFOROS MÉTODO DE OBSERVAÇÃO DE CAMPO

APRESENTAÇÃO

Manter os semáforos com temporização adequada aos fluxos variáveis de tráfego é uma das muitas dificuldades com que se defrontam os responsáveis pelos órgãos de gestão do tráfego das cidades.

O aumento dos fluxos de tráfego, decorrente do próprio desenvolvimento urbano, por si só está a demandar a reprogramação dos tempos dos semáforos, que devem ter seus tempos reajustados com intervalo desejável de 1 ano.

Paralelamente vem se intensificando nos últimos anos a substituição dos arcaicos controladores de programação única, por controladores eletrônicos que comportam múltiplos planos, capazes de assim atender às variações dos fluxos de tráfego.

Desta forma, o método proposto se constitui na reengenharia do trabalho de elaborar grande quantidade de planos semaforicos. Muito mais que uma ferramenta teórica adicional de cálculo, trata-se de uma metodologia de trabalho que, **dispensando pesquisas de fluxos de tráfego (“contagens”) e sem requerer cálculo de fluxos de saturação (“capacidade”)**, possibilitará resultados rápidos e com alta qualidade.



1. INTRODUÇÃO

1.1 ESSÊNCIA DO MÉTODO DE OBSERVAÇÃO DE CAMPO

Todos os métodos tradicionais de cálculo de semáforos demandam como insumo básico os fluxos de saturação e os fluxos veiculares, e frequentemente requisitam também os fluxos direcionais, a composição do tráfego, largura das aproximações, existência de estacionamento e pontos de ônibus, declividade das vias, etc.

É prática comum obter-se apenas os **fluxos veiculares** das aproximações, não direcionais nem classificados, arbitrando-se o restante dos insumos, na medida em que são de obtenção demorada e onerosa.

Os resultados assim obtidos são imprecisos, necessitando posteriormente de "**ajustes**" em campo, num procedimento em que **alterações de ciclos e de tempos de verde se sobrepõe e se atrapalham**, e cuja consequência mais frequente é o aumento descontrolado dos tempos de ciclo.

Pelo método que ora propomos, a temporização dos semáforos é tratada como sendo o resultado da interação do tráfego, da vias (**aproximações**) que concorrem para o cruzamento, e dos tempos existentes no semáforo que se quer reprogramar.

O resultado dessa interação pode ser observado na forma de **Aproximações Congestionadas** (nas quais o tempo verde é insuficiente) ou **Aproximações Ociosas** (que apresentam tempo de verde em excesso).

A quantificação dessas observações de campo, com a sistemática que a seguir se explicitará, é o sucedâneo dos tradicionais e custosos levantamentos de dados, e que desta forma se tornam desnecessários.

A essência do método proposto é a **transformação das observações de campo em tempos semaforicos**, nascendo daí o nome deste novo procedimento de cálculo: "**Reprogramação de Semáforos pelo Método de Observação de Campo**".

1.2 CONCEITOS BÁSICOS

1.2.1 Sinalização Semafórica

A **Sinalização Semafórica** compõe-se de luzes acionadas alternada ou intermitentemente, através de mecanismos eletromecânicos ou eletrônicos, cuja função é controlar os deslocamentos de pedestres e veículos.

É composta por **Semáforos**, definidos por sua vez como sendo o conjunto de **Grupos Focais** (formados por **Focos** nas cores verde, amarelo e vermelho), e seus respectivos suportes, instalados numa interseção ou seção de via.

1.2.2 Aproximação

Aproximação é o trecho de via pelo qual os veículos atingem o semáforo.

1.2.3 Movimentos

Movimento Veicular é o nome que se dá ao fluxo de veículos com mesma origem e destino. Os movimentos veiculares podem ser **conflitantes** (quando não podem ocorrer simultaneamente num semáforo), e **não-conflitantes** (quando podem ocorrer simultaneamente).

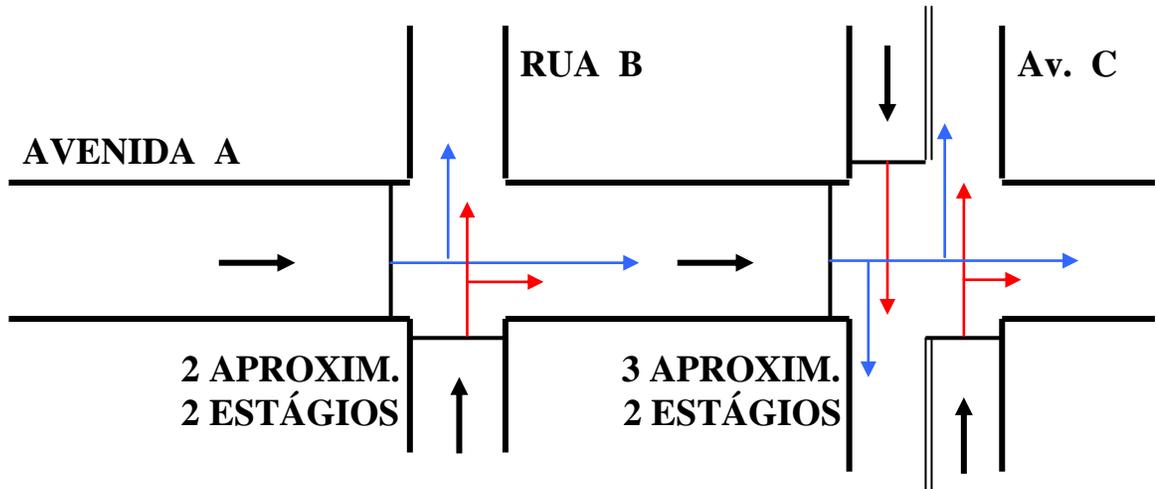
Excepcionalmente pode-se ter movimentos conflitantes num mesmo estágio, recebendo a denominação de **movimentos conflitantes compatíveis**. Esta é uma situação empregada em algumas cidades (ex.: São Paulo-SP), mas que não é admitida em outras (ex.: Salvador-BA e Belo Horizonte-MG).

A vantagem da adoção do conceito de **movimentos conflitantes compatíveis** é a redução do número de estágios, amparando-se esta medida nas Regra Geral de Circulação que confere **preferência de passagem ao veículo que vier pela direita**, conforme consta do Artigo 29 – Inciso III, letra c, do CTB –Código de Trânsito Brasileiro.(lei nº 9.503/97).

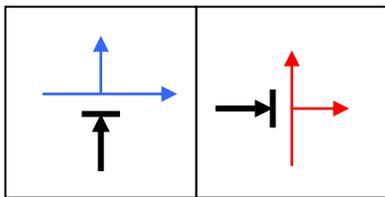
Movimento de Pedestres é a designação de um fluxo de pedestres de mesma direção, independentemente do sentido.



