

SEMÁFOROS*

FUNDAMENTOS PRÁTICOS

ANTONIO C. P. "COCA" FERRAZ
(COORDENADOR)

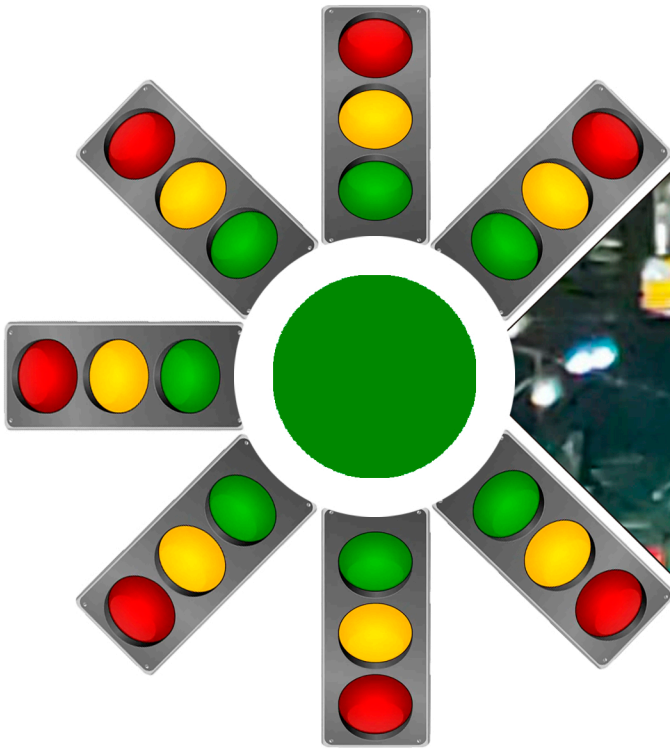
BÁRBARA STOLTE BEZERRA

MARIA TERESA FRANÇOSO

ALEXANDRE BENETTI PARREIRA

LUCIANA M. G. SPIGOLON

ISABELA APARECIDA FORNACIARI



NEC

NÚCLEO DE ESTUDOS DAS CIDADES

RiMa

SEMÁFOROS SINCRONIZADOS EM RIO VERDE/GO

SEMÁFOROS FUNDAMENTOS PRÁCTICOS

RiMa

2025



SEMÁFOROS

FUNDAMENTOS PRÁTICOS

Autores

Antonio C. P. "Coca" Ferraz
(Coordenador)

Bárbara Stolte Bezerra

Maria Teresa Françaço

Alexandre Benetti Parreira

Luciana M. G. Spigolon

Isabela Aparecida Fornaciari



Copyright © 2025 dos autores

Direitos reservados desta edição:

RiMa Editorial

Capa: Francisco José “Chico” Santoro

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Semáforos: fundamentos práticos / Antonio Clóvis Pinto Ferraz... [et al.] – São Carlos, SP : RiMa Editorial, 2025.
108 p.

ISBN: 978-65-83933-18-8

1. Código de Trânsito – semáforos. I. Ferraz, Antonio Clóvis Pinto Ferraz. II. Bezerra, Bárbara Stolte. III. Françoso, Maria Teresa. IV. Parreira, Alexandre Benetti. V. Spigolon, Luciana Maria Gasparelo. VI. Fornaciari, Isabela Aparecida.

CDD 343.0946

Elaborado por Natalia Gallo Cerrao – CRB 8/10169

Índice para catálogo sistemático:

Código de Trânsito – semáforos 343.0946

COMISSÃO EDITORIAL

Dirlene Ribeiro Martins

Paulo de Tarso Martins

Carlos Eduardo M. Bicudo (Instituto de Botânica - SP)

Evaldo L. G. Espíndola (USP - SP)

João Batista Martins (UEL - PR)

Norma Valencio (UFSCar - SP)

Pedro Roberto Jacobi (USP - SP)

RiMa

Rua Virgílio Pozzi, 81 – Jardim Santa Paula

CEP 13564-040 – São Carlos-SP

Fone: (16) 988064652

Este livro é dedicado a Rio Verde (GO), em reconhecimento à excelência do trabalho desenvolvido no campo da mobilidade urbana, ação que levou o município a conquistar o 1º lugar no Concurso de Inovação do Setor Público do Estado de Goiás em 2025 (concedido ao sistema de transporte coletivo).

RioVerdeGo
CIDADE CONECTADA COM O FUTURO



A publicação deste livro contou com o apoio do Grupo CSC de Transporte e Logística.





APRESENTAÇÃO

O objetivo desta publicação é fornecer a estudantes e profissionais uma publicação na qual os fundamentos sobre semáforos são abordados de forma simples e sintética, visando facilitar o entendimento do assunto e, dessa forma, proporcionar a efetiva utilização dos conceitos básicos na prática.

Com isso, contribuir para que mais semáforos operem em condições adequadas no país, com conseqüente ganhos na segurança, fluidez e comodidade no trânsito de veículos e pedestres.

O trabalho aborda os seguintes tópicos: introdução, controle do tráfego em cruzamentos e necessidade de semáforo, conceitos básicos na operação de semáforos, tipo de controle e desempenho de semáforos isolados e coordenação de semáforos.



SUMÁRIO

- 13 INTRODUÇÃO
- 21 CONTROLE DO TRÁFEGO EM CRUZAMENTOS
E NECESSIDADE DE SEMÁFORO
- 39 CONCEITOS BÁSICOS NA OPERAÇÃO
DE SEMÁFOROS
- 61 TIPO DE CONTROLE E DESEMPENHO DE
SEMÁFOROS ISOLADOS
- 91 COORDENAÇÃO DE SEMÁFOROS
- 109 BIBLIOGRAFIA

INTRODUÇÃO

Capítulo

1

As interseções em nível constituem a parte crítica do sistema viário urbano, pois, em razão dos movimentos conflitantes de veículos e pedestres que ali ocorrem, são os pontos de menor capacidade de tráfego e de maior frequência de acidentes. Nesses locais, qualquer que seja a forma de operação, uma parte dos veículos e dos pedestres precisa parar e aguardar para realizar a travessia.

Nas interseções com menor volume de veículos e pedestres, a operação com uma das vias funcionando como preferencial (com prioridade de passagem) representa uma solução adequada do ponto de vista do desempenho operacional – considerando os parâmetros segurança, demora, número de paradas e capacidade.

Com o aumento do volume de tráfego, começam a surgir dificuldades para que veículos e/ou pedestres acessem ou cruzem a via principal, resultando na formação de filas, maiores tempos de espera e, quase sempre, aumento da frequência de acidentes. Quando a situação se torna crítica, é recomendada a implantação de semáforo no local.

Muitas vezes, mesmo que o volume de veículos e/ou pedestres não seja elevado em um cruzamento, o semáforo também é indicado para melhorar a segurança. Isso ocorre, por exemplo, quando a visibilidade é reduzida, a topografia favorece o desenvolvimento de altas velocidades e/ou o número de movimentos conflitantes é alto, tornando complexa a tomada de decisão por parte de motoristas e pedestres para cruzar.

A escolha do tipo de controle a ser empregado em uma interseção deve ser pautada por dois objetivos principais: minimizar a frequência de acidentes e minimizar a demora.

A decisão de instalar ou não um semáforo em um cruzamento deve ser baseada em critérios técnicos. A implantação inadequada – em locais onde não há justificativa técnica – pode comprometer o desempenho operacional da interseção, afetando negativamente fatores como segurança, tempo de espera, número de paradas e capacidade.

Uma vez tomada a decisão de instalar o semáforo, é fundamental que o projeto operacional seja adequadamente elaborado. Isso inclui a definição do número de fases e estágios, dos movimentos permitidos em cada fase e estágio, da duração de cada fase, do tipo de controlador a ser utilizado, entre outros aspectos.

Esses parâmetros devem ser definidos em função das características do cruzamento (largura das vias, declividades, etc.) e das características do tráfego (volumes, porcentagens de veículos pesados, etc.). O projeto

operacional é fundamental no que tange ao desempenho do cruzamento, contribuindo para uma operação com segurança, com baixa demora média, demora máxima não excessiva, número de paradas aceitável, tamanho das filas limitado e capacidade adequada.

Igualmente essencial é o correto planejamento e implantação da parte física do semáforo para garantir os benefícios previstos. Os focos luminosos devem estar bem visíveis a longa distância para os veículos que se aproximam, assim como para os condutores e pedestres que aguardam sua vez de atravessar.

A sinalização horizontal (de solo) também é fundamental para se conseguir um desempenho adequado no cruzamento, pois indica onde os pedestres devem atravessar, onde os veículos devem parar e em quais faixas devem se posicionar conforme o movimento que pretendem realizar.

Para que essas condições sejam mantidas ao longo do tempo, é indispensável a manutenção regular dos equipamentos semaforicos e da sinalização viária.

Semáforos instalados sem justificativa técnica e/ou com projetos inadequados (físico e operacional) quase sempre ocasionam os seguintes principais problemas:

- Aumento da demora e do número de paradas;
- Redução da capacidade da interseção;
- Aumento da frequência de acidentes;
- Aumento nas violações das regras de trânsito;
- Utilização de rotas alternativas para evitar o semáforo, gerando problemas para as ruas de características locais.

Por outro lado, semáforos implantados com base em critérios técnicos e com projetos adequados (físico e operacional) trazem, em geral, os seguintes benefícios:

- Redução da demora e do número de paradas;
- Aumento da capacidade da interseção;
- Redução do tamanho das filas;
- Redução da frequência de acidentes;
- Redução da emissão de poluentes e do consumo de combustível.

Quando se trata de uma rede de semáforos próximos, para otimizar o desempenho operacional do conjunto é importante operar com um sistema de coordenação adequado. O caso mais simples de coordenação é o sistema de sincronismo ao longo de uma via conhecido como “onda verde”

(as luzes dos semáforos vão ficando verde à medida que a fila de veículos vai se aproximando). Se a coordenação for adequadamente projetada, é possível obter ganhos altamente significativos no desempenho do conjunto de semáforos, principalmente no tocante à demora, ao número de paradas e à capacidade da via. Como consequência, também se obtêm reduções na emissão de poluentes e no consumo de combustível.

É fundamental ter em conta que a gestão adequada dos tempos dos semáforos e da operação sincronizada, quando aplicável, pode melhorar muito o desempenho dos cruzamentos.

A gestão adequada do sistema de semáforos apresenta os seguintes benefícios:

- Redução do número de acidentes e da severidade dos mesmos;
- Redução da demora (tempo perdido para passar);
- Redução da necessidade de parar no cruzamento;
- Aumento da capacidade da interseção;
- Redução dos congestionamentos;
- Redução da emissão de poluentes e do consumo de combustível;
- Redução do comportamento agressivo dos motoristas;
- Postergação ou eliminação da necessidade de construção de vias para aumento da capacidade;
- Ordenamento dos fluxos de tráfego;
- Melhoría no movimento contínuo do fluxo com a coordenação dos semáforos adjacentes;
- Interrupção do fluxo pesado na via principal para permitir que os fluxos de pedestres e veículos na via secundária possam cruzar;
- Previsibilidade do tempo de espera de veículos e pedestres.

Muitas ações podem ser desenvolvidas para melhorar o desempenho dos equipamentos existentes, como:

- Remoção de semáforos desnecessários;
- Introdução de nova programação de tempos, definida mediante técnica adequada;
- Inclusão de fases de conversão protegidas, principalmente à esquerda; ou, se for o caso, proibição das conversões;
- Utilização de programas de computador para projetar e desenvolver os planos de tempos do semáforo;
- Instalação e manutenção adequada dos equipamentos;
- Coordenação dos semáforos.

Diversos estudos mostram que semáforos com programação deficiente aumentam consideravelmente o consumo de combustível, a emissão de poluentes e o ruído. O tráfego de veículos está entre os principais fatores que geram a emissão de poluentes nas cidades.

Os semáforos são geralmente considerados pela mídia e pelo público como a solução para todos os problemas de segurança viária nas interseções; a crença comum é que esses dispositivos são mais seguros do que outras formas de controle de tráfego. No entanto, esse entendimento é constantemente contestado por estudos que mostram que interseções operadas por semáforos, muitas vezes, apresentam maior incidência de acidentes do que interseções semelhantes não controladas por semáforos.

Várias pesquisas apontam que o número de colisões em ângulo reto diminui nas interseções quando há substituição de placas de *PARE* por semáforos. Por outro lado, outros estudos indicam um aumento nas colisões traseiras após a semaforização de interseções.

Em geral, os seguintes tipos de colisões tendem a ser reduzidos com a instalação de semáforo: colisões em ângulo reto, colisões durante conversões à esquerda, colisões com pedestres, colisões devido a manobras de estacionamento e colisões em ângulo. Por outro lado, os seguintes tipos de colisões geralmente aumentam: colisões traseiras, colisões laterais e colisões frontais.

O que deve ficar claro é que a instalação de semáforos nem sempre resulta na prevenção de acidentes. Em muitos casos, observa-se um aumento no número total de acidentes e de pessoas feridas após a sua instalação.

À luz do exposto, fica clara a importância da gestão adequada do sistema de semáforos de uma cidade. Trata-se de questão eminentemente técnica que, para ser bem conduzida, requer uma equipe capacitada, com conhecimento específico e acesso a ferramentas adequadas.

A falta de gestão técnica adequada do sistema de semáforos é uma realidade na maioria das cidades do país. Excetuando-se algumas grandes cidades onde a gestão é satisfatória, nas demais a situação é preocupante. Frequentemente, não se adotam critérios técnicos para verificar a real necessidade de instalação de semáforos nos cruzamentos; o projeto físico, na maioria das vezes, apresenta deficiências; e o programa de operação costuma ser definido de forma empírica, comprometendo a qualidade da operação (nível de serviço).

Pode-se afirmar que, no país, a prática ainda está distante do estágio atual de conhecimento sobre o tema.

Centrais de controle do tráfego e semáforos com detectores de veículos ainda são uma realidade muito distante para a grande maioria das cidades brasileiras. Softwares como o TRANSYT, SCOOT, INTEGRATION, entre outros, utilizados para otimização da operação, são empregados apenas em algumas poucas cidades de grande porte.

No entanto, mesmo com semáforos de tempo fixo é possível obter excelentes desempenhos quando técnicos capacitados atuam utilizando métodos simples de determinação dos tempos verde, vermelho e amarelo e das defasagens entre inícios do verde de semáforos próximos.

Os principais parâmetros utilizados para analisar o desempenho operacional de um semáforo são: o tempo efetivamente parado, o atraso, o número de paradas, o consumo de combustível e a emissão de poluentes.

Em determinadas situações, pode ser particularmente relevante considerar o tamanho médio e o tamanho máximo das filas, sobretudo quando estas obstruem interseções próximas ou acessos importantes de veículos.

Do ponto de vista dos usuários, o parâmetro mais importante é o tempo médio efetivamente parado ou o atraso médio (tempo médio perdido ao passar pelo semáforo, correspondente à soma do tempo médio efetivamente parado mais o tempo de desaceleração e aceleração) seguido do número médio de paradas, parâmetro bastante valorizado pelos usuários quando passam por uma sucessão de semáforos próximos. No caso de fluxos baixos, os usuários também consideram relevante o tempo máximo parado ou o atraso máximo.

Nos semáforos isolados, o nível de serviço (qualidade da operação) é comumente caracterizado pela demora média experimentada pelos veículos: o tempo efetivamente parado ou o atraso.

No caso de um conjunto de semáforos dispostos ao longo de uma via, o nível de serviço (qualidade da operação) é definido com base na velocidade média de operação em relação à velocidade máxima conseguida nesse tipo de via em condições “ideais” (tráfego com baixo volume e sincronismo adequado dos semáforos, permitindo que os veículos passem por um grande número deles sem a necessidade de parar).

Sob a ótica da sociedade, são especialmente importantes os parâmetros relacionados ao consumo de combustível (associado à conservação de energia) e à emissão de poluentes (vinculada à preservação do meio ambiente).

Diversas pesquisas foram realizadas em outros países com o objetivo de conhecer a percepção dos usuários sobre o nível de serviço (qualidade da operação) em interseções com semáforos, isolados ou coordenados. No Brasil, até onde se sabe, há apenas o estudo conduzido por Bezerra (2007), em sua tese de doutorado desenvolvida na Pós-Graduação em Transportes da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC) da Universidade de São Paulo (USP).

Diversos métodos têm sido desenvolvidos para a determinação do tempo de ciclo e da distribuição do tempo de verde em semáforos isolados, com o intuito de identificar as condições operacionais que proporcionem o melhor desempenho possível.

Alguns métodos consideram o tempo médio efetivamente parado, enquanto outros adotam o atraso médio como o parâmetro mais importante para avaliar o desempenho operacional. Há também abordagens que consideram dois parâmetros simultaneamente: o atraso e o número de paradas. Nesses casos, propõe-se a minimização do valor de uma função linear composta pelo atraso e pelo número de paradas, com a possibilidade de variar os coeficientes para atribuir maior peso a um dos parâmetros.

Existem, ainda, métodos que preconizam a minimização de uma função linear composta por múltiplos fatores: atraso, número de paradas, consumo de combustível e emissão de poluentes.

Com a utilização de simuladores de tráfego, mesmo quando a função de desempenho estabelecida é complexa, torna-se viável encontrar a solução ótima.

O principal fator que influi nos parâmetros que medem o desempenho dos semáforos é o volume de tráfego, o qual varia ao longo do dia, dos dias da semana, das semanas do mês, dos meses do ano e ao longo dos anos. A variação é geralmente grande ao longo do dia; menor nos períodos típicos (pico da manhã, pico da tarde, pico do almoço, meio da manhã, meio da tarde, noite, etc.); e menor ainda dentro de uma hora típica qualquer – ainda que, mesmo nesse caso, a variação possa ser significativa. Na realidade, os fluxos comumente variam até mesmo quando se consideram períodos de tempo menores, como 15 ou 5 minutos.

No caso dos semáforos de tempo fixo, os controladores eletrônicos modernos permitem variar a programação de tempos nos diversos períodos do dia para adequar a duração do ciclo e das fases aos volumes de tráfego típicos de cada um desses períodos – ainda que, em muitas cidades que utilizam esse tipo de equipamento, seja utilizado apenas um plano de operação ao longo de todo o dia, inclusive à noite. Nos controladores

antigos mais simples, que ainda existem em algumas cidades, os tempos permanecem com a mesma duração durante todo o dia.

No caso dos semáforos atuados pelo tráfego, em que detectores de veículos são instalados nas várias aproximações, a determinação do ciclo e dos verdes é feita em tempo real (*on-line*) por programas que processam algoritmos de otimização. Quando os fluxos são elevados, esses semáforos operam quase como se fossem semáforos de tempo fixo, com a duração dos tempos permanecendo praticamente constante.

Na grande maioria das cidades do país, não são realizadas contagens de tráfego nem são determinados os valores dos demais parâmetros que afetam o desempenho dos semáforos, como o fluxo de saturação e o tempo perdido entre as fases, para a definição da programação de tempos. Por falta de recursos e, muitas vezes, de conhecimento técnico, os semáforos são instalados e os tempos ajustados empiricamente em campo. Apesar disso, as programações utilizadas em geral atendem às necessidades do tráfego, ainda que na maioria das vezes muito distantes das condições ótimas.

CONTROLE DO TRÁFEGO EM CRUZAMENTOS E NECESSIDADE DE SEMÁFORO

Capítulo

2

2.1 CONTROLE DO TRÁFEGO DE VEÍCULOS NAS INTERSEÇÕES

Diversas formas de controle do tráfego de veículos e pedestres são empregadas nos cruzamentos viários (interseções viárias), associadas a diferentes tipos de sinalização. O objetivo é garantir que o trânsito passe pelo local com segurança, rapidez e comodidade.

A segurança está relacionada à ocorrência de acidentes. A probabilidade da ocorrência de acidentes, sobretudo dos mais graves, deve ser minimizada. A rapidez está associada à passagem pelo local com demora aceitável, sem lentidão excessiva ou congestionamentos que, quando inevitáveis, devem ter duração e amplitude reduzidas ao mínimo. A comodidade corresponde ao conforto de condutores, passageiros e pedestres, o que requer vias e calçadas com largura adequada e superfícies regulares, raios de curva apropriados, sinalização de trânsito (vertical e horizontal) eficiente, guias rebaixadas para cadeirantes e pessoas com mobilidade reduzida, bem como tomadas de decisões por parte dos condutores e pedestres não complicadas.