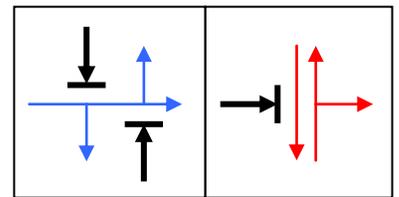
CONCEITOS BÁSICOS



DIAGRAMAS DE ESTÁGIOS

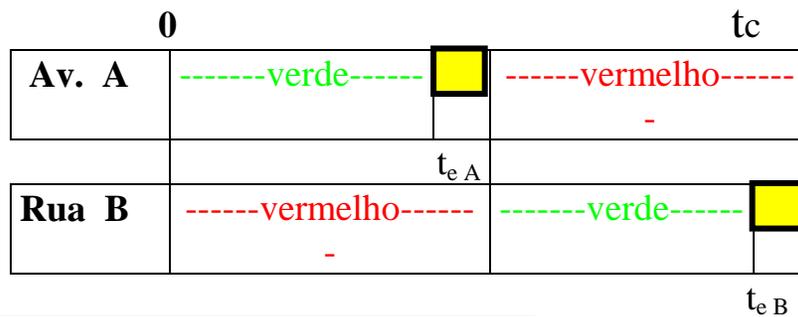


CRUZAMENTO A x B



CRUZAMENTO A x C

DIAGRAMA DE TEMPOS



$$t_c = t_{vA} + t_{eA} + t_{vB} + t_{eB}$$

$$t_{e/c} = t_{eA} + t_{eB}$$

$$t_c = t_{vA} + t_{vB} + t_{e/c}$$

$t_{eA,B}$ = [Amarelo] ou [Amarelo + Vermelho] = amarelo ou amar. + verm. geral

1.2.4 Estágio, Diagramas de Estágios e de Tempos, e Ciclo

Estágio é o nome dado ao intervalo de tempo no qual um conjunto de movimentos não-conflitantes recebe o direito de passagem.

Diagrama de Estágios é a representação gráfica dos movimentos nos estágios.

Diagrama de Tempos é a representação gráfica dos intervalos de tempo do ciclo.

Ciclo é o tempo necessário para a sequência completa dos estágios.

1.2.5 Entreverde

Entreverde é a designação do intervalo entre os tempos de verde de dois estágios consecutivos, necessário para que a transição entre ambos ocorra com segurança.

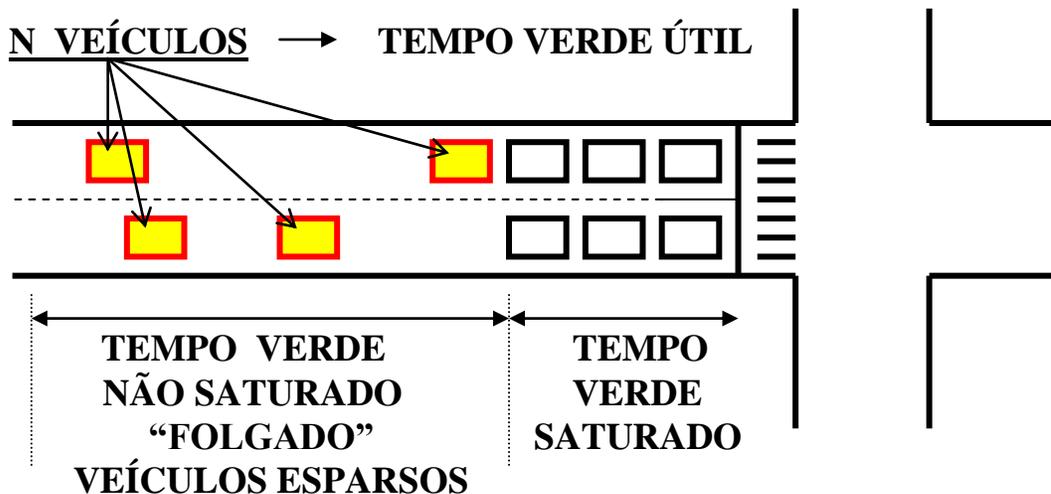
Normalmente o entreverde corresponde ao **Tempo de Amarelo** dos grupos focais veiculares, ou ao **Tempo de Vermelho Piscante** dos grupos focais de pedestres.

Em algumas situações se adiciona um **Tempo de Vermelho de Segurança** (“vermelho geral”) após o Amarelo Veicular ou um **Tempo Vermelho Piscante de Pedestres**, quando estes não são suficientes para garantir a segurança na transição dos respectivos estágios.



2. TRATAMENTO DE APROXIMAÇÕES OCIOSAS

VERDE SOBRANDO AO FINAL DA FILA



2.1 DEFINIÇÕES E CONCEITOS

Aproximação Ociosa é aquela que é identificada por apresentar “verde sobrando ao final da fila”, tratando-se assim de **tempo de verde não saturado** - $t_{v\ ns}$ (também chamado de **tempo de verde folgado**).

Como durante o $t_{v\ ns}$ existem veículos passando pela aproximação, conclui-se que é formado por duas parcelas:

- **tempo verde ocioso** - $t_{v\ oc}$, que corresponde ao tempo de verde efetivamente desperdiçado na aproximação.
- **tempo verde útil** - $t_{v\ util}$, necessário para os veículos que passam pelo cruzamento durante o tempo de verde não saturado.

$$t_{v\ ns} = t_{v\ oc} + t_{v\ util}$$

$$t_{v\ oc} = t_{v\ ns} - t_{v\ util}$$



2.2 MEDIDA DA OCIOSIDADE EM APROXIMAÇÕES

A **medida da ociosidade** das aproximações é feita por meio da seguinte técnica:

- Cronometragem do **tempo de verde não saturado** em campo, junto ao semáforo que se quer reprogramar. **Inicia-se a cronometragem** no instante em que começam a surgir brechas na corrente de tráfego junto à faixa de retenção, em qualquer das faixas de rolamento da aproximação em observação. **Para-se a cronometragem** no instante em que termina o tempo de verde observado.
- Contagem do **número “N” de veículos (equivalentes)** que passam pelas **“n” faixas de rolamento da aproximação**, desde o instante do disparo do cronômetro até o final da movimentação (incluindo também os veículos que passam no tempo amarelo, independentemente do fato do cronômetro estar parado).

Considerando-se a **aleatoriedade dos fluxos de tráfego**, para cada plano de tráfego que se pretenda implantar no semáforo deve-se coletar dados relativos a **10 medições de ociosidade por aproximação**, trabalhando-se com a média aritmética dessas medidas feitas em campo.

2.3 CÁLCULO DA OCIOSIDADE EM APROXIMAÇÕES

O **cálculo da ociosidade** é feito com a adoção do Fluxo de Saturação de **1800 veic/h** por faixa de rolamento de tráfego, o que equivale a adotar **2 segundos como sendo o tempo necessário para que cada veículo passe pela retenção da aproximação, por faixa de rolamento** ($3600 \text{ s/h} / 1800 \text{ veic/h} = 2 \text{ s/veic}$).

Desta forma obtém-se :

$$t_{v \text{ util}} = N/n \cdot 2 \text{ s/veic}$$

$$t_{v \text{ oc}} = t_{v \text{ ns}} - t_{v \text{ util}} = t_{v \text{ ns}} - N/n \cdot 2 \text{ s/veic}$$

$$t_{v \text{ oc}} = t_{v \text{ ns}} - N/n \cdot 2 \text{ s/veic}$$



2.4 CÁLCULO DO TEMPO DE VERDE MÍNIMO

Tendo-se determinado $t_{v\ oc}$ - tempo verde ocioso, basta subtraí-lo do t_v - tempo de verde existente no semáforo para se obter o $t_{v\ min/c}$ - tempo verde mínimo por ciclo da aproximação ociosa:

$$t_{v\ min/c} = t_v - t_{v\ oc}$$

O tempo de verde mínimo por ciclo - $t_{v\ min/c}$ assim calculado refere-se ao tempo de ciclo existente - t_c .

Para o cálculo do novo tempo de ciclo do semáforo (item 5.1 e 5.2), será necessário obter o tempo verde mínimo da aproximação na hora - $t_{v\ min/h}$.

Desta forma o tempo verde mínimo da aproximação na hora - $t_{v\ min/h}$ pode ser obtido multiplicando-se o $t_{v\ min/c}$ pelo número de ciclos existente na hora, sendo que o número de ciclos na hora é obtido dividindo-se 3600 s/h por t_c :

$$t_{v\ min/h} = t_{v\ min/c} \times n^\circ \text{ existente de ciclos na hora}$$

$$t_{v\ min/h} = t_{v\ min/c} \cdot 3600 / t_c$$

Deve-se atentar para o fato de que o $t_{v\ min/h}$ (ao contrário do $t_{v\ min/c}$) **independe do tempo de ciclo**. O $t_{v\ min/h}$ é função apenas das características do fluxo veicular - F e do fluxo de saturação - F_s da aproximação em estudo.



3. TRATAMENTO DE APROXIMAÇÕES CONGESTIONADAS

FILA SOBRANDO AO FINAL DO TEMPO VERDE

3.1 DEFINIÇÕES e CONCEITOS

Definimos **Aproximação Congestionada** como aquela que apresenta “**fila sobrando ao final do tempo verde**”. O congestionamento decorre da insuficiência do tempo de verde da aproximação, para dar vazão ao fluxo veicular existente.

O congestionamento começa a se formar no início do “período de pico do tráfego” e sua extensão aumenta à medida que transcorre esse “pico”, atingindo um comprimento máximo, e passando então a diminuir até o final do pico.

A fila que se forma é assim composta:

- **Fila Máxima** é máxima extensão da fila na aproximação congestionada. Essa fila engloba as duas diferentes partes a seguir caracterizadas.
- **Fila Normal** - é a fila que passa na aproximação a cada tempo de verde.
- **Fila Congestionada** - é o congestionamento decorrente do tempo de verde existente insuficiente.

A partir das Filas Normal e Máxima, obtemos a Fila Congestionada:

$$\text{Fila Congestionada} = \text{Fila Máxima} - \text{Fila Normal}$$

Adotaremos **2 horas** como valor usual para a **duração do período de pico**, metade do qual (1 h) corresponde ao **tempo de formação de fila**, correspondendo a outra metade (1 h) ao **tempo de destruição de fila**, conforme consta do item 3.2 .

Caso nos deparemos com períodos de pico com duração diferente de 2 h, o cálculo descrito no item 3.2 deverá ser adaptado, considerando-se a **metade do número de ciclos do período de congestionamento considerado**.

3.2 MEDIDA DO CONGESTIONAMENTO EM APROXIMAÇÕES

A **aproximação congestionada** apresentará uma fila que crescerá até um máximo e depois se desmanchará ao longo do período de pico de tráfego que se está estudando.

A **Fila Máxima** deverá então ser constatada visualmente na aproximação, podendo ser medida medida através de **trena**, ou por **diferença de altura numérica na via**, por **passo duplo aferido**, ou mesmo por **contagem de guias**.

A **Fila Normal** é constatada e medida na aproximação, da mesma forma que a Fila Congestionada, ou então pode ser calculada adotando-se os parâmetros para o fluxo de tráfego já anteriormente utilizados, a saber:

- **Intervalo entre Veículos = 2 s/veic** (equivale a **1800 veic / h** por faixa);
- **Ocupação por veículo (equivalente) parado em congestionamento = 6 m / veic**

Assim a **Fila Normal** poderá ser calculada pela seguinte fórmula, onde **tv** é o tempo de verde da aproximação considerada:

$$\text{Fila Normal} = (t_v / 2 \text{ s/veic}) \cdot 6 \text{ m/veic}$$

$$\text{Fila Congestionada} = \text{Fila Máxima} - (t_v / 2 \text{ s/veic}) \cdot 6 \text{ m/veic}$$

3.3 CÁLCULO DO TEMPO DE VERDE ADICIONAL

É necessário que a aproximação congestionada receba um **tempo de verde adicional na hora** - $\dot{t}_{v \text{ adic}}/h$, para que não se forme o congestionamento.

Usando-se os parâmetros para o fluxo de tráfego anteriormente definidos (2 segundos/veic por faixa de rolamento e 6 m/veic), **pode-se transformar a Fila Congestionada em tempo de verde adicional na hora**, conforme segue:

$$t_{v \text{ adic}} / h = (\text{Fila Congestionada} / 6 \text{ m/veic}) \cdot 2 \text{ s/veic}$$



3.4 CÁLCULO DO TEMPO DE VERDE MÍNIMO

Tendo-se $t_{v \text{ adic/h}}$, pode-se determinar o **tempo de verde mínimo na hora**- $t_{v \text{ min/h}}$ da aproximação congestionada, bastando somar-se $t_{v \text{ adic/h}}$ ao **tempo de verde existente na aproximação na hora** - $t_{v \text{ exist/h}}$ (lembrando sempre que t_c e t_v são respectivamente os tempos de ciclo e de verde da aproximação):

$$t_{v \text{ exist/h}} = t_v \cdot 3600 / t_c$$

$$t_{v \text{ min/h}} = t_{v \text{ adic/h}} + t_{v \text{ exist/h}}$$

O $t_{v \text{ min/h}}$ é função apenas do Fluxo Veicular e do Fluxo de Saturação da aproximação, independentemente do ciclo.

Tendo-se $t_{v \text{ min/h}}$ pode-se também calcular o **$t_{v \text{ min/c}}$ - tempo de verde mínimo no ciclo** da aproximação congestionada, bastando para isto dividir $t_{v \text{ min/h}}$ pelo número de ciclos existente na hora:

$$t_{v \text{ min/c}} = t_{v \text{ min/h}} / (3600 / t_c)$$

4. GRAU DE SATURAÇÃO DE CRUZAMENTOS

4.1 TAXA DE OCUPAÇÃO DE APROXIMAÇÕES

Para analisar o Grau de Saturação de um cruzamento dotado de semáforo, deve-se primeiramente definir o conceito de **saturação ou ocupação das aproximações do cruzamento**, conceito este que é quantificado pela **taxa de ocupação da aproximação**.