Muitas vezes são necessários dispositivos viários de ordenação e canalização do tráfego nos cruzamentos, construídos com guias, tachões ou pintura para evitar o chamado “mar de asfalto”, que confunde os condutores quanto ao posicionamento dos veículos e dificulta a travessia de pedestres. Na Figura 2.1 são mostrados alguns tipos de canalização do tráfego em cruzamentos.

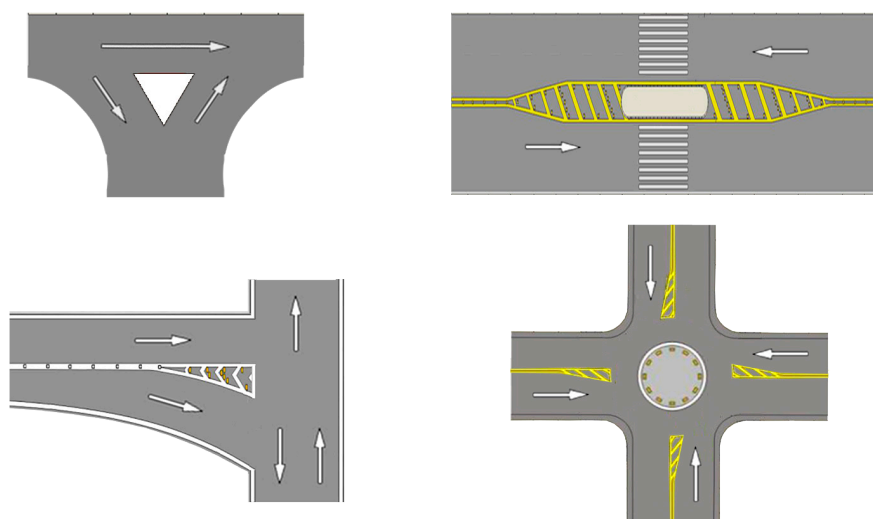


Figura 2.1 Tipos de canalização do tráfego em cruzamentos.

A seguir são discutidos os principais tipos de controle de tráfego empregados em cruzamentos.

Cruzamento sem sinalização

De acordo com o Código de Trânsito Brasileiro (inciso III do artigo 29): “Quando veículos, transitando por fluxos que se cruzem, se aproximarem de local não sinalizado, terá preferência de passagem: a) no caso de apenas um fluxo ser proveniente de rodovia, aquele que estiver circulando por ela; b) no caso de rotatória, aquele que estiver circulando por ela; c) nos demais casos, o que vier pela direita do condutor”.

A primeira regra é natural e, em geral, funciona a contento. As outras duas, no entanto, não são intuitivas e, pior, são desconhecidas pela maioria dos motoristas, o que gera confusão e contribui para a ocorrência de acidentes.

Cruzamentos sem sinalização são comuns em vias com baixo volume de tráfego, especialmente em regiões periféricas das cidades. Contudo, tendo-se em vista o baixo custo de instalação de pelo menos uma placa de *PARE*, essa situação é injustificável.

Cruzamento com sinal de parada obrigatória ou *Dê a preferência*

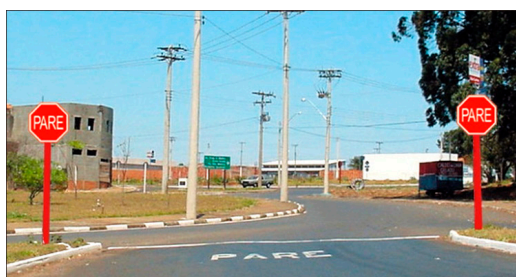
Os veículos que trafegam pela via preferencial passam sem parar, enquanto os da via secundária devem parar (no caso da sinalização de parada obrigatória – *PARE*) ou reduzir a velocidade (no caso da sinalização *Dê a preferência* – triângulo com vértice para baixo). Esse tipo de operação/sinalização é utilizado em cruzamentos onde os volumes de tráfego em ambas as vias não são elevados, pois a capacidade dos veículos da via secundária de acessar a via preferencial é limitada. Quando os volumes aumentam, a demora e o comprimento da fila na via secundária ficam grandes.

Nos países desenvolvidos, a obediência ao sinal de *PARE* é efetiva: os motoristas realmente param. No Brasil, isso não ocorre da mesma forma. O sinal de *PARE* costuma ser interpretado como um *Dê a preferência*, ou seja, se houver boa visibilidade e não houver veículos se aproximando na via preferencial, os motoristas da via secundária passam sem efetuar a parada total. Outro problema diz respeito à sinalização *Dê a preferência*, cuja mensagem não é tão clara e, por isso, não é bem compreendida por muitos condutores brasileiros. Diante desses fatos, parece mais adequado, no contexto nacional, utilizar exclusivamente o sinal de parada obriga-

tória, cuja mensagem é direta e clara, permitindo a passagem sem parada apenas quando a visibilidade for adequada.

De acordo com o Código de Trânsito Brasileiro, a utilização da placa vertical de cruzamento com via preferencial é obrigatória. Já a sinalização horizontal é facultativa, sendo normalmente aplicada apenas em cruzamentos com problemas de visibilidade, alta frequência de acidentes, entre outros, quando se deseja aumentar o impacto visual da sinalização de parada obrigatória.

Na Figura 2.2 são mostradas fotografias de sinalizações vertical e horizontal de parada obrigatória e *Dê a preferência*.



Sinalização vertical e horizontal de parada obrigatória



Sinalização vertical de *Dê a preferência*



Sinalização horizontal de *Dê a preferência*



Sinalização horizontal de *Dê a preferência*

Figura 2.2 Sinalização de Parada Obrigatória e de *Dê a Preferência*.

Cruzamento com semáforo

Os semáforos proporcionam a alternância do direito de passagem dos veículos na interseção por meio de indicações luminosas (verde, vermelho e amarelo). São utilizados para reduzir a demora de veículos e/ou pedestres que cruzam vias principais (preferenciais) e/ou para diminuir a ocorrência de acidentes de trânsito. Em geral, são empregados em substituição à operação com parada obrigatória quando o volume de tráfego na via principal se torna significativo.

Para exemplificar, considere o caso particular de uma interseção cujas curvas de tempo médio de espera por veículo (tempo médio parado na fila) são apresentadas na Figura 2.3, em três situações distintas:

- Operando com semáforo, com programação de tempos adequada;
- Operando com parada obrigatória para a via com menor movimento, em condição de boa visibilidade;
- Operando com parada obrigatória para a via com menor movimento, em condição de visibilidade reduzida.

Os valores do volume total e do tempo médio de espera a partir dos quais a operação com semáforo passa a apresentar desempenho superior (e, portanto, é a indicada) são:

- Com *PARE* e visibilidade boa = 870 veículos/h e 16 segundos de espera média;
- Com *PARE* e visibilidade reduzida = 580 veículos/h e 9,5 segundos de espera média.

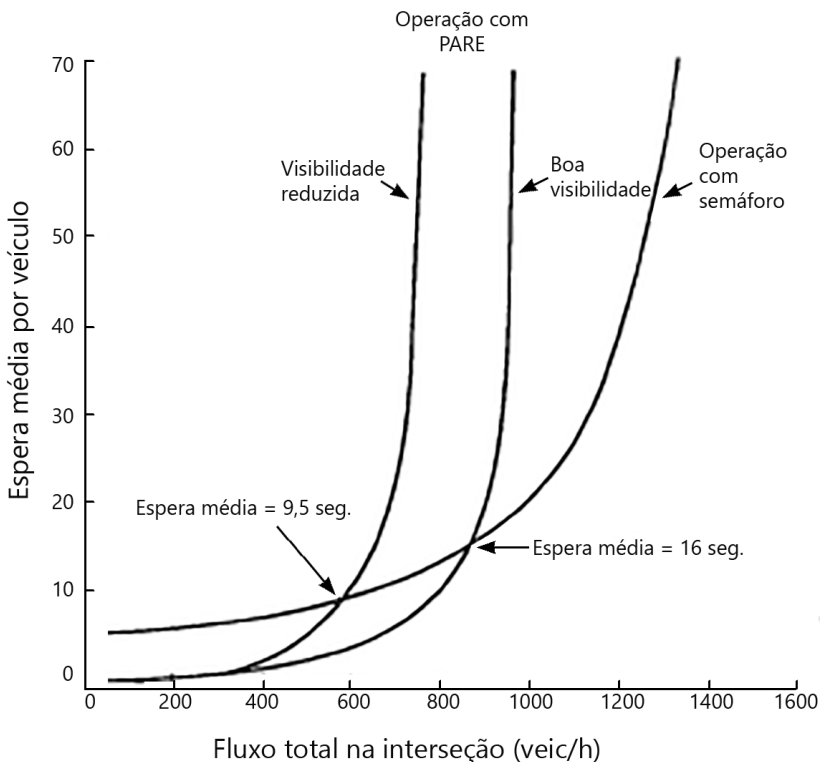
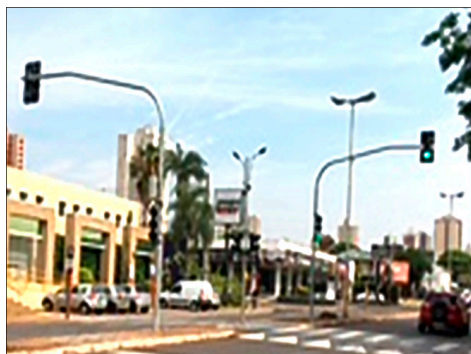


Figura 2.3 Espera média em diversas situações.

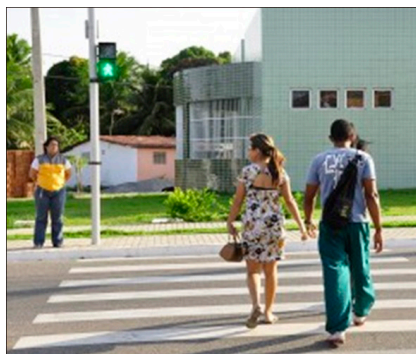
Nem sempre, porém, toda a disciplina da movimentação é realizada exclusivamente por meio de indicações luminosas. É comum haver permissão para movimentos conflitantes sob uma mesma indicação luminosa, sendo a prioridade definida por outras regras. Exemplos incluem:

- Conversão à esquerda com o sinal verde liberado para ambos os sentidos de tráfego: neste caso, o veículo só pode realizar a conversão se a luz estiver verde e não houver veículo próximo trafegando no sentido oposto;
- Travessia de pedestres aproveitando brechas entre a passagem de veículos, independentemente da cor do semáforo.

Na Figura 2.4 são mostradas fotografias de cruzamentos semaforizados.



Semáforo veicular



Semáforo para pedestre

Figura 2.4 Semáforos em cruzamentos.

OBSERVAÇÕES

O movimento de veículos nas vias é, em geral, considerado prioritário em relação à travessia de pedestres. A única exceção ocorre quando há faixa de pedestres e o pedestre já iniciou a travessia. Nas faixas dotadas de semáforo, as indicações luminosas controlam os fluxos. Já nas faixas de pedestres não controladas por semáforo, mas localizadas em cruzamentos semaforizados para os veículos, aplicam-se as seguintes regras:

- Quando o sinal estiver verde para os veículos, estes terão preferência, exceto no início da abertura do sinal, quando os conduto-

res devem estar atentos à presença de pedestres já em travessia – especialmente nos casos de conversão à esquerda ou à direita.

Nos países desenvolvidos, essas normas são efetivamente respeitadas. No Brasil, contudo, sua aplicação é limitada, com exceção de algumas poucas cidades.

A seguir, reproduzem-se alguns artigos do Código de Trânsito Brasileiro (CTB) relacionados ao tema:

Art. 69. Para cruzar a pista de rolamento, o pedestre tomará precauções de segurança, levando em conta, principalmente, a visibilidade, a distância e a velocidade dos veículos, utilizando sempre as faixas ou passagens a ele destinadas, sempre que estas existirem a até 50 (cinquenta) metros de distância, observadas as seguintes disposições:

I - Onde não houver faixa ou passagem, o cruzamento da via deverá ser feito em sentido perpendicular ao de seu eixo;

II - Para atravessar uma passagem sinalizada para pedestres ou delimitada por marcas sobre a pista:

a) onde houver foco de pedestres, obedecer às indicações das luzes;

b) onde não houver foco de pedestres, aguardar que o semáforo ou o agente de trânsito interrompa o fluxo de veículos;

III - Nas interseções e em suas proximidades, onde não existam faixas de travessia, os pedestres devem atravessar a via na continuação da calçada, observadas as seguintes normas:

a) não deverão adentrar na pista sem antes se certificar de que podem fazê-lo sem obstruir o trânsito de veículos;

b) uma vez iniciada a travessia de uma pista, os pedestres não deverão aumentar o seu percurso, demorar-se ou parar sobre ela sem necessidade.

Art. 70. Os pedestres que estiverem atravessando a via sobre as faixas delimitadas para esse fim terão prioridade de passagem, exceto nos locais com sinalização semafórica, onde deverão ser respeitadas as disposições deste Código.

Parágrafo único. Nos locais em que houver sinalização semafórica de controle de passagem será dada preferência aos pedestres que não tenham concluído a travessia, mesmo em caso de mudança do semáforo liberando a passagem dos veículos.

Art. 71. O órgão ou entidade com circunscrição sobre a via manterá, obrigatoriamente, as faixas e passagens de pedestres em boas condições de visibilidade, higiene, segurança e sinalização.

Um aspecto de grande relevância refere-se ao excesso de semáforos para pedestres instalados em algumas cidades. Em muitos cruzamentos, esses equipamentos são implantados sem necessidade, prejudicando o movimento dos veículos ao aumentar o número de paradas e o tempo de espera. Isso também tem o inconveniente de induzir pedestres a atravessar na luz vermelha, contribuindo para a formação de um hábito perigoso, que pode ser levado, no futuro, para a condução de veículos. Outro aspecto negativo é a poluição visual em razão do grande número de suportes e grupos focais.

Por outro lado, semáforos veiculares com indicação do tempo restante, atualmente bastante comuns, se adequadamente posicionados (visíveis para os pedestres em todas as faixas de segurança), facilitam bastante a travessia de pedestres.

Rotatórias

Rotatórias ou rótulas são dispositivos de forma circular, o mais comum, mas às vezes apenas arredondada, utilizados em locais onde diversas vias se cruzam. Comumente, operam com preferência para os veículos que já estão circulando na rótula, exceto em casos em que há fluxos significativamente maiores em uma direção específica. Nessa situação, o dispositivo pode operar com sinalização de parada nas alças da rotatória.

Entre as principais vantagens das rotatórias, destaca-se o fato de que elas permitem a realização de todos os movimentos: passagem direta, conversão à direita, conversão à esquerda e retorno. Além disso, apresentam boa segurança, pois o condutor usualmente precisa observar apenas um lado (o esquerdo, correspondente à sua janela), justamente aquele com maior visibilidade. Outro benefício é que são autocontroláveis do ponto de vista operacional, já que seu funcionamento se ajusta ao fluxo de veículos no momento, sem necessidade de equipamentos sofisticados, como ocorre nos semáforos acionados pelo tráfego.

Por outro lado, as rotatórias também apresentam desvantagens. Demandam maior espaço físico, têm custo de implantação em geral superior ao de um semáforo e, em geral, oferecem menor capacidade de escoamento em comparação com o controle semaforizado – por isso quando o tráfego cresce necessitam ser semaforizadas.

Um caso especial de rotatória é a minirrotatória (rotatória com pequenas dimensões), utilizada principalmente para reduzir acidentes em cruzamentos com dimensões normais, uma vez que todos os veículos são

obrigados a parar, ou reduzir a velocidade, no local. Com a redução da velocidade na via principal, o dispositivo também atua para facilitar a entrada de veículos da via secundária, reduzindo a fila e a demora dos veículos nessas vias. Esses dispositivos devem ser construídos com material que permita aos veículos maiores passarem sobre eles – o mais comum são tachas e tachões.

Considerando que a travessia de pedestres em rotatórias com grande volume de tráfego pode ser problemática, é importante adotar soluções mitigadoras, como a implantação de faixas de pedestres afastadas da entrada da rotatória.

Na Figura 2.5 são mostradas fotografias de diferentes tipos de rotatórias.



Rotatória comum



Rotatória comum



Rotatória galgável



Minirrotatória totalmente galgável



Minirrotatória galgável



Minirrotatória totalmente galgável

Figura 2.5 Rotatórias e minirrotatórias.

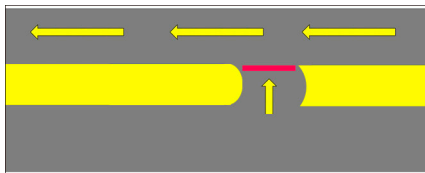
Retornos

Retornos são dispositivos viários que permitem aos veículos alterar em 180° o sentido do seu movimento, ou seja, inverter o sentido de percurso.

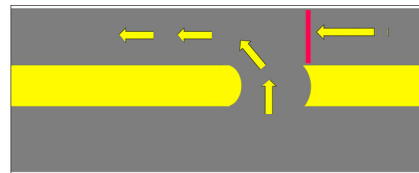
Os retornos muitas vezes são utilizados para eliminar as conversões à esquerda em cruzamentos semaforizados de vias com duplo sentido de tráfego, com o objetivo de melhorar o desempenho do semáforo, reduzindo esperas e paradas. Nesses casos, os retornos são posicionados após os semáforos, a uma distância não excessiva.

O retorno pode ter diferentes configurações: com interrupção do movimento (ou seja, com parada obrigatória para o ingresso na via principal no sentido oposto), sem interrupção do movimento (em que a parada obrigatória ocorre apenas para a via principal em sentido oposto), ou sem interrupção do movimento em faixa exclusiva – situação que exige a adoção de raios de curvatura maiores.

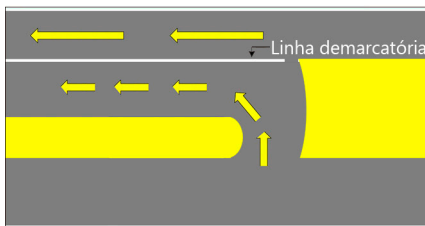
A Figura 2.6 ilustra essas diferentes situações operacionais. Em muitos casos, os retornos também são realizados por meio de rotatórias ou podem ser semaforizados.



Com parada no retorno



Com parada na via principal



Retorno em faixa exclusiva



Foto de dispositivo de retorno

Figura 2.6 Tipos de retorno.

Cruzamento em desnível

Quando os volumes de tráfego das vias que se cruzam são muito elevados, provocando congestionamentos, a solução mais eficaz é a constru-

ção de viaduto, permitindo que os fluxos passem em níveis distintos. Embora o custo de implantação desse tipo de estrutura seja elevado, muitas vezes constitui a única alternativa satisfatória.

Um problema comumente associado a essa solução é a degradação do entorno, com desvalorização dos imóveis devido à dificuldade de acesso e aos impactos visuais e sonoros negativos provocados pela proximidade da estrutura do viaduto.

2.2 NECESSIDADE DE SEMÁFORO EM CRUZAMENTOS

Em geral, a decisão de instalar um semáforo para substituir o sinal de parada obrigatória em um cruzamento é tomada quando ocorre uma ou mais das seguintes situações:

- A demora, e conseqüentemente o tamanho da fila, para que os veículos da via secundária ingressem na via principal é muito elevada;
- A demora para que os pedestres consigam cruzar a via principal é excessiva;
- O índice de acidentalidade no local é elevado;
- A tomada de decisão para entrar no cruzamento é complexa, portanto incômoda para condutores e pedestres.

OBSERVAÇÕES

A entrada dos veículos da via secundária em cruzamentos com sinalização de parada obrigatória envolve as seguintes etapas: movimentação do segundo veículo da fila até a posição em que o condutor passa a ter visibilidade suficiente para decidir se entra ou não na via preferencial. A decisão será favorável se houver brecha suficiente entre sua chegada e a passagem do primeiro veículo na via principal ou, alternativamente, se houver uma brecha entre dois veículos consecutivos que trafegam na via principal.

O tempo necessário para que o segundo veículo adquira visibilidade depende das características do cruzamento. Quando, na segunda posição o veículo já possui visibilidade, esse tempo é teoricamente igual a zero. Em situações típicas, como em esquinas, esse valor situa-se em torno de 5 segundos. Se o veículo chega e não há fila, o tempo de posicionamento também é considerado igual a zero.