Definiremos **F** como sendo o **fluxo veicular horário** da aproximação (também conhecido como “**volume**”), e **F_S** como sendo o **fluxo de saturação por hora verde** da mesma aproximação (chamado também de “**capacidade**”).

A **taxa de ocupação - y_i** de uma aproximação é então definida como a razão entre seu **Fluxo Veicular - F** e seu **Fluxo de Saturação - F_S**.

$$y_i = \frac{F_i}{F_{S_i}}$$

4.2. CÁLCULO DO GRAU DE SATURAÇÃO DE UM SEMÁFORO

O **Grau de Saturação - Y** de um cruzamento dotado de semáforo é a soma das **taxas de ocupação - y_i** das aproximações críticas (mais saturadas) de cada estágio veicular desse semáforo.

Matematicamente representamos **Y** através da seguinte fórmula:

$$Y = \sum y_i$$

O **grau de saturação do cruzamento - Y** é insumo obrigatório para o cálculo do tempo de ciclo do semáforo (vide item 5 adiante).

A seguir iremos desenvolver um raciocínio físico, juntamente com algumas operações matemáticas simples, para a obtenção de **Y**, **sem necessidade dos valores dos fluxos e dos fluxos de saturação das aproximações**.



Na **condição crítica do ciclo mínimo** do semáforo, a capacidade de escoamento por ciclo (fluxo que pode passar) é igual à demanda por ciclo (fluxo que quer passar), em todas as aproximações do semáforo, ou seja:

FLUXO QUE QUER PASSAR = FLUXO QUE PODE PASSAR

$$F_i \cdot t_{c \text{ min}} = F_{si} \cdot t_{vi \text{ min}}$$

$$\frac{F_i}{F_{si}} = \frac{t_{vi \text{ min}}}{t_{c \text{ min}}}$$

O **Primeiro Termo** da proporção acima é igual a y_i - taxa de ocupação da aproximação i . O **Segundo Termo** da mesma proporção, multiplicando-se numerador e denominador pelo **Nº de Ciclos Mínimos na Hora**, torna-se igual a $t_{v \text{ min}}/h / 3600$.

Aplicando as Propriedades das Proporções em ambas frações consideradas:

$$Y = \sum t_{v \text{ min}}/h / 3600$$

Verifica-se desta forma que o **Método de Observação de Campo** possibilita a obtenção do **Grau de Saturação de Cruzamentos com Semáforos** ($Y = \sum y_i$), dispensando-se as contagens veiculares, bem como os levantamentos de capacidade viária, entre outros.

Por sua vez, o conhecimento do Grau de Saturação de Cruzamentos do sistema viário é de enorme valia para, entre outros, os seguintes trabalhos:

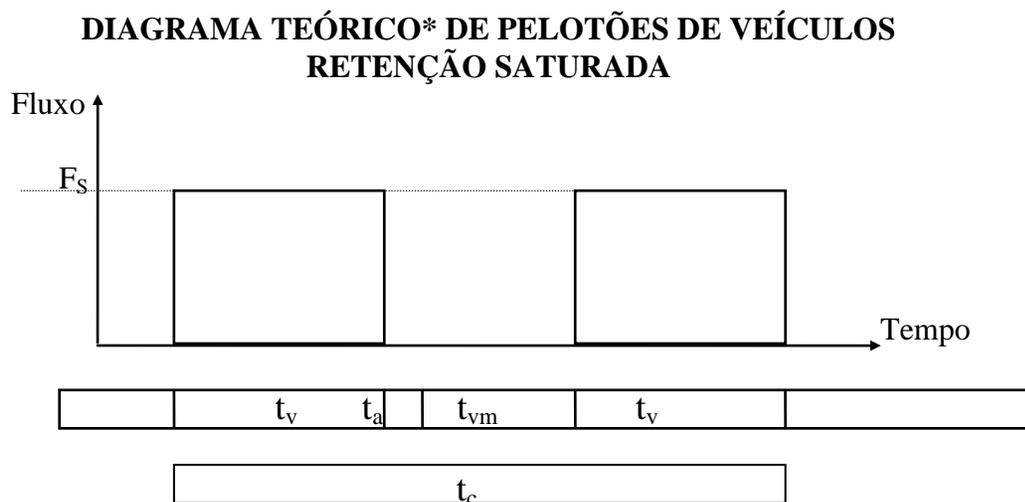
- Avaliação do impacto de mudanças de circulação;
- projetos de Engenharia de Tráfego em Áreas (“Projetos de Área”);
- Análise de Corredores de Tráfego;
- Diagnóstico de Pontos Congestionados.

4.3. DIAGRAMA DE FLUXO DE SATURAÇÃO EM SEMÁFORO

PELOTÕES TEÓRICOS DE VEÍCULOS NUM SEMÁFORO

Sendo **capacidade** (ou fluxo de saturação) o número máximo de veículos que passa por uma aproximação na unidade de tempo, num semáforo a capacidade é representada pelo fluxo máximo de saída do pelotão de carros retidos durante o “tempo vermelho”.

Quando uma aproximação recebe o direito de passagem no semáforo (“tempo verde”), os veículos que estavam retidos partem em pelotão compacto; quando termina o direito de passagem cessa o movimento. Desta forma o comportamento do fluxo, teoricamente, seria descrito pelo figura abaixo:



Onde aparecem: t_c = tempo de ciclo
 t_v = tempo verde de foco luminoso
 t_a = tempo amarelo de foco luminoso
 t_{vm} = tempo vermelho de foco luminoso
 F_s = fluxo de saturação ou “capacidade” da aproximação

(*) Aproximação carregada (caixa cheia), sem bloqueio à frente, sem considerar os tempos de reação e percepção dos condutores.



O diagrama anterior, teórico, não corresponde à realidade da movimentação veicular, pois não leva em conta dois fatores que determinam o comportamento do fluxo num semáforo:

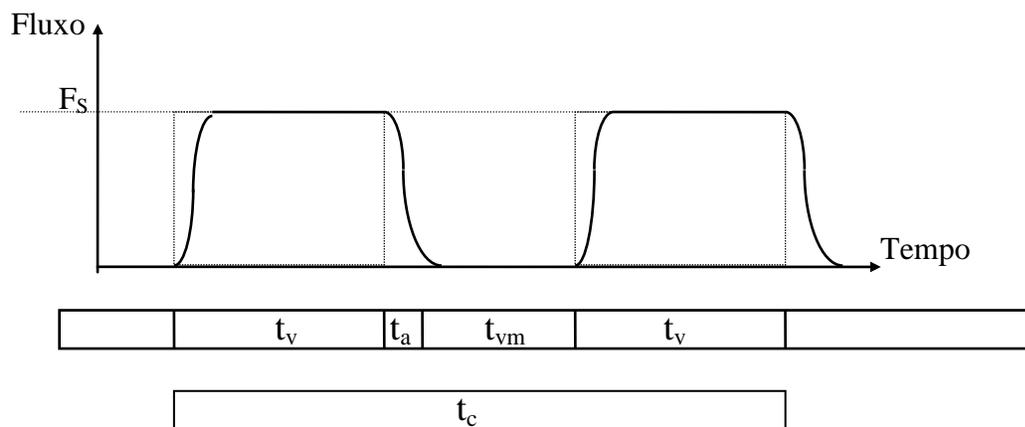
- aceleração dos veículos na saída (início do tempo verde de foco)
- tempo de percepção e de reação dos motoristas.

COMPORTAMENTO REAL DOS PELOTÕES DE VEÍCULOS EM SEMÁFOROS

O diagrama de operação real do fluxo de uma aproximação semaforizada apresenta variações graduais de fluxo, manifestando retardo com relação aos tempos do semáforo.

Supondo-se, para simplificar o diagrama, que durante toda a movimentação de veículos a caixa do semáforo estava cheia, e que não havia bloqueio à frente, tem-se a situação de saturação da aproximação. O diagrama apresenta o seguinte aspecto:

DIAGRAMA REAL* DA SAÍDA DE VEÍCULOS RETENÇÃO SATURADA



(*) Situação de operação com caixa cheia, sem bloqueio à frente.

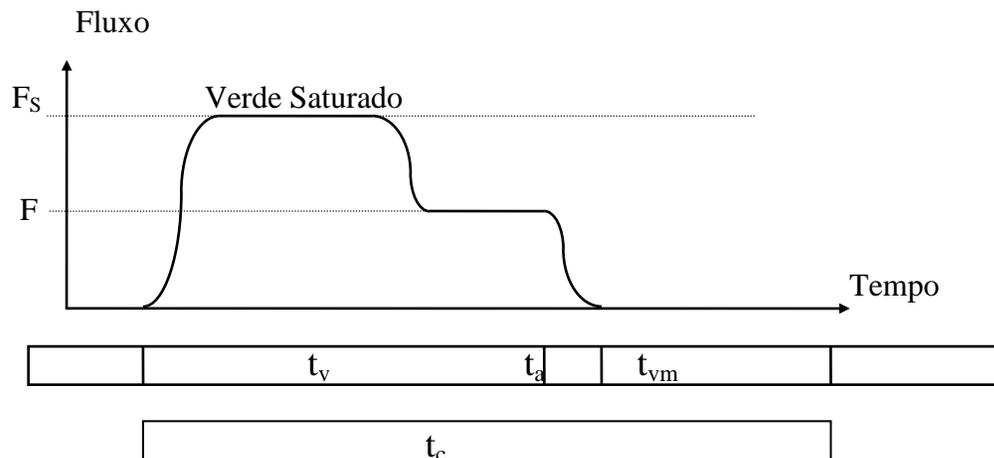
O **início da movimentação** é retardado pelo tempo de reação dos motoristas e pela aceleração dos veículos, fazendo com que o fluxo aumente gradualmente de **zero** até atingir a **capacidade** da aproximação.

O **final da movimentação** (início do tempo amarelo de foco) também é retardado pelo tempo de reação dos motoristas, com o fluxo caindo gradualmente da **capacidade** até **zero**.

Percebe-se, portanto, no diagrama de operação, que existe perda de tempo de verde no início da movimentação, com o fluxo abaixo da capacidade durante um certo tempo. Já no final da movimentação existe um tempo aproveitado além do tempo verde de foco.

No diagrama anterior foi suposto que durante toda a movimentação de veículos o fluxo era igual à capacidade (situação de saturação da aproximação). Caso a aproximação **não** esteja saturada, o diagrama apresenta o seguinte aspecto:

DIAGRAMA REAL* DA SAÍDA DE VEÍCULOS RETENÇÃO NÃO SATURADA



Onde:

F_s = capacidade de aproximação = fluxo de saturação

F = fluxo veicular = fluxo de chegada na aproximação = volume horário

4.4. TEMPO PERDIDO DE WEBSTER

O t_p = **tempo perdido** de Webster é o tempo sem movimentação veicular no semáforo. É o resultado da combinação dos seguintes fatores:

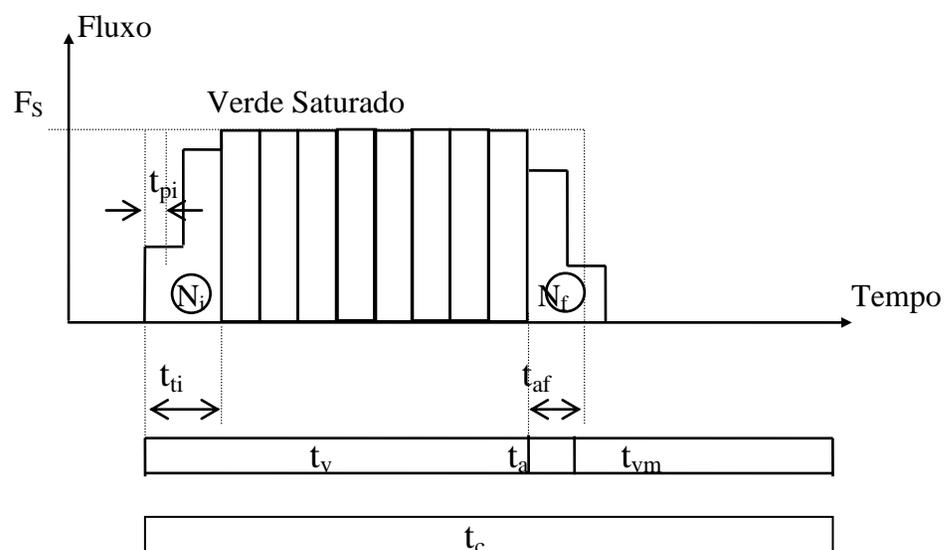
- tempos de entreverde (amarelo, vermelho geral, e tempos de pedestres).
- tempos perdidos e aproveitados sobre os entreverdes.

Devido ao comportamento do fluxo de tráfego no semáforo, existe um “tempo perdido no início” do tempo verde de foco, e um “tempo aproveitado no final” do tempo verde.

Na prática de campo, estes tempos podem ser obtidos mediante contagens de veículos nas retenções dos movimentos críticos dos diversos estágios do semáforo. Essas contagens são feitas em base de tempo extremamente curta - veículos / 5 segundos - com medições feitas durante o tempo verde saturado do semáforo.

As medições são feitas no mínimo 10 vezes para cada retenção, para compensar as aleatoriedades do fluxo de tráfego. Os resultados obtidos permitem desenhar os diagramas de fluxo. “Retangularizando-se” os diagramas de fluxo de cada aproximação podemos calcular os tempos perdidos e aproveitados supra referidos, tal como aparece na figura a seguir:

HISTOGRAMA TÍPICO NUMA RETENÇÃO DE SEMÁFORO



Onde: N_i = número de veículos que passa pela retenção da aproximação em estudo, até que se atinja a capacidade.