Essa sistemática de operação permite estimar a capacidade por faixa de entrada dos veículos provenientes da via secundária que cor-

responde ao volume máximo que pode ingressar na via preferencial – nessas condições sempre existe fila. Por exemplo:

- Se o tempo médio de espera do primeiro veículo para entrar na via principal é de 0 segundos (não há fluxo na via principal), a capacidade de entrada será de $3.600 / 5 = 720$ veículos por hora;
- Se o tempo médio de espera é de 5 segundos, a capacidade passa a ser $3.600 / (5 + 5) = 360$ veículos por hora;
- Se o tempo médio é de 15 segundos, a capacidade reduz-se para $3.600 / (5 + 15) = 180$ veículos por hora.

A seguir são apresentados os principais critérios utilizados para se avaliar a pertinência ou não da instalação de semáforo em uma interseção.

Indicação 1: Fluxos de veículos médios nas vias principal e secundária

Os valores indicativos são mostrados na Tabela 2.1 e devem ser superados em ambas as vias.

Tabela 2.1 Fluxos médios de veículos nas vias principal e secundária.

Número de faixas		Volume total dos dois sentidos da via principal (v/h)	Volume do sentido de maior movimento da via secundária (v/h)
Via principal	Via secundária		
1	1	500	150
2 ou +	1	600	150
2 ou +	2 ou +	600	200
1	2 ou +	500	200

Nota: Quando predominam velocidades maiores que 65 km/h na via principal ou o cruzamento se localiza numa cidade com população menor que 10 mil habitantes, os valores citados deverão ser reduzidos em 30%.

Indicação 2: Fluxo alto na via principal e baixo na via secundária

Os valores indicativos encontram-se na Tabela 2.2 e também devem ser superados em ambas as vias.

Tabela 2.2 Fluxo alto na via principal e baixo na via secundária.

Número de faixas		Volume total dos dois sentidos da via principal (v/h)	Volume do sentido de maior movimento da via secundária (v/h)
Via principal	Via secundária		
1	1	750	75
2 ou +	1	900	75
2 ou +	2 ou +	900	100
1	2 ou +	750	100

Nota: Quando predominam velocidades maiores que 65 km/h na via principal ou o cruzamento se localiza numa cidade com população menor que 10 mil habitantes, os valores citados deverão ser reduzidos em 30%.

Indicação 3: Fluxo alto de veículos e significativo de pedestres

Os valores indicativos encontram-se na Tabela 2.3 e ambos os volumes devem ser superados.

Tabela 2.3 Fluxo alto de veículos e significativo de pedestres.

Canteiro central	Volume total dos dois sentidos da via (v/h)	Volume total de pedestres cruzando a via (p/h)
Sem ou com largura insuficiente para abrigo dos pedestres (< 0,80 m)	600	150
Com largura suficiente para abrigo dos pedestres (> 0,80 m)	1000	150

Nota: Quando predominam velocidades maiores que 65 km/h na via principal ou o cruzamento se localiza numa cidade com população menor que 10 mil habitantes, os valores citados deverão ser reduzidos em 30%.

Indicação 4: Necessidade de agrupamento dos veículos na via principal para facilitar a travessia de veículos e/ou pedestres em cruzamentos a jusante

A instalação de semáforo pode ser justificada com o objetivo de interromper o fluxo contínuo de veículos na via principal (preferencial), facilitando o cruzamento por parte dos veículos provenientes das vias secundárias e dos pedestres. A Figura 2.7 ilustra essa situação.

O pelotão (agrupamento) de veículos se mantém coeso até aproximadamente 400 a 500 metros a jusante do semáforo. A partir daí a dispersão dos veículos torna-se acentuada e o efeito da presença do semáforo a jusante praticamente deixa de existir.

Um benefício secundário do tráfego de veículos em pelotões é a redução da velocidade média de circulação na via.

Ainda que a situação ilustrada se refira a uma via de sentido único, o conceito também se aplica a vias com duplo sentido de circulação.

Nesses casos, fica evidente o prejuízo à operação da via quando condutores, principalmente de motocicletas e bicicletas, atravessam o semáforo com a luz vermelha, impedindo a passagem de veículos e pedestres nos cruzamentos subseqüentes localizados a jusante. Vale destacar que o avanço do sinal vermelho, além de configurar infração grave, compromete o funcionamento adequado do trânsito em qualquer circunstância.

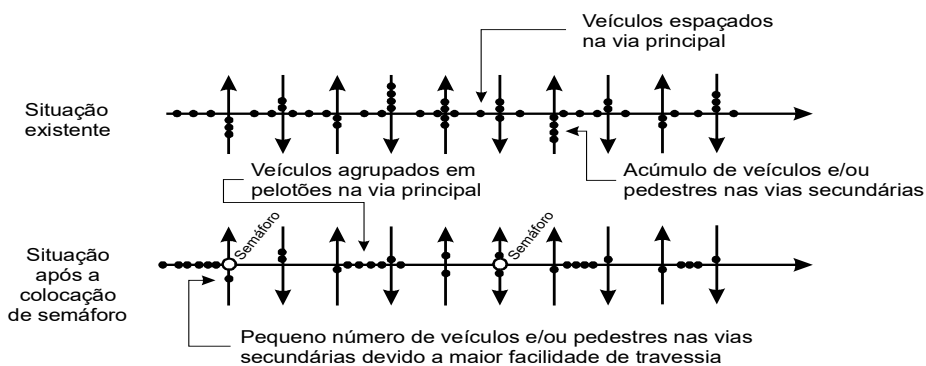


Figura 2.7 Semáforos implantados para proporcionar a interrupção de fluxo contínuo.

Indicação 5: Índice alto de acidentes

Alguns cruzamentos, em razão da dificuldade de visibilidade (para condutores e/ou pedestres), devido à presença de curvas ou de obstáculos próximos, ou ainda da velocidade excessiva em razão da declividade acentuada, apresentam um elevado número de acidentes ou um grande potencial para sua ocorrência (o que pode ser constatado por meio de inspeção em campo).

Nesses casos, se outras intervenções possíveis não puderem ser implementadas ou se mostrarem ineficazes – como, por exemplo, a mudança de posição da placa de *PARE*, a colocação da placa em ambos os lados da via, a implantação de sinalização horizontal de *PARE* no pavimento ou a instalação de lombada na via principal próxima ao cruzamento (entre 15 e 25 metros da guia transversal mais próxima) –, é indicada a instalação de semáforo no local.

Indicação 6: Situações especiais

Em alguns cruzamentos, ainda que o volume de veículos e pedestres não seja elevado, nem haja histórico significativo de acidentes, pode ser recomendada a instalação de semáforos com o objetivo de melhorar a comodidade dos usuários (condutores e pedestres), reduzindo a complexidade da tomada de decisão e eliminando a sensação de insegurança.

A instalação de semáforos também é indicada nas seguintes situações:

- Grande número de escolares ou funcionários atravessando a via no mesmo local nos horários de entrada e saída das atividades. Nesses casos, recomenda-se a implantação de semáforos para pedestres acionados por botoeiras (botões), que, após certo tempo, tornam a luz vermelha para os veículos e verde para os pedestres;
- Travessia eventual de pedestres em vias com fluxo muito intenso em determinados horários. Também se recomenda, nesse caso, o uso de semáforo de pedestre com botoeira;
- Locais de saída de veículos de emergência (bombeiros, ambulâncias, etc.). O semáforo deve ser acionado por botoeira instalada no interior das instalações;
- Travessia de ferrovias. O semáforo, nesse caso, é atuado automaticamente pela composição ferroviária ao se aproximar do cruzamento.

OBSERVAÇÕES

Os valores citados nas Indicações 1, 2 e 3 não são rígidos, pois diversos outros fatores interferem na operação, como a geometria da interseção, a visibilidade e o porte da cidade (nas cidades maiores, os motoristas tendem a ser mais experientes), entre outros. Um exame no local é sempre fundamental, pois há situações em que os valores de referência são superados e, ainda assim, a qualidade da operação (nível de serviço) permanece adequada. Em contrapartida, há casos em que os valores não são ultrapassados, mas o nível de serviço é insatisfatório, podendo melhorar consideravelmente com a implantação de semáforo.

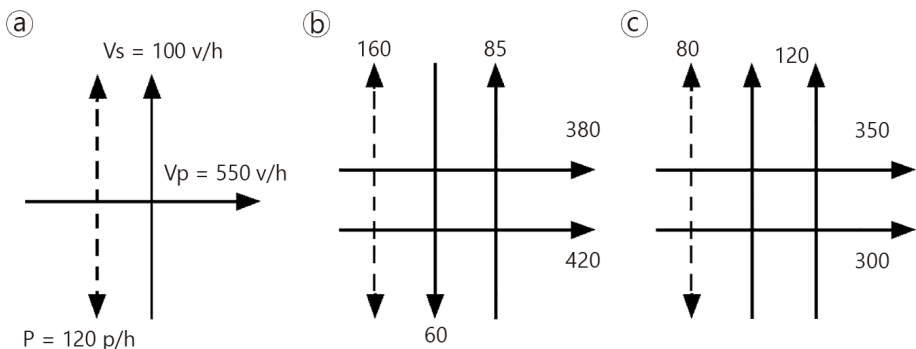
Em princípio, a superação dos valores citados em diversas horas do dia justifica a colocação de semáforo. No entanto, mesmo que essa superação ocorra apenas nos períodos de pico, a formação de grandes filas nas vias secundárias já constitui motivo suficiente para sua implantação. Nesse caso, é possível optar por uma operação semafórica restrita às horas de pico. No restante do tempo, o cruzamento pode operar com luz amarela piscante e sinalização de parada obrigatória na via secundária. Para que essa estratégia funcione de forma segura e eficiente, é fundamental que o local esteja devidamente sinalizado. Outra possibilidade é o uso de semáforo atuado pelo tráfego.

Quando o problema identificado for a demora dos veículos na via secundária, uma alternativa que deve ser considerada antes da decisão de instalar o semáforo é a implantação de duas faixas de tráfego nessa via, nas proximidades da interseção, o que pode ser viabilizado com a eliminação de algumas poucas vagas de estacionamento.

No caso em que o problema seja a elevada acidentalidade, recomenda-se inicialmente a melhoria da sinalização, antes da instalação do semáforo. Entre as medidas possíveis estão: colocação de placa de *PARE* em ambos os lados da via, implantação de sinalização horizontal (*PARE* pintado no pavimento), melhoria da visibilidade com a remoção de obstáculos, implantação de minirrotatória ou colocação de lombada na via principal próxima ao cruzamento (entre 15 e 25 metros da primeira guia transversal). A presença de lombada nas imediações do cruzamento também contribui para facilitar a entrada dos veículos provenientes da via secundária.

2.3 EXERCÍCIOS

1. Quais os principais tipos de controle do tráfego em cruzamentos? Quais os tipos de sinalização associados a cada um deles? Em que situações se justifica a utilização de viadutos?
2. Qual a diferença entre os sinais de “Parada Obrigatória e “Dê a Preferência”. Como os condutores interpretam esses sinais nos países desenvolvidos e no Brasil?
3. Qual a função de semáforo em um cruzamento?
4. O que são rotatórias e para que servem?
5. O que são retorno e quais as suas funções? Quais os tipos de retorno quanto à operação?
6. Em que situações são utilizados viadutos viários? Quais os prós e os contras dos mesmos?
7. Conceituar tempo de posicionamento e explicar como ocorre a passagem em um cruzamento com sinal de “PARE” dos veículos da via secundária.
8. Quais as principais situações genéricas indicativas a implantação de semáforo em uma interseção?
9. Verificar a necessidade de instalação de semáforo nos cruzamentos abaixo, com base nos critérios 1, 2 e 3. Refazer o exercício considerando a velocidade na via principal igual a 70 km/h ou o cruzamento localizado em uma cidade com 8.000 habitantes.



10. Nas horas de maior movimento tem ocorrido formação de filas de veículos nas vias secundárias que cruzam uma via principal (preferencial). Que solução você sugeriria para esse problema?
11. Comentar sobre as situações especiais onde se recomenda a implantação de semáforo.
12. Relatar de forma sintética as principais observações acerca da colocação de semáforo.

CONCEITOS BÁSICOS NA OPERAÇÃO DE SEMÁFOROS

Capítulo

3

3.1 GRUPO FOCAL E ESTRUTURA DE SUSTENTAÇÃO

Grupo focal e indicações luminosas

Denomina-se grupo focal o conjunto de focos (lentes coloridas nas cores vermelha, amarela e verde) que controla cada conjunto de movimentos em um cruzamento semaforizado.

As indicações luminosas mais comuns e os padrões dos focos semaforicos são mostrados na Figura 3.1.

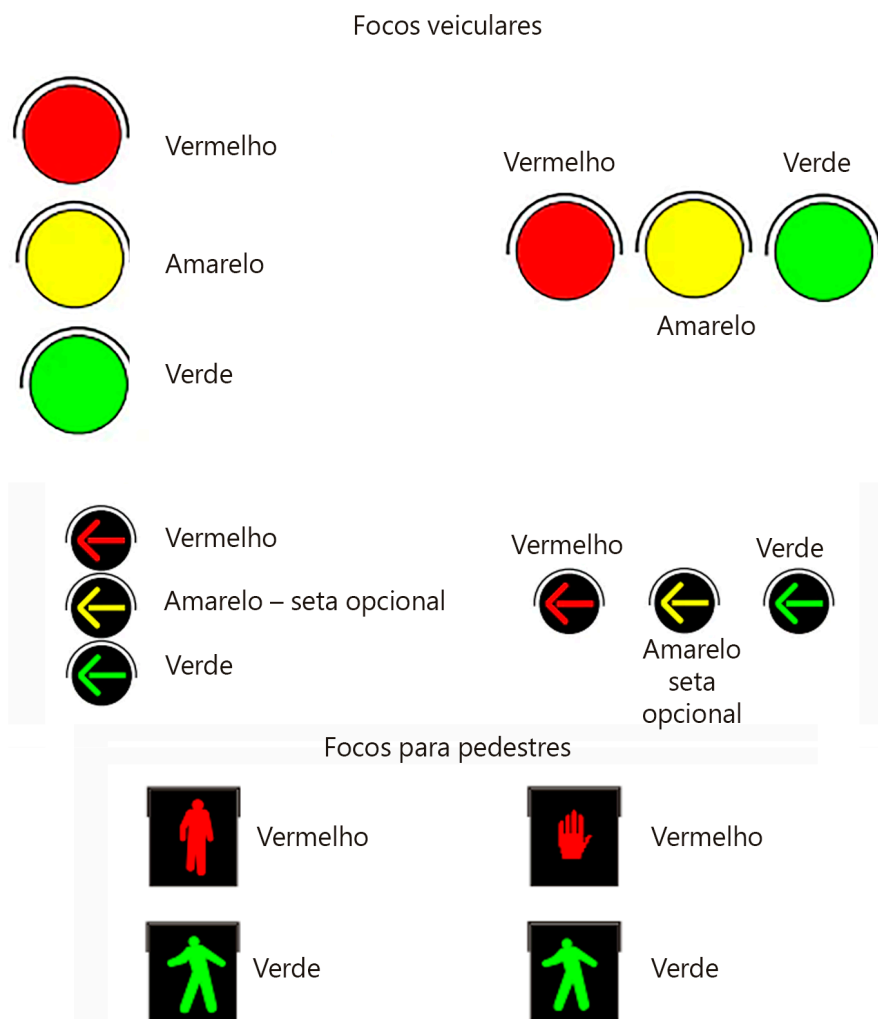


Figura 3.1 Indicações luminosas em semáforos.

Os focos para veículos são circulares, com diâmetro de 200 ou 300 mm; os focos para pedestres são quadrados, com lado de 200 ou 300 mm. Os focos maiores proporcionam maior visibilidade e devem ser obrigatoriamente utilizados quando a distância entre a linha de parada e os focos for maior.

A lente seta é empregada em cruzamentos semaforizados quando os movimentos de avanço em frente e de conversão à esquerda e/ou à direita não ocorrem apenas nos mesmos períodos. Quando se utiliza lente seta em semáforos, é fundamental haver sinalização horizontal no pavimento para que os motoristas possam posicionar adequadamente os veículos de acordo com a direção que vão seguir.

Nos semáforos para veículos, a liberação de passagem é indicada pela luz verde e a proibição, pela luz vermelha. O aviso de que o direito de passagem está terminando é dado pela luz amarela, que é exibida somente após a luz verde.

A luz amarela deve ser utilizada por veículos que estejam se aproximando do cruzamento no momento em que a luz ainda está verde, mas que se encontram tão próximos da linha de retenção que não conseguem parar com segurança e conforto antes de cruzá-la. Nesses casos, os veículos devem prosseguir e entrar no cruzamento com a luz amarela. Daí a afirmação comum: “o amarelo é do verde”.

Nos semáforos para pedestres, a liberação da passagem é indicada pelo boneco verde em posição de caminhada, e a proibição, pela mão aberta em vermelho ou pelo boneco vermelho em posição estática. A advertência de que o direito de passagem está se encerrando não é feita por luz amarela, mas sim pela luz vermelha piscando. Quando essa luz estiver piscando, os pedestres que já iniciaram a travessia devem concluí-la, enquanto aqueles que ainda estiverem na calçada não devem iniciar a travessia, pois não terão tempo suficiente para completá-la com segurança – antes de concluírem a travessia o sinal vai estar verde para um ou mais fluxos de veículos que cruzam a faixa de pedestres.

Um elemento importante no foco de semáforos é o cobre-foco (pesta-na) de cor preta que tem por objetivo impedir a incidência direta dos raios solares sobre a lente prejudicando a visibilidade.

Outro componente comumente utilizado é o anteparo, também de cor preta, instalado na parte traseira do grupo focal com o objetivo de melhorar a sua conspicuidade (percepção visual). O emprego de orla com mate-

rial reflexivo de cor branca ou amarela contribui ainda mais para melhorar a conspicuidade do grupo focal.

No passado, os semáforos utilizavam lâmpadas incandescentes (com filamento reforçado ou halógena) e lentes coloridas. Atualmente, são utilizadas placas de LEDs (*light emitting diode* – diodo emissor de luz) coloridos, com lentes transparentes. A utilização de LEDs apresenta diversas vantagens: evitam o efeito “fantasma” (quando a incidência direta de luz solar dá a falsa impressão de que a luz apagada está acesa); consomem menos energia; possuem maior durabilidade; e não requerem substituição imediata em caso de falha, pois o grande número de LEDs faz com que a queima de alguns não seja perceptível. Além disso, existem máscaras especiais que podem ser colocadas sobre a lente para ocultar os LEDs queimados.

Estrutura de sustentação

Na Figura 3.2 são mostrados os tipos de estrutura de sustentação típicos dos grupos focais veiculares.

Os semáforos comuns destinados a veículos e pedestres são mostrados na Figura 3.3.

Há alguns anos, por iniciativa de algumas empresas fabricantes – avaliadas em pesquisas desenvolvidas Pós-Graduação em Transportes da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo (EESC-USP) –, foram desenvolvidos novos modelos de sustentação de semáforos com visual mais moderno e esteticamente mais agradável. Esses modelos utilizam focos maiores, com diâmetro de 300 mm, e incluem dispositivo indicador do tempo restante de verde ou vermelho (*temporizador*).

Esses novos tipos são mostrados na Figura 3.4 (modelo tipo totem em que o grupo focal fica na lateral da via, na calçada ou no canteiro central) e na Figura 3.5 (modelo tipo semipórtico em que o grupo focal fica projetado sobre a via).

Os estudos realizados indicam que esses novos modelos de semáforo aumentam a segurança, proporcionam maior comodidade aos usuários e agregam valor estético à sinalização de trânsito. É importante ressaltar que o padrão oficial de semáforos, caracterizado pelo grupo focal, permanece o mesmo; a indicação do tempo restante por meio do temporizador deve ser considerada apenas como uma informação adicional.