N_f = número de veículos que passa pela retenção após o verde.

t_{ti} = tempo de transitoriedade inicial (em segundos)

F_s = capacidade (em veículos / segundo)

t_{af} = **tempo aproveitado no final** da movimentação

t_{pi} = **tempo de verde perdido no início** da movimentação

O diagrama anterior permite calcular t_{pi} e t_{af} , tal como segue:

$$t_{pi} = t_{ti} - \frac{N_i}{F_s}$$

$$t_{af} = \frac{N_f}{F_s}$$

Procedendo-se analogamente para com todas as aproximações críticas de todos os estágios, poderemos determinar t_p - **tempo perdido de Webster**, conforme abaixo indicado:

$$t_p = t_{e/c} + \sum t_{pi} - \sum t_{af}$$

PRÁTICA RELATIVA AO TEMPO PERDIDO DE WEBSTER

Considerando o trabalho requerido pelo procedimento de obtenção de t_p , na reprogramação semafórica é prática estimá-lo através da seguinte fórmula simplificada:

$$t_p = t_{e/c} - n$$

Onde: $t_{e/c}$ = tempo de entreverde no ciclo.

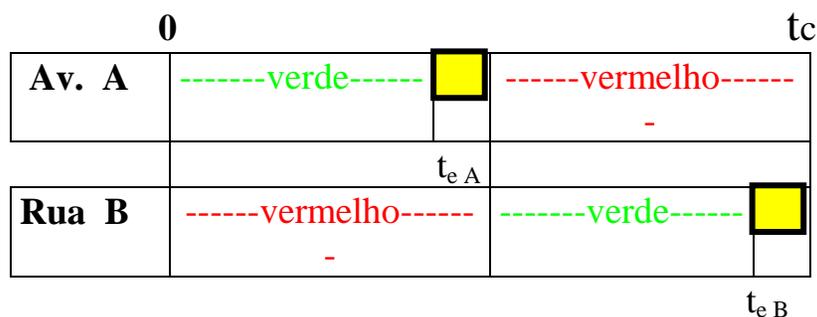
n = número de estágios veiculares do semáforo



5. CÁLCULO DOS NOVOS TEMPOS DE CICLO E DE VERDE

5.1 TEMPO DE ENTREVERDE NO CICLO E NA HORA

O TEMPO DE ENTREVERDE NO CICLO $t_{e/c}$ É **FIXO**



pois $t_{e/c} = t_{eA} + t_{eB}$ é fixado pela segurança.

O TEMPO DE ENTREVERDE NA HORA $t_{e/h}$ é **VARIÁVEL**

NÚMERO DE CICLOS NA HORA - 3.600 Segundos																															
1				2				3				4				5				6				7				8			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32

EXEMPLO:

TEMPO DE CICLO X TEMPO DE ENTREVERDE NA HORA			
Tempo de Ciclo	Ciclos na Hora	$t_{e/c}$	$t_{e/h}$
120 s	30	9 s	270 s/h
100 s	36	9 s	324 s/h
80 s	45	9 s	405 s/h
60 s	60	9 s	540 s/h
40 s	90	9 s	810 s/h

Se o TEMPO DE CICLO É **MÍNIMO**, ENTÃO O TEMPO DE ENTREVERDE NA HORA É **MÁXIMO**

5.2 TEMPO DE CICLO MÍNIMO

A metodologia até aqui apresentada permite a determinação dos **tempos mínimos de verde na hora**, tanto para aproximações ociosas como para aproximações congestionadas, restando agora a determinação dos novos tempos de ciclo e de verde.

Os **tempos de ciclo** são compostos por **tempos de verde e por entreverdes**, sendo:

- $t_{e/c}$, $t_{e/h}$ respectivamente a soma dos entreverdes, no ciclo e na hora;
- t_v , $t_{v/h}$ respectivamente os tempos de verde, no ciclo e na hora;
- $t_{v \text{ min/h}}$ o tempo verde mínimo na hora de cada estágio do semáforo;
- $\sum t_{v \text{ min/h}}$ a somatória dos tempos de verde mínimos na hora, de todos os estágios do semáforo.

Os **entreverdes** são fixos e não se alteram com a variação dos tempos de ciclo e de verdes, sendo determinados para cada aproximação a partir da velocidade dos veículos e da geometria da interseção.

Desta forma a **soma dos entreverdes do ciclo** - $t_{e/c}$ é constante no semáforo. Varia porém a **soma dos entreverdes na hora** - $t_{e/h}$:

$$\sum t_{v/h} + t_{e/h} = 3600 \text{ s/h}$$

$$t_{e/h} = 3600 - \sum t_{v/h}$$

Quando os tempos de verde forem **mínimos**, $t_{e/h}$ será **máximo**:

$$t_{e/h \text{ max}} = 3600 - \sum t_{v \text{ min/h}}$$



Sendo $t_{e/h \max}$ composto por vários $t_{e/c}$ (pois vários ciclos mínimos se repetem na hora para compor $t_{e/h \max}$), pode-se calcular o número de ciclos mínimos existentes na hora, e assim obter-se o tempo de ciclo mínimo - $t_{c \min}$:

$$\text{N}^\circ \text{ DE CICLOS MÍNIMOS NA HORA} = t_{e/h \max} / t_{e/c}$$

$$t_{c \min} = 3600 / \text{N}^\circ \text{ DE CICLOS MÍNIMOS NA HORA}$$

5.3 TEMPO DE CICLO ÓTIMO

Para calcular o novo Tempo de Ciclo do semáforo, a partir dos dados obtidos através do “Método de Observação de Campo”, recorrer-se-á à metodologia proposta por Webster.

Segundo Webster, o tempo de ciclo ótimo - $t_{c \text{ ot}}$ de um semáforo é dado pela seguinte fórmula:

$$t_{c \text{ ot}} = \frac{1,5 t_p + 5}{1-Y} = \frac{1,5 t_p}{1-Y} + \frac{5}{1-Y}$$

Substituindo-se, na equação acima, $t_p / (1-Y)$ por $t_{c \min}$, temos:

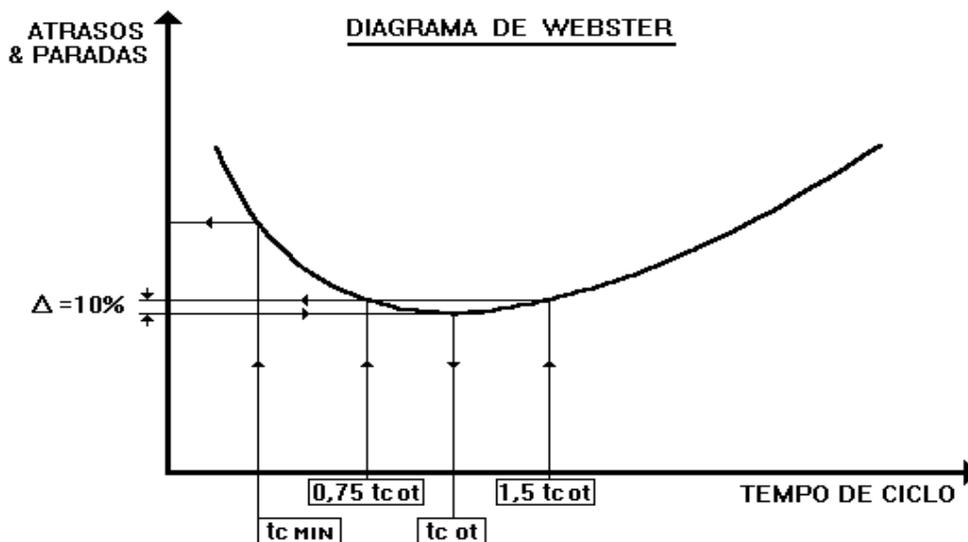
$$t_{c \text{ ot}} = 1,5 t_{c \text{ min}} + \frac{5}{1-Y}$$