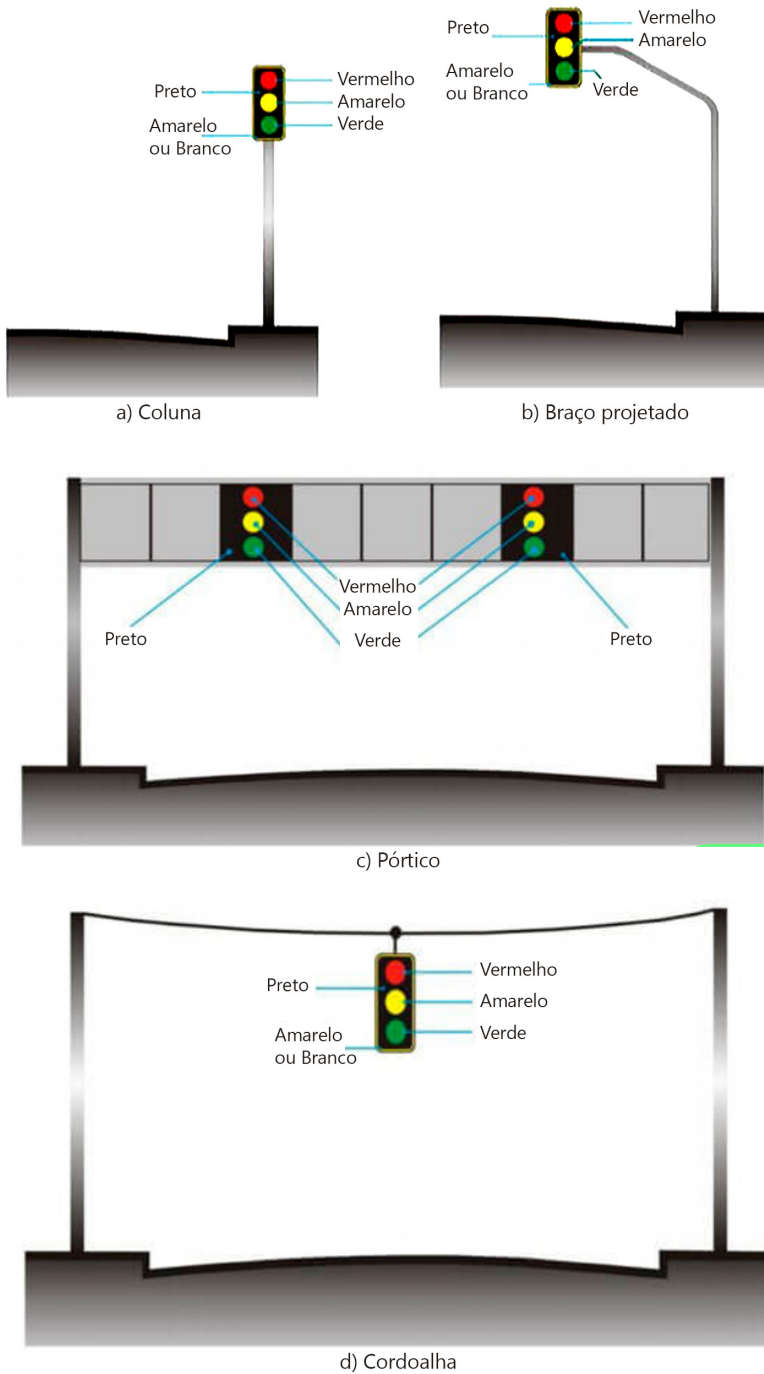


Figura 3.2 Estruturas de sustentação dos grupos focais veiculares.



Suportes metálicos de grupos focais veiculares



Focos com pestana e grupo focal com anteparo



Suporte e grupo focal para pedestre

Figura 3.3 Suportes metálicos e grupo focal típico.



Figura 3.4 Semáforo tipo totem.



Figura 3.5 Semáforo tipo semipórtico.

Antes da utilização do temporizador em semáforos veiculares, o uso desse dispositivo era mais comum em semáforos para pedestres, como ilustrado na Figura 3.6.

Em locais com baixo número de pedestres, recomenda-se a utilização de semáforo para pedestres com acionamento por botoeira (botão), como também mostrado na Figura 3.6. Após o acionamento e transcorrido determinado tempo, o sistema interrompe o tráfego de veículos na via com a luz vermelha e libera a travessia de pedestres com a luz verde.



Figura 3.6 Foco para pedestre com mostrador de tempo e dispositivos tipo botoeira.

3.2 TIPOS DE MOVIMENTO, ESTÁGIOS E FASES

Movimentos conflitantes e não conflitantes

A Figura 3.7 mostra os movimentos conflitantes e não conflitantes em um semáforo simples instalado na confluência de duas vias de mão única.

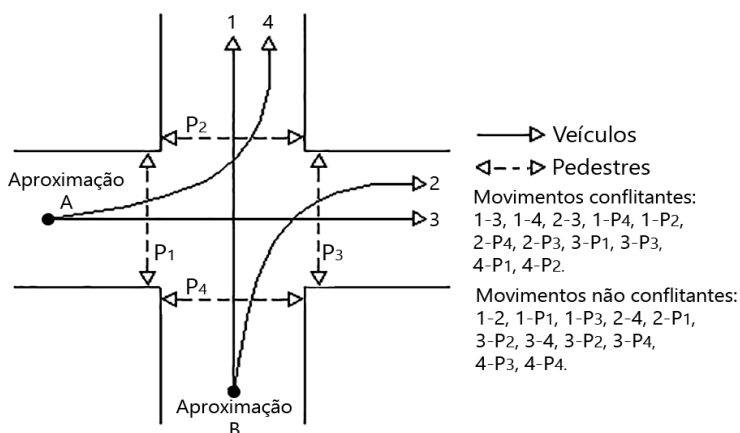


Figura 3.7 Tipos de movimentos nos semáforos.

Os movimentos de veículos e pedestres em um semáforo podem ser classificados como protegidos ou permitidos. São considerados protegidos quando realizados em fase exclusiva, com prioridade assegurada. Exemplos incluem a fase exclusiva para conversão à esquerda e a fase exclusiva para travessia de pedestres. Já os movimentos permitidos são aqueles autorizados, porém realizados sem preferência, ou seja, em meio a fluxos conflitantes de veículos e/ou pedestres. Exemplos são a conversão à esquerda em fase não exclusiva e a travessia de pedestres em cruzamentos sem semáforo específico para pedestres.

Diagramas de estágios, de fases e de tempos

O termo *estágio* é utilizado para designar cada uma das diferentes configurações de movimentos em um cruzamento semaforizado. Durante um estágio, a indicação luminosa de todos os grupos focais não se altera. Sempre que há mudança na indicação luminosa, interrompendo um ou mais fluxos (de veículos e/ou pedestres) para permitir o movimento de outros fluxos que estavam interrompidos, passa-se de um estágio para outro.

Já o termo *fase* refere-se a cada uma das configurações em que pelo menos um dos fluxos permanece em movimento, mesmo que outros sejam interrompidos para liberar o tráfego de fluxos anteriormente interrompidos. As diferentes configurações dentro de uma mesma fase são chamadas de *subfases*, as quais coincidem com os estágios.

O *diagrama de tempos* representa o comportamento das indicações luminosas nos diversos grupos focais ao longo do tempo.

As indicações luminosas (verde, amarelo e vermelho) dos grupos focais dos semáforos tendem a se repetir de forma idêntica ao longo do tempo, caracterizando um fenômeno periódico ou cíclico. Denomina-se *ciclo do semáforo* o período de tempo no qual a sucessão de indicações luminosas se repete de forma análoga.

Na Figura 3.8 é mostrado o plano de operação semaforístico (diagramas de estágios, fases e tempos) usualmente empregado no caso simples de um cruzamento entre duas vias de sentido único. As letras G, R e Y, utilizadas para designar os períodos de verde, vermelho e amarelo, correspondem às iniciais das palavras em inglês *green*, *red* e *yellow*.

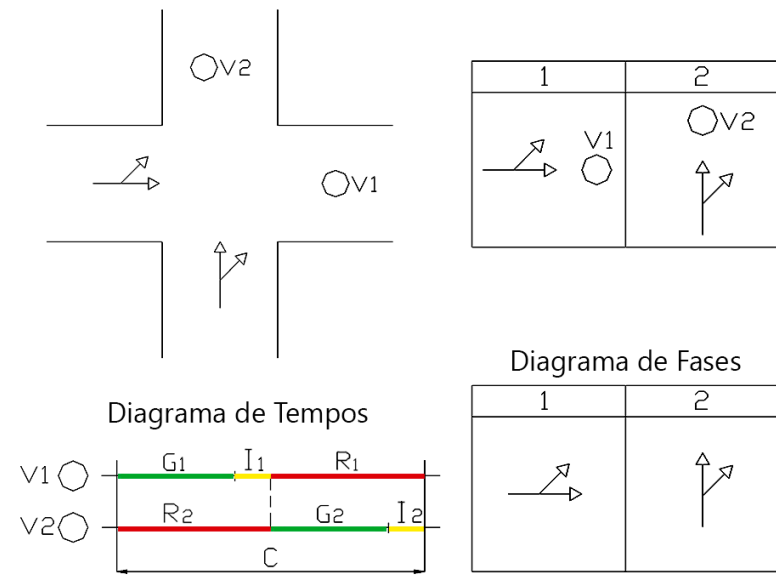


Figura 3.8 Operação de semáforo no cruzamento de duas vias de sentido único.

Vermelho total e entreverdes

Após a entrada do último veículo no cruzamento, ao final da exibição da luz amarela, deve-se, por razões de segurança, proibir a passagem de fluxos conflitantes, mantendo a luz vermelha para esses movimentos. Esse intervalo de tempo em que todos os fluxos conflitantes estão com a luz vermelha é denominado de vermelho geral, conforme ilustrado na Figura 3.9.

A soma do tempo de amarelo (Y) com o vermelho geral (Rg) é denominada de período entreverdes (I - *Intergreen*, em inglês), ou seja:

$$I = Y + Rg$$

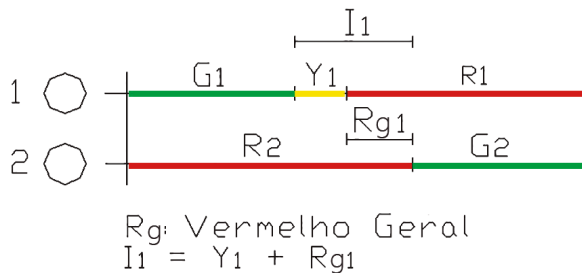


Figura 3.9 Conceito de vermelho geral.

Semáforo com fase exclusiva para pedestres

No exemplo representado na Figura 3.9, a travessia de pedestres pela faixa localizada no lado da chegada dos veículos ao cruzamento não apresenta problemas, pois, no período em que o fluxo de entrada é interrompido pela luz vermelha, os pedestres podem atravessar com segurança. Isso caracteriza um movimento protegido, mesmo na ausência de grupo focal específico para pedestres.

Contudo, nas saídas do cruzamento, não há programação de período sem passagem de veículos. Assim, o movimento de pedestres é permitido, mas não protegido. Nesse caso, os pedestres devem aguardar intervalos de tempo (brechas) adequados entre a passagem de veículos consecutivos para realizar a travessia.

Imediatamente após o fluxo que segue em frente ser interrompido pela luz vermelha, os pedestres que iniciam a travessia têm prioridade sobre os fluxos veiculares que realizam conversões à direita ou à esquerda. Essa regra é amplamente respeitada em países desenvolvidos; no Brasil, apenas parcialmente. Um exemplo interessante é a cidade de Montevidéu, capital do Uruguai, onde, apesar do grande fluxo de veículos e pedestres na área central, na maioria dos cruzamentos não são utilizados semáforos específicos para pedestres – sendo a regra mencionada obedecida plenamente.

A presença de temporizadores nos semáforos veiculares, quando visíveis aos pedestres em todas as faixas de travessia, contribui significativamente para a segurança e a comodidade na travessia.

No entanto, nos casos em que o movimento de pedestres é intenso no cruzamento, pode ser necessária a adoção de uma fase exclusiva para garantir a travessia protegida, como indicado na Figura 3.10.

Muitas vezes, no entanto, semáforos para pedestres são instalados sem real necessidade, o que prejudica significativamente o desempenho do tráfego de veículos no cruzamento e contribui para a poluição visual da cidade devido ao excesso de suportes e grupos focais destinados à travessia de pedestres.

Por outro lado, em travessias localizadas no meio de quarteirões compridos, quando o fluxo de veículos é muito intenso e não há semáforo a montante que promova a interrupção do fluxo contínuo, é recomendada a instalação de semáforo para pedestres.

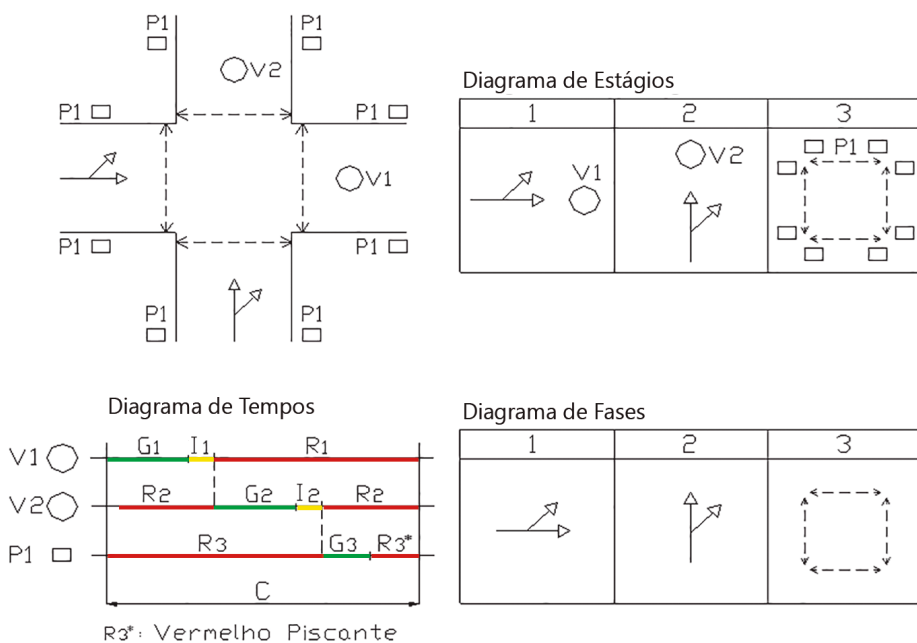


Figura 3.10 Operação de semáforo com fase exclusiva para pedestres.

3.3 SEMÁFOROS COM CONVERSÃO À ESQUERDA

A Figura 3.11 apresenta as características de um semáforo instalado em um cruzamento entre uma via de mão única e uma via de mão dupla, no qual a conversão à esquerda é permitida, mas não protegida. Nesse caso, os veículos só podem realizar a conversão à esquerda se a luz estiver verde e não houver nenhum veículo se aproximando em sentido oposto a curta distância. Esse tipo de operação tem algum risco e só deve ser adotado em situações de baixo volume de tráfego no cruzamento, especialmente o fluxo de conversão à esquerda.

A Figura 3.12 mostra uma primeira alternativa de operação em que a conversão à esquerda na via de mão dupla é protegida. Nesse caso, não há necessidade de utilização de grupo focal com lente seta para sinalizar o movimento de conversão à esquerda, ainda que ele possa ser utilizado para melhorar o entendimento dos condutores.

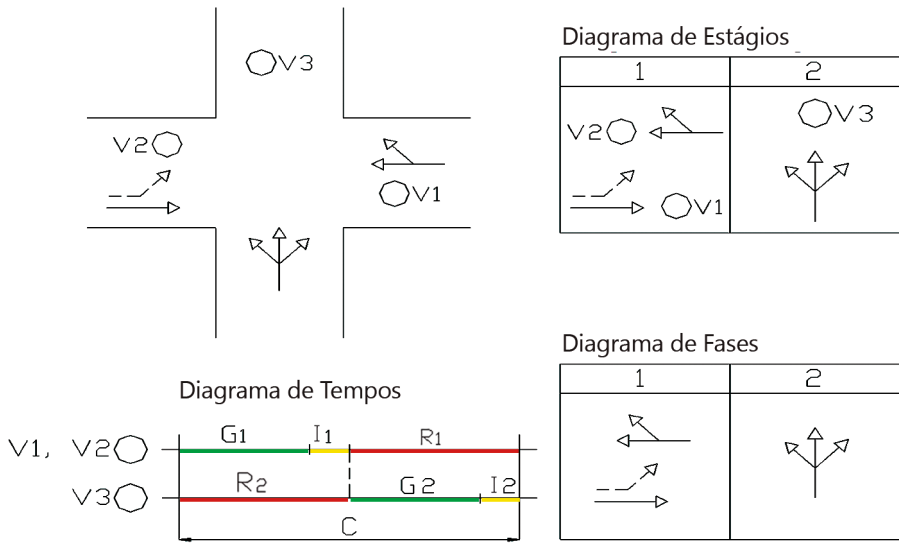


Figura 3.11 Operação com conversão à esquerda não protegida.

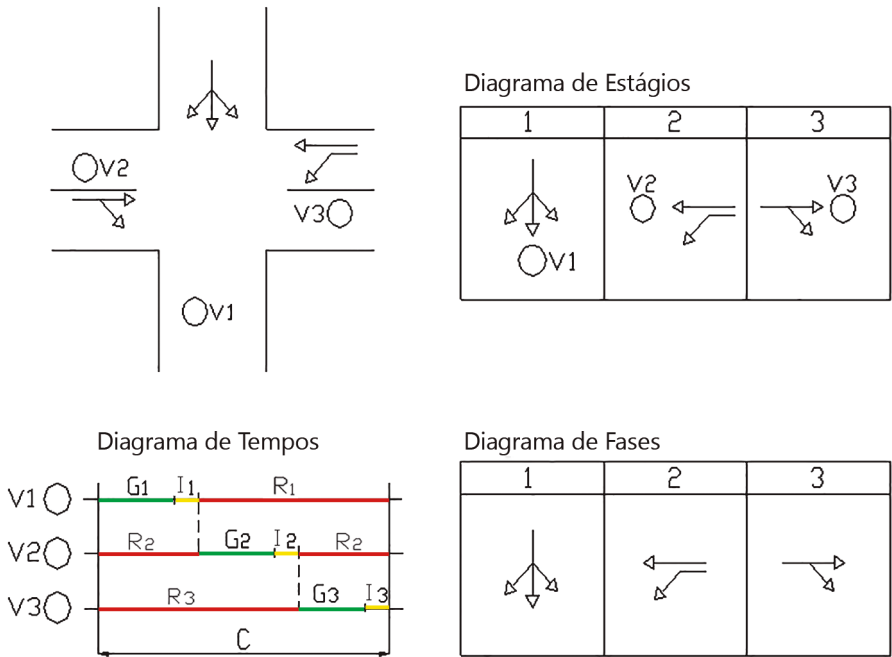


Figura 3.12 Operação com conversão à esquerda protegida – Alternativa 1.

A Figura 3.13 apresenta uma segunda alternativa de operação em que a conversão à esquerda na via de mão dupla é protegida. Nessa situação, há necessidade de utilização de grupo focal com lente seta para sinalizar o movimento de conversão à esquerda.

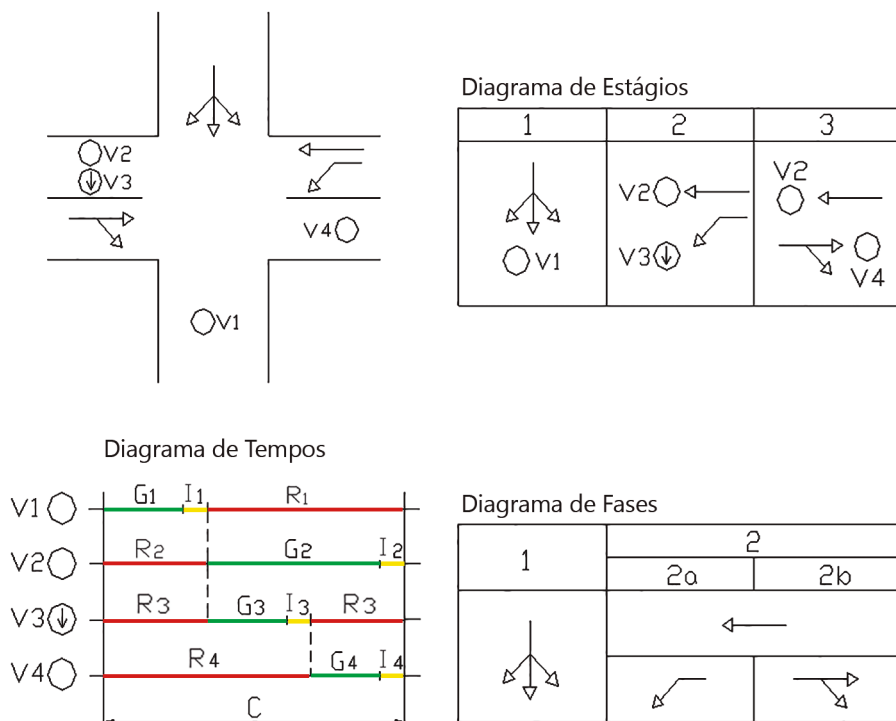


Figura 3.13 Operação com conversão à esquerda protegida – Alternativa 2.

Essa segunda opção apresenta a vantagem de proporcionar maior tempo de verde para o fluxo que segue em frente (sinalizado pelo grupo focal V2), pois esse fluxo se movimenta durante dois estágios. Isso aumenta a capacidade desse fluxo e reduz o tempo de espera dos veículos, contribuindo para a maior eficiência geral da operação no cruzamento.

Na sequência de estágios ilustrada na Figura 3.13, o movimento de conversão à esquerda é liberado antes do movimento no sentido oposto, razão pela qual essa operação é denominada de “conversão à esquerda com verde adiantado” ou “verde avançado”. Se a sequência for diferente, com o movimento de conversão à esquerda ocorrendo após o movimento do fluxo oposto (Figura 3.14), a operação recebe o nome de “conversão à esquerda com verde atrasado” ou “verde retardado”.

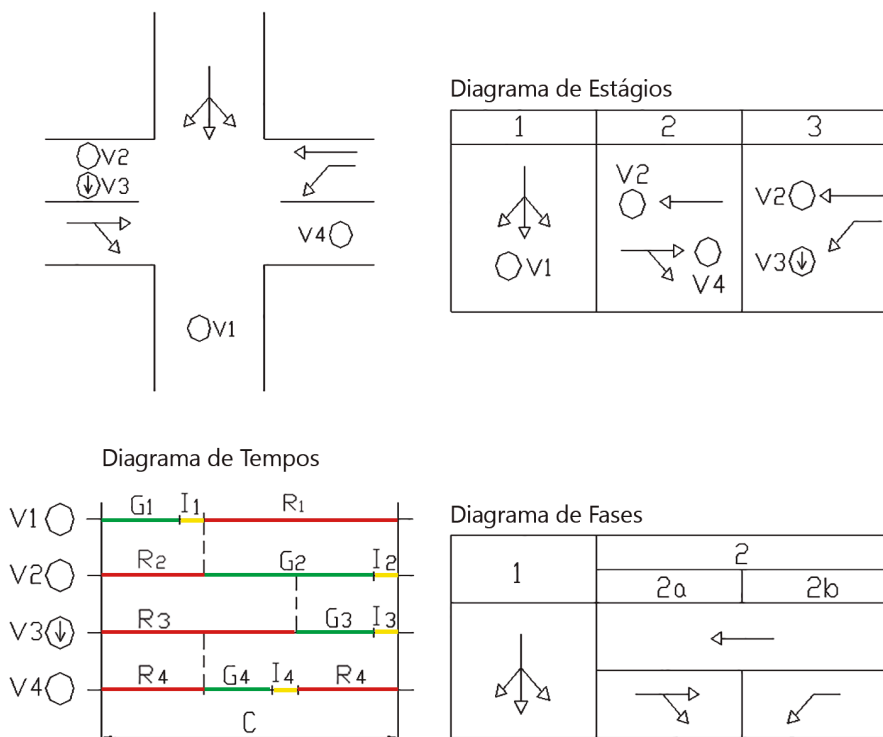


Figura 3.14 Operação com conversão à esquerda protegida – Alternativa 3.

A alternativa de operação mais adequada para permitir a conversão à esquerda protegida depende de diversos fatores, como o volume de veículos e pedestres nos diferentes fluxos, o uso de faixa exclusiva ou compartilhada (neste caso, os veículos que seguem em frente também podem utilizar a faixa destinada aos que realizam a conversão), a necessidade de coordenação com outros semáforos próximos, entre outros aspectos.

3.4. OUTROS PLANOS DE OPERAÇÃO DE SEMÁFOROS

Na sequência, são apresentados outros exemplos de planos de operação semafórica, bem como comentados outros aspectos relevantes sobre o funcionamento de semáforos.

A Figura 3.15 ilustra o caso de um cruzamento entre duas vias de mão dupla, com semáforo de quatro fases e quatro estágios, em que o direito de passagem é concedido para cada aproximação individualmente. Dessa forma, todos os movimentos são permitidos, com exceção do movimento de retorno.

Esse tipo de configuração apresenta como principal desvantagem o elevado tempo total perdido no ciclo, pois o tempo perdido em cada fase deve ser multiplicado por quatro (correspondente ao número de fases), o que reduz a capacidade da interseção. Além disso, a indicação de verde demora consideravelmente para retornar a cada aproximação, gerando longas esperas para os veículos.

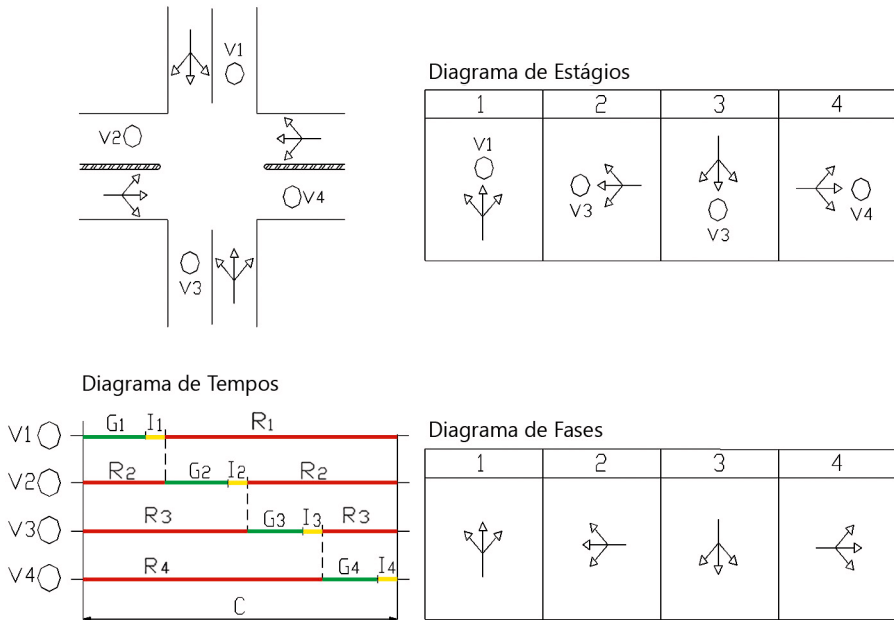


Figura 3.15 Semáforo com quatro fases e quatro estágios no cruzamento de duas vias de mão dupla.

A Figura 3.16 apresenta uma alternativa de operação para o mesmo cruzamento mostrado na Figura 3.15. Nesse caso, a conversão à esquerda na via “vertical” é proibida, e o semáforo opera com quatro estágios e duas fases. Em comparação com a solução anterior, o tempo perdido por ciclo é menor, assim como as esperas dos veículos. A desvantagem é que os veículos que desejam realizar a conversão à esquerda na via “vertical” – que é proibida – precisam percorrer distâncias maiores para chegar ao destino.

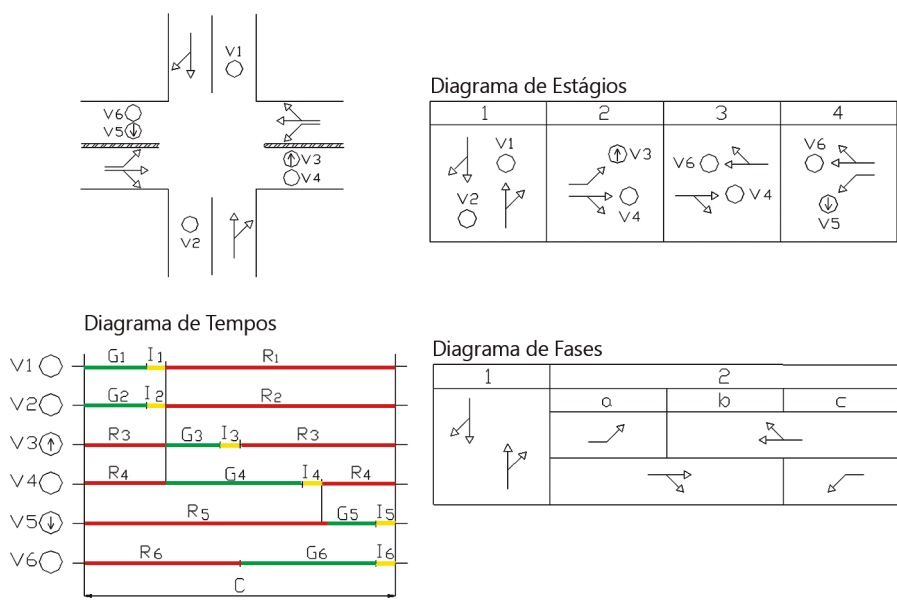


Figura 3.16 Semáforo com duas fases e quatro estágios no cruzamento de duas vias de mão dupla.

Para evitar o uso de um grande número de fases (estágios), o que reduz a capacidade da interseção e aumenta o tempo de espera dos veículos, muitas vezes é indicado proibir a conversão à esquerda no semáforo. Nesses casos, os veículos são obrigados a fazer alças para seguir na direção perpendicular à via em que se encontram, conforme mostrado na Figura 3.17.

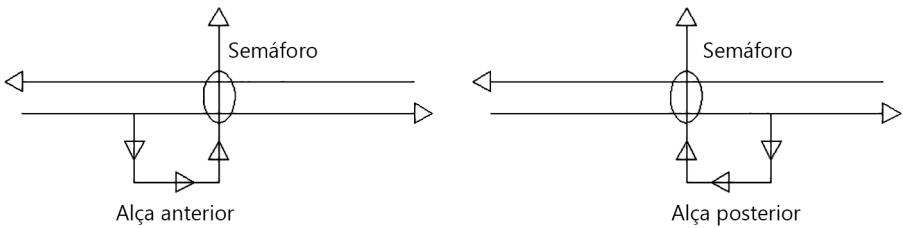


Figura 3.17 Desvio em forma de alça para conversão à esquerda.

Outra possibilidade para eliminar as conversões à esquerda em vias de duplo sentido é a utilização de dispositivos do tipo *retorno* localizados após o semáforo. O retorno pode ser: com interrupção do movimento (parada

obrigatória para ingresso na via principal); sem interrupção do movimento (parada obrigatória para a via principal); ou sem interrupção do movimento em faixa exclusiva (situação que exige o uso de raios de curvatura maiores).

A Figura 3.18 apresenta essas diferentes configurações. Em muitos casos, as operações de retorno também podem ser realizadas em rotatórias próximas.

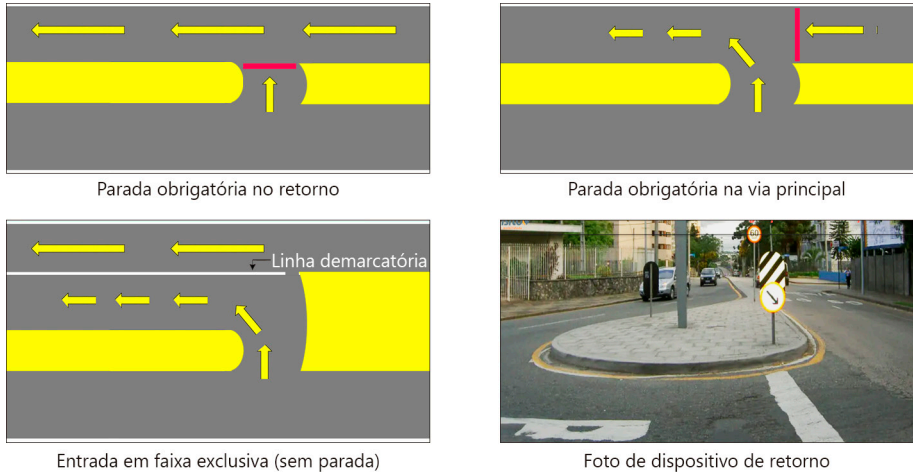


Figura 3.18 Utilização de retorno para eliminar a conversão à esquerda.

Em algumas situações, o dispositivo de retorno também pode ser controlado por semáforo.

A Figura 3.19 apresenta a solução comumente utilizada em vias com três faixas e duplo sentido de circulação, nas quais é permitida a conversão à esquerda. Nesse caso, a faixa central é utilizada alternadamente, ora em um sentido, ora em outro, como faixa exclusiva para conversão à esquerda.

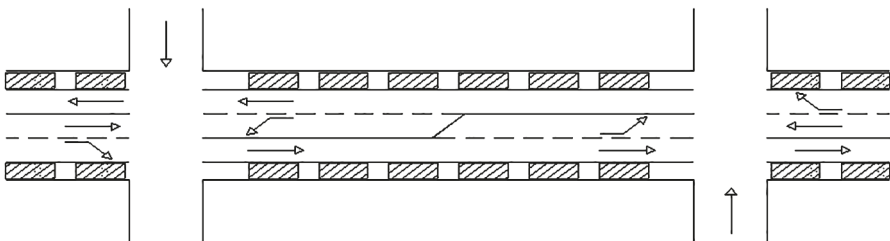


Figura 3.19 Via central para conversão à esquerda com sentido alternado.

Na Figura 3.20 é mostrado o caso de um semáforo em uma interseção em “T”, com um dos possíveis planos semafóricos que podem ser adotados.

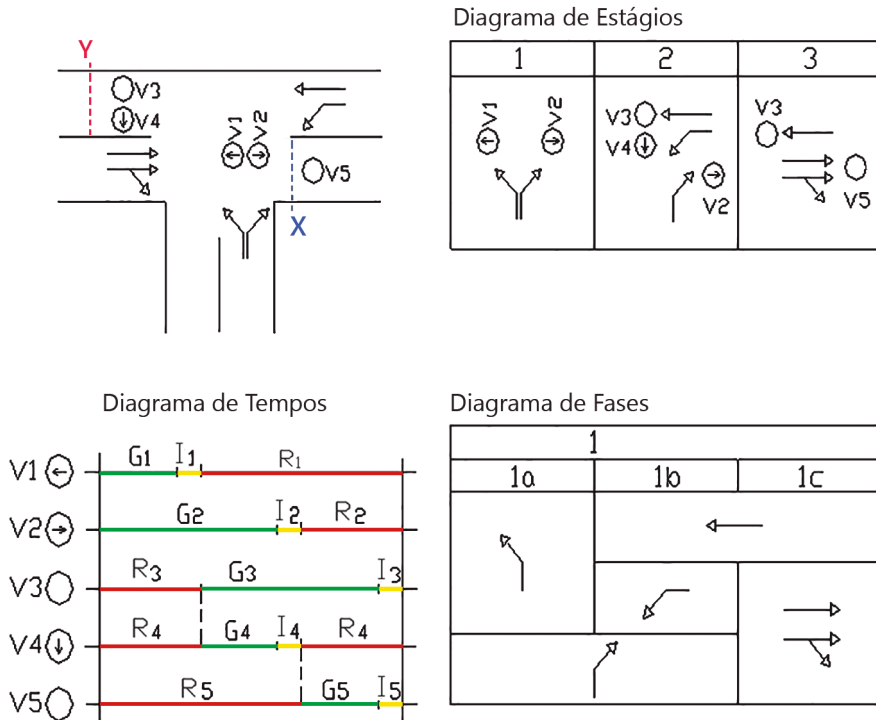


Figura 3.20 Semáforo em uma interseção em “T”.

Na configuração operacional mostrada na Figura 3.20 todos os movimentos possíveis não conflitantes são permitidos em cada estágio/subfase. Isso otimiza o desempenho da operação do ponto de vista dos veículos, mas prejudica a travessia de pedestres.

Por exemplo, não há interrupção do fluxo de veículos para permitir a travessia de pedestres na via horizontal após o cruzamento (linha X); caso não fosse permitida a conversão à direita da via vertical no estágio 2, haveria a interrupção do fluxo de veículos neste estágio para a travessia de pedestres. Esse mesmo problema ocorre na travessia de pedestres na via horizontal sentido direita para esquerda após o cruzamento (linha Y), caso não fosse permitida o movimento em frente no estágio 2 ou no 3 haveria a interrupção do fluxo para a travessia de pedestres. No entanto, se a travessia de pedestres não constitui problema sério, é indicado otimizar o desempenho veicular.

Algumas outras observações: com o movimento vertical à direita sinalizado pelo grupo focal V2 sendo realizado em dois estágios, ele provavelmente vai operar com “folga”; o mesmo se pode dizer com relação ao movimento em frente da direita para a esquerda sinalizado pelo grupo focal V3, pois a passagem é permitida nos estágios 2 e 3.

Em muitos países, o movimento de conversão à direita é permitido mesmo quando a luz está vermelha. Nesses casos, contudo, a preferência é da travessia de pedestres, ou seja, o veículo só pode fazer a conversão se não houver nenhum pedestre para atravessar. No Brasil, isso não é permitido, exceto quando há sinalização específica autorizando a conversão indicada por meio de placa de trânsito.

Uma aplicação relativamente inovadora do uso de semáforos é a instalação desses dispositivos “à distância” para controlar o movimento de veículos em rotatórias. Esse tema foi objeto de pesquisa na Pós-Graduação em Transportes da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo (EESC - USP) e já vem sendo empregada em diversas cidades.

Na Figura 3.21 são mostradas fotos de uma rotatória com quatro aproximações controlada por semáforos instalados à distância na via principal.



Figura 3.21 Fotografias de rotatória com controle de semáforo à distância.

A Figura 3.22 apresenta os dois tipos usuais de operação em rotatórias com três pernas (aproximações), bem como a nova forma de operação proposta com a utilização de semáforos à distância. De acordo com pesquisas realizadas, a linha de retenção dos semáforos deve estar posicionada entre 15 e 25 metros de distância do início do cruzamento.

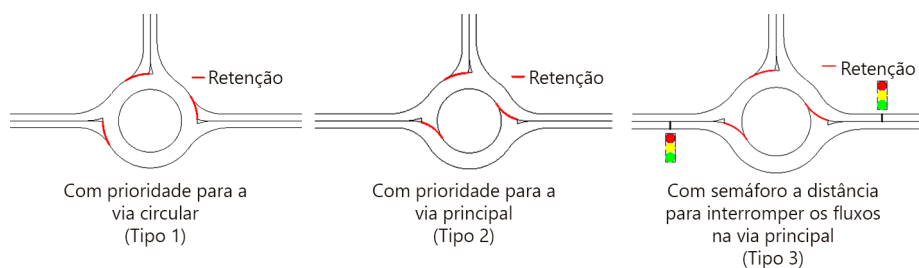


Figura 3.22 Formas de operação em rotatórias com três pernas (aproximações).

Vale destacar a possibilidade dos dois semáforos funcionarem de maneira coordenada, podendo o plano de sincronização ser estabelecido em função dos valores dos fluxos, de forma a otimizar a operação minimizando a demora média dos veículos.

Na Figura 3.23 são indicadas as faixas de operação de cada espécie de rotatória que resultam em menor tempo perdido considerando todos os fluxos, com resultados obtidos mediante simulação, no caso particular em que os primeiros veículos do pelotão que faz a conversão à esquerda cruzam o fluxo oposto sem necessidade de parar.

Como se pode observar, houve nesse caso particular um grande aumento da capacidade de tráfego da rotatória considerando a espera média dos veículos com o emprego de semáforos à distância. Simulações realizadas considerando operação com características distintas do caso particular analisado, também apontam significativos aumentos da capacidade da rotatória. Isso tem sido comprovado empiricamente em várias cidades que implantaram o sistema.

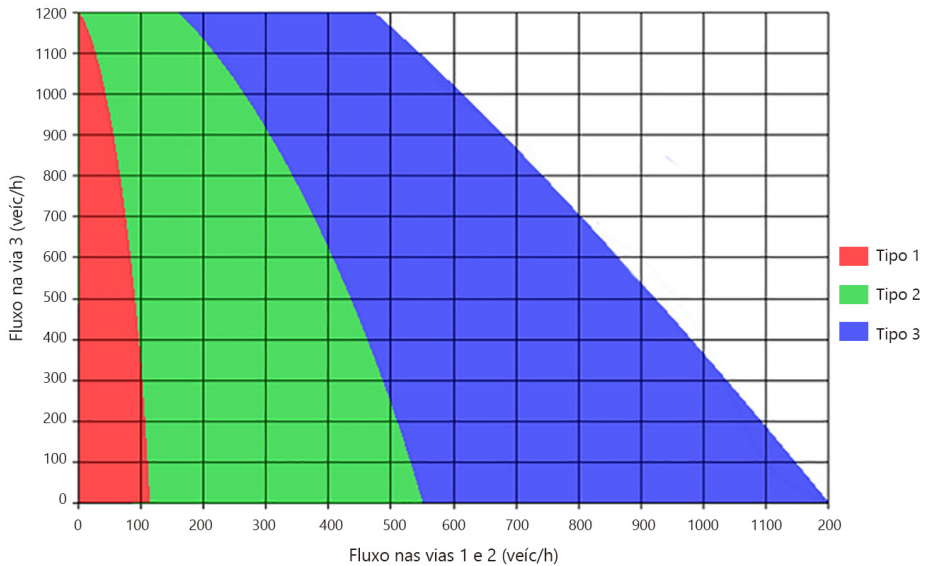


Figura 3.23 Faixa de operação com o menor tempo total perdido na rotatória.