Onde: t_p = “tempo perdido” sem movimentação veicular (“lost time” de Webster);

$t_{c \text{ min}}$ = tempo de ciclo mínimo (vide item 5.1);

Y = grau de saturação do semáforo, que é dado pela soma das taxas de ocupação y das aproximações críticas dos estágios (vide item 4).

O diagrama seguinte mostra graficamente a variação do atraso e parada num semáforo, a partir da variação do tempo de ciclo, sendo observáveis os valores fornecidos pela fórmula de Webster.



Tendo-se $t_{c \text{ min}}$ (obtido segundo sistemática desenvolvida no item 5.1), bem como tendo-se também Y (calculado segundo metodologia proposta no item 4),

podemos obter o tempo de ciclo ótimo utilizando-se da fórmula acima, com a imensa vantagem de prescindirmos dos insumos normalmente requeridos para sua utilização.

Na sistemática de cálculo que desenvolvemos, prescinde-se do “tempo morto” de Webster para o cálculo do **tempo de ciclo ótimo - $t_{c\ ot}$** , na medida em que o **tempo de ciclo mínimo - $t_{c\ min}$** é obtido diretamente a partir dos **tempos de verde mínimos na hora - $t_{v\ min/h}$** , independentemente do valor de t_p .

Também não necessitaremos dos fluxos veiculares e dos fluxos de saturação das aproximações, na medida em que o **Método de Observação de Campo** os substitui pelos **tempos de verde mínimos na hora**.

5.4 ESCOLHA DO TEMPO DE CICLO DO SEMÁFORO

Após o cálculo do $t_{c\ ot}$, deve-se escolher o **tempo de ciclo - t_c** do semáforo. Segundo indica o Diagrama de Webster, pode-se adotar para t_c qualquer valor dentro do seguinte intervalo de variação:

$$0,75 t_{c\ ot} < t_c < 1,5 t_{c\ ot}$$

Como diretrizes para esta escolha, e com vistas à máxima eficiência do semáforo, enquanto dispositivo de controle de tráfego, deveremos considerar os seguintes fatores condicionantes adicionais para o tempo de ciclo:

- Tipo de equipamento controlador do semáforo (mono ou multiplano);
- Adotar ciclos sub-múltiplos da hora ou do período de programação, para possibilitar mudança de planos sem corte abrupto no tempo de verde corrente;
- Nunca adotar t_c inferior a **30 s** ;
- Apenas excepcionalmente aceitar t_c superior a **120 s** .

6. TEMPOS DE VERDE DO SEMÁFORO

A determinação exata dos tempos de verde de cada estágio é fundamental para a operação adequada do semáforo.

Para que as aproximações críticas (mais saturadas) dos diversos estágios do semáforo tenham verdes proporcionais às respectivas necessidades, deve-se impor a **proporcionalidade** entre **tempo de verde** e **tempo de verde mínimo na hora**.

Desta forma os tempos de verde deverão obedecer à seguinte proporção:

$$\frac{t_{v1}}{t_{v\min/h\ 1}} = \frac{t_{v2}}{t_{v\min/h\ 2}} = \dots = \frac{t_{vi}}{t_{v\min/h\ i}}$$

Aplicando-se as Propriedades das Proporções tem-se:

$$\frac{t_{v1} + t_{v2} + \dots + t_{vi}}{t_{v\min/h\ 1} + t_{v\min/h\ 2} + \dots + t_{v\min/h\ i}} = \frac{t_{vi}}{t_{v\min/h\ i}}$$

O **numerador do primeiro termo** da expressão acima é $\sum t_{vi}$, que por sua vez é igual a $(t_c - t_{e/c})$. O **denominador** do mesmo primeiro termo é igual a $\sum t_{v\min/h}$.

Substituindo-se numerador e denominador conforme aqui indicado, obtem-se a **fórmula de cálculo do tempo de verde da aproximação i genérica**:

$$t_{vi} = \frac{t_{v\min/h\ i}}{\sum t_{v\min/h}} \cdot (t_c - t_{e/c})$$

É rigorosamente precisa a divisão do tempo de ciclo assim proporcionada. Os tempos de verde dos estágios, proporcionais aos respectivos $t_{v\min/h}$ garantem folgas equilibradas para todos os seus movimentos críticos.

Segundo vimos no item **5.2**, o tempo de ciclo pode ser escolhido sempre dentro de uma larga faixa de variação, sem prejuízo significativo no desempenho do semáforo. O mesmo não se aplica à divisão do ciclo, onde qualquer desvio desbalanceará as folgas das aproximações críticas dos diversos estágios.

Note-se que, ainda que o tempo de ciclo tenha sido adequadamente adotado, sua divisão desequilibrada poderá causar congestionamento no semáforo.

7. DETERMINAÇÃO DOS ENTREVERDES

Os entreverdes são formados por intervalos de **tempo de amarelo**, e por intervalos de **tempo vermelho geral** (vermelho de limpeza ou de segurança), conforme anteriormente definido no item 1.2.

7.1 TEMPO DE AMARELO

O **tempo de amarelo** t_a de uma aproximação é função da velocidade V dessa aproximação, do tempo de reação t_r dos motoristas, e da desaceleração a dos veículos, tal como consta da fórmula a seguir:

$$t_a = t_r + \frac{V}{2a}$$

Podem ser adotados como valores usuais os seguintes parâmetros:

- **1,0 s** como tempo de reação dos motoristas
- **2,8 m/s²** como desaceleração dos veículos

Com esses parâmetros foram obtidos os tempos de amarelo para **situações usuais**, conforme consta da tabela abaixo:

TEMPOS DE AMARELO

VIA DE APROXIMAÇÃO	TEMPO DE AMARELO
RUA - 40 Km/h	3 s
AVENIDA - 60 Km/h	4 s
EXPRESSA - 80 Km/h	5 s



7.2 TEMPO DE VERMELHO GERAL PARA VEÍCULOS

O **tempo de vermelho geral** t_{vg} de uma aproximação é função das seguintes variáveis:

- Velocidade V dessa aproximação;
- Largura L da via a ser cruzada (da distância a ser percorrida pelo veículo dentro da aproximação);
- Comprimento c do veículo;
- Tempo de folga t_f (tempo mínimo decorrido entre o início do Tempo Verde da via transversal e o instante da entrada de um veículo em velocidade).