3.5 EXERCÍCIOS

1. Conceituar grupo focal semaforico.
2. Qual a forma e o tamanho dos focos semaforicos para veiculos? E para pedestres?
3. Quais os pictogramas empregados nos semaforos para pedestres? Como eles funcionam?
4. Quando é utilizada lente com seta para o trafego de veiculos?
5. Discorrer sobre o emprego da luz amarela nos semaforos veiculares?
6. Escrever sobre os principais elementos dos focos semaforicos?
7. Quais os tipos de lâmpadas utilizadas nos focos semaforicos no passado e atualmente? Quais as vantagens da luz tipo "led"?
8. Fazer croquis dos principais tipos de estrutura de sustentação dos focos semaforicos.
9. Discorrer sobre a utilização de contadores de tempo nos semaforos e sobre as estruturas modernas de sustentação tipo totem. Quais as vantagens desse novo modelo?
10. Qual a diferença entre os semaforos de pedestres comuns e aqueles acionados por botoeiras (botões)?

11. Conceituar movimentos conflitantes e não conflitantes em cruzamentos e movimentos protegidos e não protegidos em um semáforo. Identificar esses tipos de movimentos no cruzamento de duas vias de sentido único.
12. Conceituar estágio, fase, ciclo, diagrama de estágios, diagrama de fases e diagrama de tempos de um semáforo.
13. O que significa vermelho geral em um semáforo e quando ele é utilizado?
14. Considere o cruzamento de uma via de sentido único com outra de dois sentidos. Definir o plano de operação para o caso em que todos os movimentos veiculares são autorizados e protegidos e não se utiliza focos com lenta seta.
15. Refazer o Exercício 14, considerando conversão à esquerda na via de mão dupla não protegida. Quais as vantagens e desvantagens dessa solução?
16. Refazer o Exercício 14, considerando uma fase exclusiva para o movimento protegido dos pedestres.
17. Refazer o Exercício 14, utilizando lente seta na conversão à esquerda. Quais as vantagens e desvantagens dessa solução em relação ao plano semaforico do Exercício 14.
18. Comentar sobre as estratégias para viabilizar a tomada de direção à esquerda fora de cruzamentos semaforizados.
19. Comentar sobre a utilização de semáforo à distância no controle da operação de rotatórias.

TIPO DE CONTROLE E DESEMPENHO DE SEMÁFOROS ISOLADOS

Capítulo

4

4.1 CONTROLADORES SEMAFÓRICOS

Tipos de controladores

Os comandos responsáveis por acender e apagar as lâmpadas dos focos semafóricos, ou seja, o controle da duração das fases do semáforo, são realizados por um dispositivo denominado de controlador semafórico (ou controladora semafórica).

Basicamente são empregados dois tipos de controladores: controladores de tempo fixo e controladores por demanda de tráfego (também conhecidos como semáforos inteligentes).

Nos controladores de tempo fixo, o tempo de ciclo é constante, e a duração, bem como os instantes de mudança das fases verde e vermelha, são fixos em relação ao ciclo. Assim, controlar uma interseção isolada em tempo fixo significa manter sempre o mesmo tempo de verde e vermelho para cada corrente de tráfego, independentemente da variação do fluxo de veículos que chegam ao cruzamento. A duração dos tempos é calculada com base nas características e nos volumes médios de tráfego do período considerado.

Os controladores por demanda de tráfego utilizados nos semáforos conhecidos como inteligentes, são mais complexos e mais caros do que os de tempo fixo, por serem providos de detectores de veículos e lógica de decisão. Sua finalidade básica é dar o tempo de verde a cada corrente de tráfego de acordo com sua necessidade, ajustando esses tempos às flutuações momentâneas do tráfego.

Os processos de detecção mais comuns são os laços constituídos de cabos metálicos instalados sob o pavimento e câmeras adequadamente posicionadas (vídeo-detecção). No caso dos laços, os cabos formam um circuito fechado no qual circula continuamente uma corrente elétrica de baixa intensidade alimentada por bateria. Essa corrente é modificada quando um veículo passa sobre o laço (a massa metálica do veículo altera o campo magnético e, conseqüentemente, o valor da corrente). A alteração da corrente elétrica (passagem de um veículo) é informada ao controlador (microprocessador), que processa a informação utilizando um algoritmo e realiza a distribuição do tempo de verde – processo denominado de lógica de decisão. No caso de câmeras, a informação da chegada dos veículos é detectada pela alteração do padrão das imagens captadas pelas câmeras (sensibilização ótica). Na Figura 4.1 são mostradas fotos ilustrativas desses dispositivos de detecção.



Recorte do pavimento para cabos de laços indutivos



Câmeras de videomonitoramento

Figura 4.1 Fotos ilustrativas de dispositivos de detecção de veículos.

O controle do tráfego por controladores inteligentes pode ser semiaatuado ou totalmente atuado. O controle semiaatuado é empregado em cruzamentos onde uma das vias apresenta alto volume de tráfego e a outra, baixo volume. Nesse caso, a indicação luminosa permanece verde para a via principal, sendo concedida a luz verde para a via secundária apenas quando um ou mais veículos são detectados em suas faixas de aproximação (ou seja, os detectores estão instalados somente na via secundária). A duração do verde na via principal é limitada a um valor máximo, tendo em conta a necessidade de interromper o tráfego com a luz vermelha para permitir a travessia de pedestres e ciclistas. Para a via secundária, são fixados valores mínimos e máximos para o verde, considerando-se a segurança e a eficiência da operação semafórica.

Esse mesmo princípio aplica-se aos semáforos para pedestres acionados por botoeira.

No controle totalmente atuado, existem detectores em todas as faixas de aproximação, tanto na via principal como na via secundária, o que exige uma lógica de funcionamento mais complexa. Também nesse caso, por razões de segurança e eficiência, são definidos tempos mínimos e máximos para a luz verde em cada aproximação.

O princípio de funcionamento do controlador atuado baseia-se na variação do tempo de verde de cada fase entre um valor mínimo e um valor máximo, ambos programáveis no equipamento. O tempo de verde, compreendido nesse intervalo, será definido pelo controlador em função das solicitações de veículos detectados por sensores instalados sob o pavimento (laços indutivos) ou por câmeras aéreas. O período mínimo de verde deve corresponder ao tempo necessário para a passagem segura de um veículo ou para a travessia de pedestres no cruzamento. A partir dessa duração

mínima, são adicionadas extensões de verde determinadas com base na detecção de veículos nas faixas de tráfego com direito de passagem. O número de extensões é limitado pelo período máximo de verde previamente definido.

Se, em um determinado período, todas as correntes de tráfego atingirem seu nível de saturação (volume máximo capaz de passar pela interseção), as demandas serão tão frequentes que forçarão todos os tempos de verde a se estenderem até seus valores máximos, fazendo com que o controlador opere o tráfego como se fosse um equipamento de tempo fixo.

Os controladores semafóricos antigos eram eletromecânicos: consistiam basicamente em uma engrenagem acionada por um pequeno motor elétrico. A velocidade de giro da engrenagem e a posição de cursores acoplados a ela definiam a duração de cada indicação luminosa do semáforo.

Os controladores de tempo fixo antigos mais simples tinham capacidade para armazenar apenas um plano de tráfego, ou seja, a duração do ciclo e das fases verde e vermelha permanecia constante durante todo o dia. Alguns modelos mais sofisticados permitiam o uso de múltiplas programações semafóricas ao longo do dia.

Já os controladores de tempo fixo modernos são eletrônicos (dotados de chips) e possuem capacidade para armazenar uma grande quantidade de planos de tráfego. Isso permite que a programação semafórica seja modificada ao longo do dia, graças à presença de um relógio interno (*timer*). Assim, por exemplo, é possível operar com o plano 1 no pico da manhã, o plano 2 no meio do dia, o plano 3 no pico da tarde, o plano 4 no período noturno, entre outros. Com a utilização de diferentes planos semafóricos ao longo do dia, estabelecidos com base nos volumes obtidos em contagens prévias, a eficiência operacional se aproxima consideravelmente da obtida com o controle por demanda de veículos (semáforo atuado pelo tráfego).

Independentemente da capacidade de armazenamento, os controladores eletrônicos atuais de tempo fixo são equipamentos relativamente simples, de baixo custo e de fácil operação e manutenção.

Os controladores eletrônicos de tempo fixo mais sofisticados permitem, mediante procedimentos adequados, operar um conjunto de semáforos próximos de maneira coordenada.

Fogem ao escopo desta publicação discutir detalhes sobre a tecnologia de detecção dos veículos e a lógica de decisão na operação de semáforos atuados pelo tráfego (assuntos que são de domínio das empresas que operam no ramo). Contudo, quando da implantação de semáforo atuado em um cruzamento, recomenda-se que o órgão responsável pela operação semafórica no município realize estudos antes e depois da intervenção

para mensurar o benefício efetivo da nova forma de operação, comparando, principalmente, os valores médios do atraso e/ou do tempo efetivamente parado na interseção.

4.2 ESCOLHA DO PLANO SEMAFÓRICO

A escolha do plano de operação dos semáforos (configuração dos estágios, fases e grupos focais) deve seguir as orientações gerais apresentadas abaixo.

Quanto mais simples for o sistema, mais fácil será seu entendimento por parte dos usuários e maior será a segurança. As lentes seta devem ser utilizadas apenas nos casos em que forem realmente necessárias.

O número de fases/estágios deve ser o menor possível, a fim de minimizar o tempo perdido em cada ciclo. Isso porque, a cada mudança da indicação luminosa para um determinado fluxo, ocorre uma perda de tempo: no início do verde, até a fila começar a se mover; e no fim do entreverdes, devido à necessidade de um intervalo de segurança entre a passagem do último veículo de uma direção e o primeiro da outra.

O número de movimentos não conflitantes em cada estágio deve ser, do ponto de vista da eficiência e da capacidade, o maior possível. Acrescentar movimentos em estágio/fase pode, contudo, dificultar a travessia de pedestres.

A definição dos fluxos que se movimentam em cada estágio deve considerar os volumes de veículos e pedestres de cada movimento. Os movimentos não conflitantes com maior fluxo devem, sempre que possível, ser alocados no mesmo estágio a fim de se aproveitar melhor o espaço e o tempo disponíveis no cruzamento.

4.3 CONCEITOS BÁSICOS NA OPERAÇÃO

Fluxo de saturação

O máximo fluxo de veículos em uma faixa de tráfego que pode passar por um cruzamento semaforizado quando a luz está verde é denominado fluxo de saturação.

Quando o movimento na faixa não sofre interrupções momentâneas devido a fatores externos, o fluxo de saturação depende dos seguintes fatores: largura da faixa de tráfego, inclinação longitudinal da via, porcentagem de veículos pesados (ônibus e caminhões), porcentagem de motocicletas/assemelhados e porcentagem de veículos que realizam conversões à direita e/ou à esquerda.

A largura das faixas de tráfego em cruzamentos semaforizados (onde a velocidade é geralmente baixa) varia, usualmente, entre 2,4 metros (neste caso, cabem apenas automóveis e os veículos comerciais utilizam duas faixas) e 4,8 metros. Com 4,8 metros, já é possível utilizar duas faixas de 2,4 metros. Quanto menor a largura da faixa em relação ao padrão de 3,6 metros, menor o fluxo de saturação; quanto maior a largura, maior o fluxo de saturação.

Os veículos comerciais (caminhões e ônibus) reduzem o fluxo de saturação por ter maior tamanho e desempenho operacional inferior (sobretudo menor aceleração e desaceleração) – equivalem, em média, a cerca de 2,0 carros. Ao contrário, as motocicletas e assemelhados que são muito menores e mais ágeis equivalem, grosso modo, pois dependem da situação do cruzamento, a 0,33 carros.

Como as velocidades nas conversões são menores, isso também reduz o fluxo de saturação – sendo que o valor equivalente a carros passando direto depende do raio de curvatura e do tipo de faixa utilizada (exclusiva, compartilhada, etc.).

Quanto à inclinação da pista na interseção: maior o aclive, menor o fluxo de saturação; maior o declive, maior o fluxo de saturação.

Alguns fatores, no entanto, podem bloquear momentaneamente o movimento na faixa analisada e, assim, reduzir seu fluxo de saturação. Entre eles destacam-se: manobras de estacionamento ou saída junto ao meio-fio; entrada e saída de ônibus em pontos de parada; presença de bicicletas na corrente de tráfego; entrada e saída de veículos da faixa para acessar locais ao lado da via; e paradas para embarque e desembarque de passageiros, entre outros. O impacto negativo dessas manobras depende da distância em relação ao cruzamento (se superiores a 75 metros, a influência tende a ser desprezível) e da frequência com que ocorrem.

O indicado é medir o fluxo de saturação das faixas de tráfego no campo, que, inclusive, pode variar de um período do dia para outro em razão de mudanças nas características do tráfego. Um procedimento simples para medir o fluxo de saturação é descrito a seguir.

Em condições de fluxo contínuo, mede-se o intervalo de tempo entre a passagem do 4º veículo após a abertura do verde (a partir desse ponto, a fila já pode ser considerada estabilizada, com o intervalo entre passagens praticamente constante) e do Nº veículo pela faixa de retenção (T em segundos). Dividindo-se esse valor por $(N - 4)$, obtém-se o valor do intervalo de tempo (*headway*) médio entre as passagens dos veículos em condições de fluxo contínuo (h em segundos). A expressão que fornece o fluxo de saturação é:

$$S = 3600 / h, \text{ sendo } h = T / (N - 4)$$

Onde, S: fluxo de saturação em veíc./h, h: headway médio em segundos, T: intervalo de tempo entre a passagem do 4º e do Nº veículo pela faixa de retenção.

Recomenda-se fazer várias medições para se obter uma média confiável.

EXEMPLO 4.1

Considere os seguintes valores do intervalo entre a passagem do 4º veículo (após a abertura do verde) e do 9º veículo em uma faixa de um cruzamento semaforizado: 10,54 s, 9,67 s, 11,06 s, 10,78 s, 12,08 s e 13,02 s. Os valores dos *headways* médios são: $10,54 / (9 - 4) = 2,11$ s, 1,93 s, 2,21 s, 2,16 s, 2,42 s e 2,60 s. A média aritmética desses valores (soma dividido pelo número de medições) resulta = $13,43 / 6 = 2,24$.

Portanto, o fluxo de saturação será: $S = 3600 / 2,24 = 1.607$ veíc./h.

Em condições “básicas” – faixa com largura normal (3,6 m), perfil plano, fluxo composto apenas por automóveis, ausência de conversões e de manobras de estacionamento ou acesso –, o fluxo de saturação situa-se em torno de 1.900 veículos por hora, o que corresponde a um intervalo de passagem entre veículos consecutivos (*headway*) de 1,89 segundo.

Em condições típicas do tráfego urbano, o fluxo de saturação varia entre 1.400 e 1.800 veículos por hora. Na ausência de dados obtidos em campo, pode-se adotar um fluxo de saturação igual a 1.600 veículos por hora.

Eventualmente, pode ser necessário estimar o fluxo de saturação a partir das características da interseção. Nesse caso, a seguinte expressão pode ser utilizada:

$$S = 1900 \cdot fw \cdot fg \cdot fhv \cdot fmo \cdot frt \cdot flt$$

Onde:

- S: fluxo de saturação real da faixa (veíc/h);
- fw: fator de ajuste para a largura da faixa dado pela expressão: $fw = 1 + (w - 3,6) / 9$, onde w é a largura da faixa em metros ($2,4m \leq w \leq 4,8m$);
- fg: fator de ajuste para a inclinação da rampa dado pela expressão: $fg = 1 - (g/200)$, onde g é a inclinação em porcentagem ($- 6\% \leq g \leq 10\%$);

- fhv: fator de ajuste para veículos pesados dado pela expressão: $fhv = 1 / (1 + Phv)$, onde Phv é a fração de veículos pesados (caminhões, ônibus, etc.);
- fmo: fator de ajuste para motocicleta e assemelhados dado pela expressão: $fmo = 1 / (1 - Pmo \cdot 0,67)$, onde Pmo é a fração de motocicletas/assemelhados.
- frt: fator de ajuste para as manobras de conversão à direita (frt = 0,85, no caso de faixa exclusiva, frt = $1,00 - 0,15 \cdot Prt$, no caso de faixa compartilhada com os veículos que seguem direto e frt = $1,00 - 0,135 \cdot Prt$, no caso de faixa única compartilhada, onde Prt é a fração de veículos que fazem conversão à direita; em todos os casos, frt $\geq 0,05$).
- flt: fator de ajuste para as manobras de conversão à esquerda em fase protegida (flt = 0,95 no caso de faixa exclusiva e flt = $1 / (1 + 0,05 \cdot Plt)$ no caso de faixa compartilhada com os veículos que seguem direto, onde Plt é a fração de veículos que fazem conversão à esquerda).

Essa expressão fornece valores aproximados e vale somente quando o movimento na faixa não sofre interferências externas, como manobras para estacionar ou sair, paradas de ônibus, presença de bicicletas, entrada e saída de garagens, etc.

EXEMPLO 4.2

Considere os seguintes valores relativos à faixa da direita compartilhada (movimento em frente e de conversão à direita) em um cruzamento semaforizado: largura da faixa = 2,7m, aclive de 8%, porcentagem de veículos pesados (caminhões e ônibus) = 10%, porcentagem de motocicletas = 20%, porcentagem de veículos que fazem conversão à direita = 20% (duas faixas, faixa da direita compartilhada com o fluxo em frente).

Nesse caso, resultam os seguintes valores:

- $fw = 1 + (w - 3,6) / 9 = 1 + (2,7 - 3,6) / 9 = 0,90$.
- $fg = 1 - (g/200) = 1 - (+8 / 200) = 0,96$.
- $fhv = 1 / (1 + Phv) = 1 / (1 + 0,10) = 0,91$
- $fmo = (1 / (1 - Pmo \cdot 0,67)) = 1 / ((1 - 0,20 \cdot 0,67)) = 1,15$
- $frt = 1,00 - 0,15 \cdot Prt = 1,00 - 0,15 \cdot 0,2 = 0,97$.
- $S = 1900 \cdot fw \cdot fg \cdot fhv \cdot frt \cdot flt = 1900 \cdot 0,90 \cdot 0,96 \cdot 0,91 \cdot 1,15 \cdot 0,97 = 1.666 \text{ veíc/h}$.

Tempo perdido e verde efetivo

A partida das filas de veículos nos semáforos não é instantânea quando a luz fica verde. Existe um tempo perdido para a fila começar a se mover, denominado P_c , devido ao tempo de percepção e reação dos condutores e ao tempo necessário para a aceleração dos veículos. Esse tempo depende do comportamento dos motoristas (em parte influenciado pelo porte da cidade), do tipo de veículo, da inclinação da via, entre outros fatores. Valores típicos observados em campo situam-se entre 1 e 3 segundos.

O tempo amarelo nos semáforos deve ser utilizado pelos veículos que estão muito próximos do cruzamento no momento da mudança do verde para o amarelo e, por isso, não têm condições seguras de parar antes da linha de retenção (daí a razão de se dizer que “o amarelo é do verde”). Os veículos que estão relativamente distantes do cruzamento e têm condições de parar sem ultrapassar a faixa de retenção devem fazê-lo.

Em vista disso, uma parcela do tempo no final do entreverdes (ou seja, o tempo composto pelo amarelo mais o vermelho geral) não é utilizada, sendo considerada tempo perdido por razões de segurança (denominado P_f). Isso se deve à necessidade de manter um intervalo entre a passagem do último veículo de uma fase e o início da movimentação do primeiro veículo da fase seguinte. Valores típicos de P_f observados em campo variam de 1 a 3 segundos.

Assim, o tempo total perdido em cada fase i é dado por: $P_i = P_{c_i} + P_{f_i}$. Valores típicos de P_i observados em campo variam entre 2 e 6 segundos. Na ausência de dados locais, recomenda-se adotar nas aplicações práticas: $P_i = 4$ s.

Em virtude do tempo perdido no início do verde e no fim do entreverdes (amarelo mais vermelho total), o tempo realmente disponível para a travessia de veículos na fase i , chamado de verde efetivo, é dado pela expressão:

$$G_{e_i} = G_i + E_i - P_i$$

Onde, G_{e_i} : verde efetivo, G_i : verde real, E_i : entreverdes (amarelo mais vermelho geral) e P_i : tempo perdido na fase i .

Como os valores de E_i e P_i resultam, em geral, próximos, é comum na prática adotar $G_{e_i} = G_i$.

O verde efetivo total do ciclo é dado por:

$$G_e = \sum G_{e_i} = \sum (G_i + E_i - P_i) = \sum (G_i + E_i) - \sum P_i = T - P$$

Onde, G_e : verde efetivo total do ciclo, G_{ei} : verde efetivo na fase i , E_i : entreverdes na fase i , P_i : tempo perdido na fase i , T : tempo de ciclo e P : tempo total perdido no ciclo.

A Figura 4.2 ilustra o conceito de tempo perdido e verde efetivo.

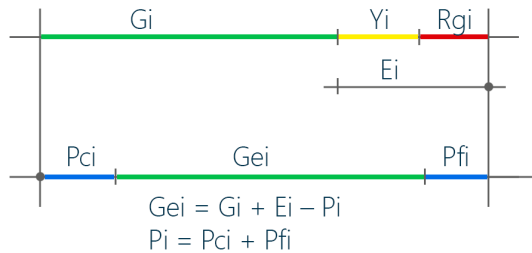


Figura 4.2 Verde efetivo e tempo perdido.

Dessa forma, o verde efetivo total no ciclo é igual ao tempo de ciclo menos o tempo total perdido no ciclo (soma dos tempos perdidos nas mudanças de fase).

Para o caso simples de um semáforo de duas fases (Figura 4.3), o verde efetivo total do ciclo é igual a:

$$G_e = G_{e_1} + G_{e_2} = (G_1 + E_1 - P_1) + (G_2 + E_2 - P_2) = (G_1 + E_1 + G_2 + E_2) - (P_1 + P_2) = T - P$$

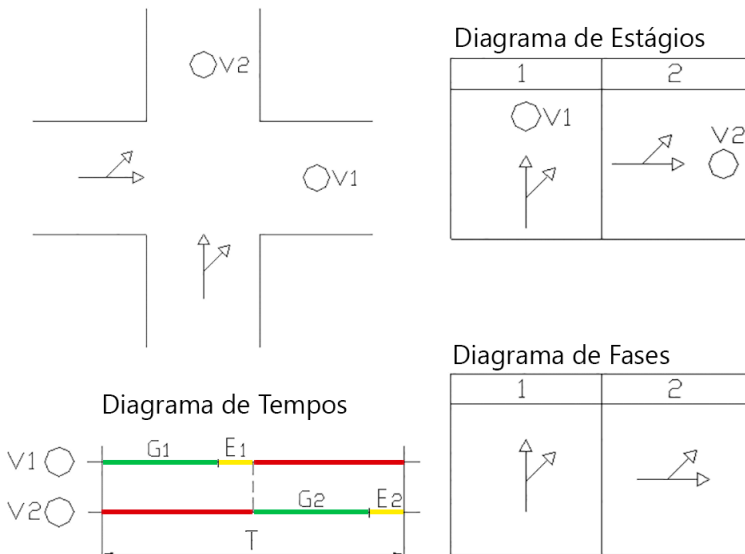


Figura 4.3 Diagrama de estágios/fases de um semáforo comum no cruzamento de duas vias de sentido único.

Capacidade, taxa de ocupação e grau de saturação (índice de congestionamento)

A capacidade de tráfego de cada faixa j que se movimenta na fase i é calculada pela expressão:

$$C_j = S_j \cdot Ge_i / T$$

Onde, C_j : capacidade de tráfego, S_j : fluxo de saturação, Ge_i : verde efetivo e T : tempo de ciclo.

A taxa de ocupação da faixa j é dada pela expressão:

$$O_j = V_j / S_j$$

Onde, O_j : taxa de ocupação, V_j : volume de tráfego e S_j : fluxo de saturação.

O índice de congestionamento ou grau de saturação da faixa j é dado pela expressão:

$$I_j = V_j / C_j$$

Onde, I_j : índice de congestionamento, V_j : volume de tráfego e C_j : capacidade de tráfego.

Se $I_j > 1$, a faixa está congestionada e as esperas dos veículos são elevadas. Na prática, a partir de $I_j = 0,85$, as esperas já começam a se tornar significativas devido à flutuação do volume de tráfego.

O maior índice de congestionamento (grau de saturação) considerado de todas as faixas j que se movimentam na fase i corresponde ao grau de saturação crítico da fase i , ou seja:

$$IC_i = \text{maior dos } I_j$$

Onde, IC_i : grau de saturação crítico da fase i e I_j : índice de congestionamento da faixa j que se movimenta durante a fase i do semáforo.

O índice de congestionamento (grau de saturação) global da interseção (cruzamento) é obtido pela média ponderada dos índices de congestionamento críticos das diversas fases considerando como pesos os fluxos de tráfego correspondentes, ou seja:

$$IG = \sum V_i \cdot IC_i / \sum V_i$$

Onde, IG : índice de congestionamento global da interseção (cruzamento), V_i : volume de tráfego na faixa crítica da fase i e IC_i : índice de congestionamento na faixa crítica da fase i .

O valor de IG indica o quanto a capacidade da interseção está sendo utilizada no tocante às faixas críticas.

A capacidade global da interseção (cruzamento) semaforizada é igual à soma das capacidades individuais das faixas críticas, sendo dada pela expressão:

$$CG = \sum C_i$$

Onde, CG: capacidade de tráfego global da interseção e C_i : capacidade de tráfego da faixa crítica na fase i .

Se o valor do fluxo de saturação (S_j) for o mesmo para todas as faixas críticas, obtém-se a seguinte expressão:

$$CG = \sum C_i = \sum S_j \cdot G_{e_i} / T = S \cdot \sum G_{e_i} / T = S \cdot G_e / T = S(T - P) / T = S \cdot (1 - P/T)$$

Onde, CG: capacidade de tráfego global da interseção, S: fluxo de saturação, T: tempo de ciclo e P: tempo perdido no ciclo.

Dessa forma, quanto maior o tempo de ciclo, maior a capacidade global da interseção (cruzamento). Considerando, por exemplo, um ciclo máximo de 120 s, um tempo perdido em cada fase de 4 s e um fluxo de saturação de 1.500 v/h, obtém-se os seguintes valores para a capacidade máxima do cruzamento:

- Para 2 fases: $CG \text{ máx} = 1500 \cdot (120 - 2 \cdot 4) / 120 = 1.400 \text{ v/h}$
- Para 3 fases: $CG \text{ máx} = 1500 \cdot (120 - 3 \cdot 4) / 120 = 1.350 \text{ v/h}$
- Para 4 fases: $CG \text{ máx} = 1500 \cdot (120 - 4 \cdot 4) / 120 = 1.300 \text{ v/h}$

EXEMPLO 4.3

Considere o caso de um semáforo de duas fases/estágios com ciclo de 70 s no cruzamento das ruas Palmeiras (P) e Flamengo (F), ambas com sentido único. A rua Palmeiras tem uma única faixa de tráfego com as seguintes características: fluxo de saturação = 1.400 v/h e fluxo real = 400 v/h. A rua Flamengo tem duas faixas de tráfego com as seguintes características: fluxos de saturação: faixa 1 = 1.500 v/h, faixa 2 = 1.300 v/h; fluxos reais: faixa 1 = 650 v/h, faixa 2 = 500 v/h. O verde efetivo é distribuído igualmente para cada rua (metade para cada uma).

Os valores dos principais parâmetros resultam:

- $G_e = T - P = 70 - 2 \cdot 4 = 62 \text{ s}$ (foram adotados 4 segundos perdidos por fase).
- $G_{eP} = G_{eF} = 0,50 \cdot 62 = 31 \text{ s}$.
- $O_j = V_j/S_j$, portanto: $OP = 400 / 1400 = 0,29$, $OF1 = 650 / 1500 = 0,43$, $OF2 = 500 / 1300 = 0,38$.

- $C_j = S_j \cdot G_{ei} / T$, portanto: $CP = 1400 \cdot 31 / 70 = 620$ v/h, $CF1 = 1500 \cdot 31 / 70 = 664$ v/h, $CF2 = 1300 \cdot 31 / 70 = 576$ v/h.
- $I_j = V_j / C_j$, portanto: $IP = 400 / 620 = 0,65$, $IF1 = 650 / 664 = 0,98$, $IF2 = 500 / 576 = 0,87$.
- $IC_i = \text{maior dos } I_j$, portanto: $ICP = 0,65$, $ICF = 0,98$, o que significa que a faixa crítica da rua Flamengo (faixa 1) opera com condição muito pior (bem mais congestionada) que a faixa crítica da rua Palmeiras (só tem uma faixa) – claramente, a distribuição do verde está ruim; o procedimento para fazer a distribuição correta será visto posteriormente).
- $IG = \sum V_i \cdot I_{ci} / \sum V_i = (400 \cdot 0,65 + 650 \cdot 0,98) / (400 + 650) = 0,85$.
- $CG = \sum C_j$, portanto: $CG = 620 + 664 = 1.284$ v/h (válido para a distribuição de verde efetivo admitida – metade para cada rua).

4.4 DURAÇÃO DO AMARELO E DO ENTREVERDES

Duração do amarelo

A duração do amarelo deve ser suficiente para que os veículos que estejam muito próximos do cruzamento, sem condições de parar com segurança e conforto antes da faixa (linha) de retenção, possam prosseguir e cruzar essa linha ainda no amarelo, evitando assim entrar na interseção com o sinal vermelho.

Para efeito de análise da operação de paradas de veículos em semáforos, define-se distância de frenagem como a distância percorrida por um veículo desde o momento em que a luz amarela aparece até a sua parada total. De acordo com as leis da Física, essa distância é dada pela expressão:

$$Df = V \cdot T_{pr} + \frac{V^2}{2 \cdot a}$$

Onde, Df : distância de frenagem em m, T_{pr} : tempo de percepção e reação em s (normalmente adotado igual a 1 s), V : velocidade de aproximação em m/s e a : desaceleração em m/s^2 (normalmente adotada igual a $3 m/s^2$).

Considerando um veículo que se encontra a uma distância Df no momento em que a luz amarela acende (situação crítica, pois se trata do

último veículo a passar), a duração do amarelo deve ser igual ao tempo necessário para o veículo percorrer essa distância, ou seja:

$$Y = \frac{Df}{V} \quad \text{ou} \quad Y = T_{pr} + \frac{V}{2.a}$$

Onde, Y: duração do amarelo em segundos e Df, T_{pr}, V e a já definidos.

Na prática, por razões de segurança e à luz da expectativa dos usuários baseada no costume, são recomendados os seguintes valores para o tempo de amarelo: 3 s para velocidades abaixo de 40 km/h, 4 s para velocidades de 50 e 60 km/h, e 5 s para velocidades superiores a 70 km/h.

Duração do entreverdes

Após passar pela linha de retenção no final do amarelo, o último veículo deve sair da área da interseção antes de o sinal ficar verde para os fluxos conflitantes de veículos e pedestres. Isso significa que, nos casos mais comuns, a distância representada por S + F + L + F + C (Figura 4.4) deve ser percorrida durante o período de vermelho total.

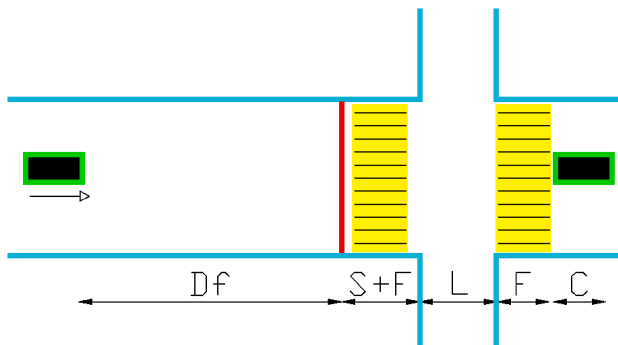


Figura 4.4 Esquema para determinação da duração do amarelo e do vermelho total.

Admitindo-se que o veículo percorra essa distância com velocidade constante, a duração do vermelho geral deve ser igual a:

$$Rg = \frac{S + 2F + L + C}{V}$$

Onde, Rg : vermelho geral (s), S : distância da linha de retenção até a faixa de pedestres (m) – normalmente igual a 1,6 m, F : largura da faixa de pedestres (m) – normalmente igual a 4 m, L : largura da via a ser cruzada (m), C : comprimento do veículo (m) – normalmente adotado igual a 6 m.

Essa expressão, contudo, não leva em conta que tanto veículos quanto pedestres não partem imediatamente após a luz ficar verde. Na prática, eles iniciam o movimento apenas após o tempo de percepção e reação. Assim, dentro de um padrão adequado de segurança, pode-se calcular a duração do vermelho geral pela expressão:

$$Rg = \frac{S + 2F + L + C}{V} - T_{pr}$$

Dessa forma, a duração do entreverdes deve ser igual a:

$$E = Y + Rg = \frac{V}{2.a} + \frac{S + 2F + L + C}{V}$$

Os valores obtidos para a duração do amarelo e do vermelho total devem ser arredondados para o número inteiro mais próximo. Na grande maioria dos cruzamentos urbanos, o amarelo varia entre 3 e 5 segundos e o vermelho total, entre 1 e 3 segundos.

EXEMPLO 4.4

Considere o fluxo de tráfego em uma avenida com limite legal de velocidade igual a 50 km/h atravessando uma rua com largura de 12,0 metros. Os valores do tempo amarelo e do entreverdes resultam conforme indicado a seguir (os demais valores necessários para o cálculo foram adotados com base nas informações constantes do texto):

- $Y = T_{pr} + V / 2.a = 1 + 50/3,6 / 2.3 = 3,31s$ (3 s).
- $Rg = (S + 2F + L + C) / V - T_{pr} = (1,6 + 2 \times 4,0 + 12,0 + 6,0) / 50/3,6 - 1,0 = 0,99$ s (1 s).
- $E = Y + Rg = 3 + 1 = 4$ s.

4.5 TEMPO DE CICLO E DE VERDE EM SEMÁFOROS ISOLADOS

Um semáforo é considerado isolado quando o processo de chegada dos veículos é aleatório, ou seja, não sofre influência de outros semáforos

situados a montante nem de outros fatores que possam interferir na aleatoriedade do fluxo. Do ponto de vista prático, pode-se considerar um semáforo como isolado quando não existe outro a montante em uma distância de aproximadamente 500 metros.

Ciclo ótimo

Um dos primeiros e mais importantes estudos sobre semáforos isolados foi realizado por Webster (1958). Um dos assuntos pesquisados foi a duração do ciclo do semáforo que minimizava o atraso médio experimentado pelos veículos (ou seja, o tempo parado na fila mais os tempos de desaceleração e aceleração), considerando a chegada aleatória dos veículos à interseção. Esse estudo resultou em uma expressão para determinar a duração do ciclo ótimo em função do volume de tráfego, das taxas de ocupação e do tempo total perdido no ciclo (no início da movimentação no verde e no final do entreverdes).

Mais importante do que conhecer a expressão de cálculo do ciclo ótimo é compreender como o atraso médio é afetado pela variação da duração do ciclo. A Figura 4.5 mostra a variação do atraso médio em função dessa duração. Nota-se que o atraso é elevado para ciclos muito curtos, diminui até atingir o ciclo ótimo e volta a crescer lentamente quando o ciclo ultrapassa esse valor. Além disso, o atraso varia pouco quando a duração do ciclo se mantém próxima do ótimo. O próprio Webster (1958) observou que, no intervalo entre $0,75 C_o$ e $1,50 C_o$, o atraso cresce, no máximo, de 10% a 20% em relação ao valor mínimo ($A \leq 1,10$ a $1,20$ de $A_{mín}$).

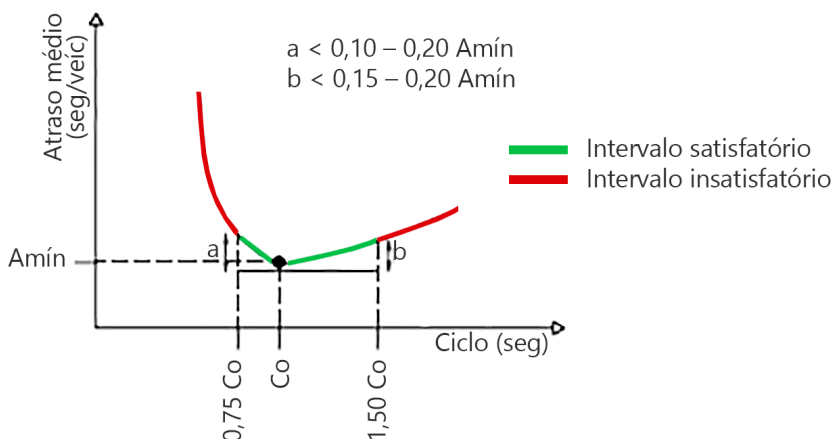


Figura 4.5 Variação do atraso em função da duração do ciclo.

Considere, por exemplo, um ciclo ótimo igual a 80 segundos (valor típico observado nas interseções semaforizadas mais movimentadas), em que o atraso mínimo é de 40 segundos. O intervalo $(0,75 \cdot C_0 - 1,50 \cdot C_0)$ é igual a $(60s - 120s)$ e, nesse intervalo, o acréscimo máximo do atraso em relação ao mínimo varia entre 4 s (10% de 40 s) e 8 s (20% de 40 s), valores que podem ser considerados bastante pequenos.

Como o atraso cresce muito pouco em uma ampla faixa de variação da duração do ciclo em torno do ciclo ótimo e considerando que os volumes de tráfego não são constantes e apresentam flutuações, pode-se utilizar na prática valores da duração do ciclo dentro de intervalos de variação estabelecidos com base em estudos teóricos ou simulações.

Seguem outras observações sobre a questão do ciclo ótimo:

- O que mais afeta a qualidade da operação (nível de serviço), na opinião dos usuários, não é exatamente o atraso, mas sim o tempo médio parado na fila. A duração do ciclo ótimo para minimizar o tempo parado resulta um pouco menor que a relativa ao atraso.
- Para minimizar o número de paradas, o consumo de combustível e a emissão de poluentes, a duração do ciclo ótimo é maior que a relativa ao atraso.

Em vista do exposto, as faixas de variação da duração do ciclo indicadas a seguir se mostram adequadas para fins de aplicação prática.

Se a programação for única para todo o dia, sugere-se utilizar os seguintes valores para a duração do ciclo (acrescentar 20 segundos se houver fase exclusiva para a travessia de pedestres):

- Semáforo de 2 fases = 50 – 70 s
- Semáforo de 3 fases = 70 – 90 s
- Semáforo de 4 fases = 90 – 110 s

Se for empregada programação distinta conforme o período do dia, recomenda-se utilizar os seguintes valores para o tempo de ciclo (acrescentar 20 segundos se houver fase exclusiva para a travessia de pedestres):

- Períodos de fluxo alto: semáforo de 2 fases = 60 – 80 s, semáforo de 3 fases = 80 – 100 s, semáforo de 4 fases = 100 – 120 s.
- Períodos de fluxo médio: semáforo de 2 fases = 50 – 70 s, semáforo de 3 fases = 70 – 90 s, semáforo de 4 fases = 90 – 110 s.
- Períodos de fluxo baixo: semáforo de 2 fases = 40 – 60 s, semáforo de 3 fases = 60 – 80 s, semáforo de 4 fases = 80 – 100 s.

Em cruzamentos “críticos” de grandes cidades, muitas vezes são utilizados tempos de ciclo superiores a 120 segundos nos horários de maior movimento.

O emprego de fase exclusiva para pedestres aumenta o atraso, ou o tempo efetivamente parado, entre 20% e 40% (média de 30%).

Repartição do verde

A divisão (repartição) do verde efetivo entre as diversas fases do semáforo deve ser proporcional às taxas de ocupação crítica de cada fase para que o atraso médio global dos veículos nas faixas críticas do cruzamento seja mínimo. A expressão para o cálculo dos verdes efetivos é:

$$Ge_i = \frac{O_i}{\sum O_i} . Ge$$

Onde, Ge_i : verde efetivo da fase i , O_i : taxa de ocupação da faixa crítica na fase i e Ge : verde efetivo total do ciclo.

Com a distribuição dos tempos de verde proporcional às taxas de ocupação crítica, os índices de congestionamentos nas faixas críticas resultam iguais, ou seja:

$$I_1 = I_2 = I_3 = \dots$$

A duração dos verdes reais das diversas fases é determinada pela expressão:

$$G_j = Ge_j - E_j + P_j$$

Onde, G_i : duração real do verde, Ge_i : verde efetivo, E_i : período entre-verdes e P_i : tempo total perdido na fase.