Para a elaboração da tabela abaixo, na qual são fornecidos os valores do Tempo de Vermelho Geral para **situações usuais**, foram adotados os seguintes parâmetros:

- Vias Secundárias (ruas) com no máximo **9 m** de largura, e velocidade de **40 km/h**
- Vias Preferenciais (avenidas) com até **30 m** de largura, e velocidade **60 km/h**;
- Comprimento de **5 m** do veículo de projeto;
- Tempo de Folga $t_f = 1,2 \text{ s}$.

TEMPOS DE VERMELHO GERAL PARA VEÍCULOS

APROXIMAÇÃO	VIA ATRAVESSADA	t_{vg}
QUALQUER	RUA	0
RUA	AVENIDA	2
AVENIDA	AVENIDA	1
RÁPIDA	AVENIDA OU RÁPIDA	0,4 → 1



8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- **EJZENBERG, Sergio.** “Reprogramação de Semáforos: Método Baseado em Observação de Campo”. Nota Técnica nº 174 da CET - Companhia de Engenharia de Tráfego / SP . Maio/94.
- **VILANOVA, L. M. .** “Dimensionamento do Tempo de Amarelo”. Nota Técnica nº 108 da CET - Companhia de Engenharia de Tráfego / SP. 1986.
- **WEBSTER & COBBE.** “Traffic Signals - Road Research Technical Paper nº56” - HMSO / Road Research Laboratory. Londres - 1966.
- **EJZENBERG, Sergio.** “Tempos Semafóricos - Método de Intervenção baseado em Observação de Campo”. Apostila para Treinamento da CET - Companhia de Engenharia de Tráfego / SP . Janeiro/94.
- **MAZZAMATI, SZÁSZ, VILANOVA, SUN MING e EJZENBERG.** “Manual de Sinalização Semafórica –Revisão”. CET - Companhia de Engenharia de Tráfego / SP. 1992.
- **EJZENBERG, Sergio.** “Histogramas de Fluxo na Obtenção de Capacidade”. Revista TRÂNSITO Nº 5 - Secretaria Municipal de Transportes / SP . 1980.
- **EJZENBERG, Sergio.** “Reprogramação de Semáforos pelo Método de Observação de Campo”. IX ANPET - Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes. São Carlos / SP. 1995.

MÉTODO DE OBSERVAÇÃO DE CAMPO

DATA : ___/___/___ HORA: das ___ h às ___ h RESP: _____

CROQUIS / DIAGRAMA DE ESTÁGIOS

$t_c =$ _____ s $t_{e/c} =$ _____ s

APROXIMAÇÕES CONGESTIONADAS

APROXIMAÇÃO	t_v (s)	FILA MÁXIMA (m)

APROXIMAÇÕES OCIOSAS (NÃO SATURADAS)

MEDIDAS	Aprox.: _____ n = faixas $t_v =$ s		Aprox.: _____ n = faixas $t_v =$ s		Aprox.: _____ n = faixas $t_v =$ s	
	$t_{v\ ns}$	N (veic/c)	$t_{v\ ns}$	N (veic/c)	$t_{v\ ns}$	N (veic/c)
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9						
10						
MÉDIAS						



MÉTODO DE OBSERVAÇÃO DE CAMPO

RESUMO DE FÓRMULAS

1. APROXIMAÇÕES OCIOSAS

$$t_v \text{ util} = (N \div n) \times 2 \text{ s/veic} = \quad [s]$$

$$t_v \text{ oc} = t_v \text{ ns} - t_v \text{ util} = \quad [s]$$

$$t_v \text{ min/c} = t_v - t_v \text{ oc} = \quad [s/ciclo]$$

$$t_v \text{ min/h} = t_v \text{ min/c} \times (3600 \div t_c) = \quad [s/hora]$$

2. APROXIMAÇÕES CONGESTIONADAS

$$\text{Fila Normal} = (t_v \div 2 \text{ s/veic}) \times 6 \text{ m/veic} = t_v \times 3 = \quad [m]$$

$$\text{Fila Congestionada} = \text{Fila Máxima} - \text{Fila Normal} = \quad [m]$$

$$t_v \text{ adic/h} = (\text{Fila Congest.} \div 6 \text{ m/veic}) \times 2 \text{ s/veic} = \text{Fila Congest.} \div 3 = \quad [s/hora]$$

$$t_v \text{ exist/h} = t_v \times (3600 \div t_c) = \quad [s/hora]$$

$$t_v \text{ min/h} = t_v \text{ adic/h} + t_v \text{ exist/h} = \quad [s/hora]$$

3. GRAU DE SATURAÇÃO DE CRUZAMENTOS

$$\sum t_v \text{ min/h} =$$

$$Y = \sum t_v \text{ min/h} \div 3600 =$$

Cruzamento congestionado se $Y > 0,92$

4. CÁLCULO DOS NOVOS TEMPOS DE CICLO

TEMPO DE CICLO MÍNIMO:

$$t_{e/h \text{ max}} = 3600 - \sum t_{v \text{ min/h}} = \quad \quad \quad \text{[s/hora]}$$

$$\text{Nº de CICLOS MÍNIMOS/h} = t_{e/h \text{ max}} \div t_{e/c} = \quad \quad \quad \text{[ciclos/hora]}$$

$$t_{c \text{ min}} = \frac{3600}{\text{Nº DE CICLOS MÍNIMOS/h}} = \quad \quad \quad \text{[s]}$$

TEMPO DE CICLO ÓTIMO (WEBSTER):

$$t_{c \text{ ot}} = 1,5 \times t_{c \text{ min}} + \frac{5}{1-Y} = \quad \quad \quad \text{[s]}$$

ESCOLHA DO TEMPO DE CICLO DO SEMÁFORO:

$$0,75 \times t_{c \text{ ot}} < t_{c \text{ novo}} < 1,5 \times t_{c \text{ ot}} \rightarrow t_{c \text{ novo}} = \quad \quad \quad \text{[s]}$$

FATORES INTERVENIENTES:

- Controlador do semáforo: **mono ou multiplano;**
- **Sub-múltiplos da hora: 30;36;40;45;50;60;72;75;80;90;100;120.**
- Limite técnico: **30s < t_{c novo} < 120s .**

V. CÁLCULO DOS TEMPOS DE VERDE

$$t_{vA} = \frac{t_{vA \text{ min/h}}}{\sum t_{v \text{ min/h}}} \times (t_{c \text{ novo}} - t_{e/c}) = \quad \quad \quad \text{[s]}$$

$$t_{vB} = \frac{t_{vB \text{ min/h}}}{\sum t_{v \text{ min/h}}} \times (t_{c \text{ novo}} - t_{e/c}) = \quad \quad \quad \text{[s]}$$

Tempo de verde para vias locais e coletoras > 12 s

Tempo de verde para vias arteriais > 21 s