É indicado que G_j seja maior ou igual a 12s, ou seja: $G_j \geq 12s$.

Como, na prática, os fluxos de veículos variam ao longo do tempo, o ideal é utilizar controladores de semáforos atuados pelo tráfego, os quais permitem variar a duração do ciclo e dos tempos de verde em função das flutuações momentâneas dos fluxos, detectadas por dispositivos especiais (laços ou câmeras). Contudo, devido ao alto custo dos controladores atuados e dos detectores, a utilização de controladores programáveis, que permitem variar o ciclo e a repartição de verde ao longo do dia de acordo com programação prévia, apresenta desempenho plenamente satisfatório e custo muito menor.

EXEMPLO 4.5

Considere o caso de um semáforo de duas fases/estágios no cruzamento das ruas Palmeiras (P) e Flamengo (F), ambas com sentido único. A Rua Palmeiras tem uma única faixa de tráfego com as seguintes características: fluxo de saturação = 1.400 v/h e fluxo real = 400 v/h. A Rua Flamengo tem duas faixas de tráfego com as seguintes características: fluxos de saturação: faixa 1 = 1.500 v/h, faixa 2 = 1.300 v/h; fluxos reais: faixa 1 = 650 v/h, faixa 2 = 500 v/h. A programação operacional será única durante as 24 horas do dia.

Cálculo dos principais parâmetros:

- $T = 60$ s (valor médio entre 50 s e 70 s para semáforo de duas fases).
- $G_e = T - P = 60 - 2 \cdot 4 = 52$ s (adotando 4 s perdidos por fase).
- $O_j = V_j/S_j$, portanto: $O_P = 400 / 1400 = 0,29$, $O_{F1} = 650 / 1500 = 0,43$, $O_{F2} = 500 / 1300 = 0,38$. Portanto, taxas de ocupação críticas: $O_{CP} = 0,29$ e $O_{CF} = 0,43$.
- $G_{ei} = O_{Ci} / \sum O_{Ci} \cdot G_e$, portanto: $G_{eP} = (0,29 / (0,29 + 0,43)) \cdot 52 = 21$ s e $G_{eF} = (0,43 / (0,29 + 0,43)) \cdot 52 = 31$ s
- $C_j = S_j \cdot G_{ei} / T$, portanto: $C_P = 1400 \cdot 21 / 60 = 490$ v/h, $C_{F1} = 1500 \cdot 31 / 60 = 775$ v/h, $C_{F2} = 1300 \cdot 31 / 60 = 672$ v/h.
- $I_j = V_j / C_j$, portanto: $I_P = 400 / 490 = 0,82$, $I_{F1} = 650 / 775 = 0,84$, $I_{F2} = 500 / 672 = 0,74$.
- $I_{Ci} = \text{maior dos } I_j$, portanto: $I_{CP} = 0,82$, $I_{CF} = 0,84$ (a menos de aproximações numéricas, os valores dos índices de congestionamento / graus de saturação resultam iguais nas faixas críticas, o que caracteriza uma distribuição adequada do verde efetivo e que leva a valores não muito diferentes do atraso e do tempo parado nessas faixas).
- $I_G = \sum V_i \cdot I_{Ci} / \sum V_i = (400 \cdot 0,82 + 650 \cdot 0,84) / (400 + 650) = 0,83$ (a menos de aproximações numéricas, valor similar ao das faixas críticas).
- $C_G = \sum C_j$, portanto: $C_G = 490 + 775 = 1.265$ v/h.

No caso de haver uma fase exclusiva destinada à travessia de pedestres, sua duração deve ser determinada com base no procedimento descrito a seguir.

Para a duração da fase verde para pedestres (vermelha para veículos) deve ser empregada a expressão:

$$Fp = G + R^* + Rg$$

Onde, G : tempo de verde para os pedestres (entre 4 e 8 s, dependendo da quantidade de pedestres – 4 s para poucos pedestres e 8 s para grandes concentrações), R^* : tempo de vermelho piscante (tempo suficiente para que os pedestres que iniciaram a travessia no instante final do verde possam completá-la com segurança), Rg : tempo de vermelho geral antes de a luz ficar verde para as filas de veículos que cruzam as faixas de travessia de pedestres (comumente utilizado 2 s).

O tempo de vermelho piscante deve ser calculado pela equação:

$$R^* = L / Vp$$

Onde, L : largura da via a ser cruzada (m) e Vp : velocidade dos pedestres em m/s (normalmente adotada igual a 1,25 m/s).

EXEMPLO 4.6

Cálculo da duração da fase verde para os pedestres (vermelha para os veículos) na travessia de uma rua com largura de 10 metros, considerando duas condições: movimento pequeno e movimento grande de pedestres.

Seguem os cálculos (os dados foram adotados com base nas informações do texto):

- $G = 4$ s para movimento pequeno e $G = 8$ s para movimento grande; $Rg = 2$ s.
- $R^* = L / Vp = 10,00 / 1,25 = 8$ s.
- $Fp = G + R^* + Rg = 4 + 8 + 2 = 14$ s para movimento pequeno e $Fp = G + R^* + Rt = 8 + 8 + 2 = 18$ s para movimento grande.

4.6 TEMPOS DE CICLO E DE VERDE EM SEMÁFOROS COM LENTE SETA

A maior da taxa de ocupação considerando individualmente todas as faixas que se movimentam na fase ou subfase i é referida como taxa de ocupação crítica (OCi). Esse valor deve ser utilizado no dimensionamento dos tempos do semáforo. No caso de semáforos sem foco com lente seta, não há dificuldade na identificação das fases ou subfases críticas, pois só

existe um caminho crítico – aquele onde é maior a soma das taxas de ocupação das várias fases –, que pode ser entendido como o caminho mais “congestionado”.

Já no caso de semáforos com lente seta, é necessário comparar todos os caminhos possíveis para descobrir a sequência de fases ou subfases críticas que caracterizam o caminho crítico (o mais “congestionado”). O procedimento para isso é ilustrado nos Exemplos 4.7 e 4.8.

EXEMPLO 4.7

Considere o semáforo com as características mostradas na Figura 4.6. Os valores numéricos assinalados no diagrama de fases correspondem às taxas de ocupação associadas aos diversos movimentos. A questão consiste em encontrar o caminho crítico e, a partir disso, dimensionar os tempos do semáforo e os outros parâmetros caracterizadores da operação semafórica

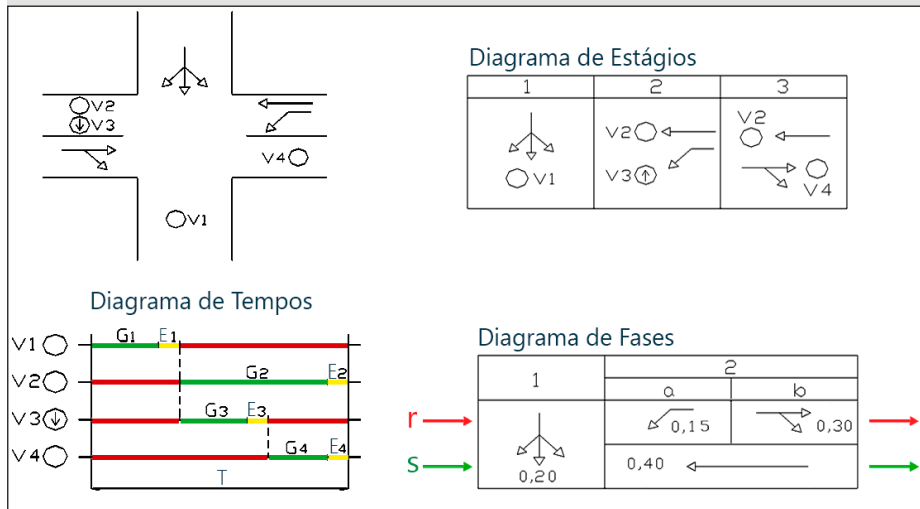


Figura 4.6 Identificação do caminho crítico (sequência de fases/subfases críticas).

Neste caso, existem dois caminhos possíveis:

- Caminho r (vermelho): fase 1 + subfase 2a + subfase 2b.
- Caminho s (verde): fase 1 + subfase 2ab.

As somas das taxas de ocupação críticas em cada um deles são:

- $OCr = OC1 + OC2a + OC2b = 0,20 + 0,15 + 0,30 = 0,65 = \sum OCi$
- $OCs = OC1 + OC2ab = 0,20 + 0,40 = 0,60 = \sum OCi$

Como $OCr > OCs$, o número de fases ou subfases críticas é igual a 3 e, portanto, P (tempo perdido no ciclo) = $3 \cdot Pi$ (tempo perdido em cada fase); admitindo-se $Pi = 4$ s, $P = 3 \cdot 4 = 12$ s. Nesse caso, são determinados os tempos de verde das subfases 2a e 2b seguindo o procedimento padrão, e o tempo de verde da fase 2ab equivale à soma dos verdes das duas subfases.

Supondo-se programação única ao longo do dia, o intervalo de variação preconizado do tempo de ciclo para semáforo de 3 fases é de 70 a 90 s. Utilizando-se o valor médio de 80 s, têm-se:

- Verde efetivo do ciclo: $Ge = T - P = 80 - 12 = 68$ s
- Verde efetivo fase 1: $Ge1 = (OC1 / OCr) \cdot Ge = (0,20 / 0,65) \cdot 68 = 21$ s
- Verde efetivo subfase 2a: $Ge2a = (OC2a / OCr) \cdot Ge = (0,15 / 0,65) \cdot 68 = 16$ s
- Verde efetivo subfase 2b: $Ge2b = (OC2b / OCr) \cdot Ge = (0,30 / 0,65) \cdot 68 = 31$ s
- Verde efetivo fase 2ab = $16 + 31 = 47$ s

Considere, agora, $OC2ab = 0,50$; os novos valores são: $OCr = OC1 + OC2a + OC2b = 0,20 + 0,15 + 0,30 = 0,65$; $OCs = OC1 + OC2ab = 0,20 + 0,50 = 0,70$

Como $OCs > OCr$, o número de fases ou subfases críticas seria igual a 2 e, portanto, $P = 2 \cdot Li = 2 \cdot 4 = 8$ s. Nesse caso, determina-se o tempo de verde da fase (2ab) seguindo o procedimento padrão, e os tempos de verde das subfases 2a e 2b são determinados mediante a distribuição do verde da fase 2ab proporcionalmente às taxas de ocupação.

Supondo-se programação única ao longo do dia, o intervalo de variação preconizado do tempo de ciclo para semáforo de 2 fases é de 60 a 80 s. Utilizando o valor médio de 70 s, têm-se:

- Verde efetivo do ciclo: $Ge = T - P = 70 - 12 = 58$ s.
- Verde efetivo fase 1: $Ge1 = (OC1 / OCr) \cdot Ge = (0,20 / 0,70) \cdot 58 = 17$ s.
- Verde efetivo fase 2 (subfases 2a e 2b): $Ge2 = (OC2 / OCr) \cdot Ge = (0,50 / 0,70) \cdot 58 = 41$ s.

- Verde efetivo subfase 2a: $Ge2a = (0,15 / 0,15 + 0,30) \cdot 41 = 14 \text{ s}$
- Verde efetivo subfase 2b: $Ge2b = (0,30 / 0,15 + 0,30) \cdot 41 = 27 \text{ s}$

EXEMPLO 4.8

Considere o semáforo com as características mostradas na Figura 4.6. Os valores numéricos assinalados no diagrama de fases correspondem às taxas de ocupação associadas aos diversos movimentos. A questão consiste em identificar o caminho crítico e, em seguida, dimensionar os tempos do semáforo e os demais parâmetros caracterizadores da operação semafórica.

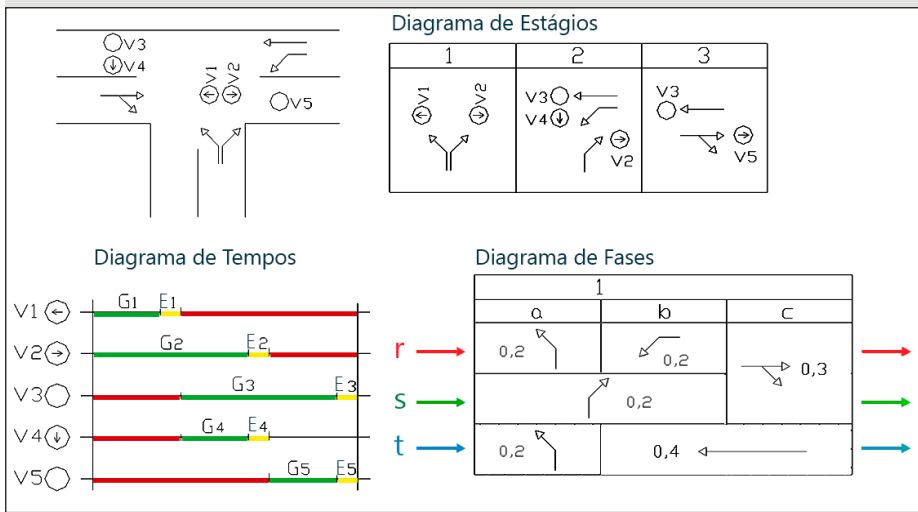


Figura 4.7 Identificação do caminho crítico (sequência de fases ou subfases críticas).

Neste caso, são três os caminhos possíveis:

- Caminho r (vermelho): subfase 1a + subfase 1b + subfase 1c.
- Caminho s (verde): subfase 1ab + subfase 1c.
- Caminho t (azul): subfase 1 + subfase 1bc.

As somas das taxas de ocupação críticas em cada um deles são:

- $OCr = 0,20 + 0,20 + 0,30 = 0,70$
- $OCs = 0,20 + 0,30 = 0,50$
- $OCT = 0,20 + 0,40 = 0,60$

Como $OCr > OCT > OCs$, o número de fases ou subfases críticas é igual a 3 e, portanto, P (tempo perdido no ciclo) = $3 \cdot P_i$ (tempo perdido em cada fase); admitindo $P_i = 4$ s, $P = 3 \cdot 4 = 12$ s. Nesse caso, determinam-se os tempos de verde das subfases 1a, 1b e 1c seguindo o procedimento padrão. Esse resultado é o mais comum, uma vez que os movimentos controlados pelos semáforos V2 e V3 não são, em geral, críticos, pois ocorrem em dois estágios.

Supondo programação única ao longo do dia, o intervalo de variação preconizado do tempo de ciclo para semáforo de 3 fases ou subfases é 70 – 90 s. Utilizando o valor médio de 80 s, têm-se:

- Verde efetivo do ciclo: $Ge = T - P = 80 - 12 = 68$ s.
- Verde efetivo subfase 1a = $(OC1a / OCr) \cdot Ge = (0,20 / 0,70) \cdot 68 = 19$ s
- Verde efetivo subfase 1b = $(OC1b / OCr) \cdot Ge = (0,20 / 0,70) \cdot 68 = 19$ s
- Verde efetivo subfase 1c = $(OC1c / OCr) \cdot Ge = (0,30 / 0,70) \cdot 68 = 29$ s
- Verde efetivo subfase 1ab = 38 s
- Verde efetivo subfase 1bc = 58 s

Considere-se, agora, $OC1ab = 0,43$; os novos valores são: $OCr = OC1a + OC1b + OC1c = 0,20 + 0,20 + 0,30 = 0,70$; $OCs = OC1ab + OC1c = 0,43 + 0,30 = 0,73$; $OCT = OC1a + OC1bc = 0,20 + 0,40 = 0,60$

Como $OCs > OCr > OCT$, o número de fases ou subfases críticas é igual a 2 e, portanto, P (tempo perdido no ciclo) = $2 \cdot P_i$ (tempo perdido em cada fase); admitindo $P_i = 4$ s, $P = 2 \cdot 4 = 8$ s. Nesse caso, determinam-se os tempos de verde das subfases críticas 1ab e 1c, e depois 1a e 1b, seguindo o procedimento padrão adotado no Exemplo 4.6.

Considere, agora, $O1bc = 0,52$; os novos valores seriam:

- $OCr = OC1a + OC1b + OC1c = 0,20 + 0,20 + 0,30 = 0,70$
- $OCs = O1ab + O1c = 0,20 + 0,30 = 0,50$
- $OCT = O1a + O1bc = 0,20 + 0,52 = 0,72$

Como $OC_t > OC_r > OC_s$, o número de fases ou subfases críticas é igual a 2 e, portanto, P (tempo perdido no ciclo) = $2 \cdot P_i$ (tempo perdido em cada fase); admitindo $P_i = 4$ s, $P = 2 \cdot 4 = 8$ s. Nesse caso, são determinados os tempos de verde das subfases críticas $1a$ e $1bc$, e depois $1b$ e $1c$, seguindo o procedimento padrão adotado no Exemplo 4.7.

4.7 NÍVEL DE SERVIÇO EM SEMÁFOROS ISOLADOS

Em cruzamentos semaforizados isolados, recomenda-se a metodologia simples descrita a seguir para avaliar o nível de serviço (qualidade da operação).

O parâmetro utilizado para caracterizar o nível de serviço é o tempo médio que o veículo permanece parado na interseção esperando para passar. Os principais fatores que influenciam esse tempo são: volumes de tráfego, fluxos de saturação, número de estágios/fases do semáforo, programação dos tempos, entre outros.

O tempo médio parado pode ser determinado por meio de expressões, modelos teóricos, simulação em computadores ou medições diretas em campo. Os modelos teóricos e as simulações apresentam maior complexidade de aplicação, mas têm a vantagem de permitir simular diferentes cenários previamente durante os estudos de projetos de alteração nas características da via e/ou do tráfego.

A determinação do tempo médio parado no campo pode ser feita com o emprego de diferentes métodos. Um dos mais simples consiste na contagem do número de veículos na fila em intervalos fixos variando de 10 a 20 segundos. O tempo total de espera na fila é igual ao produto do número de veículos contados pelo intervalo entre as contagens. Esse valor, dividido pelo volume de veículos que chega à fila durante o período de pesquisa, que precisa ser contado, fornece o tempo médio parado por veículo.

Recomenda-se que o tempo de observação seja superior a 10 minutos. Quanto menor o intervalo fixo entre as contagens, maior a precisão dos resultados. Estudos utilizando métodos mais precisos indicam que, para maior exatidão, o resultado obtido por esse método simples deve ser multiplicado por 0,9. Para obter o tempo médio parado considerando todas as faixas de tráfego da interseção, deve-se calcular a média ponderada com base nos volumes de tráfego de cada faixa.

Esse método também pode ser empregado para determinar o tempo médio de espera em interseções com parada obrigatória para a via secundária. Nesse caso, o tempo parado na via principal é igual a zero.

EXEMPLO 4.9

Considere o caso de uma faixa de aproximação em um semáforo com os seguintes valores de veículos na fila, obtidos em contagens realizadas a cada 20 segundos, durante um tempo de pesquisa igual a 10 minutos: 0, 3, 6, 10, 12, 7, 4, 1, 2, 5, 7, 11, 9, 13, 7, 5, 6, 3, 0, 2, 6, 7, 11, 14, 8, 9, 13, 8, 7 e 6.

Nesse caso resultam os seguintes valores:

- Soma total dos veículos contados = 202 veículos.
- Tempo total esperando na fila = $202 \times 20 = 4.040$ segundos.
- Número de veículos que chegaram à fila (passaram pela faixa analisada) = 110 veículos, que corresponde a $110/10 = 11$ veículos/minuto (1 veículo a cada 5,45 segundos) = 660 veículos/h.
- Tempo médio parado na fila = $4.040 / 110 = 36,73$ segundos/veículo.
- Tempo médio parado na fila corrigido = $0,9 \times 36,73 = 33,05$ segundos/veículo.

Considere que a faixa analisada corresponde à aproximação da Rua Palmeiras (faixa única) e que na aproximação transversal da Rua Flamengo existem duas faixas com os seguintes valores de fluxo e tempo médio parado (já corrigido): faixa 1: 600 veículos/h, 14 s; faixa 2: 500 veículos/h, 12 s.

Assim, na aproximação da Rua Palmeiras, o tempo médio parado será igual a (média ponderada) = $(600 \times 14 + 500 \times 12) / (600 + 500) = 13,09$ s.

O tempo médio parado considerando toda a interseção semafórica será igual a (média ponderada) = $(13,09 \times 1.100 + 33,05 \times 660) / (1.100 + 660) = 20,58$ s/veíc.

Os valores dos números de veículos parados na fila são mais facilmente obtidos por meio de filmagem aérea com o emprego de drones.

Na Tabela 4.1 é fornecido o nível de serviço (qualidade da operação) em função do tempo médio parado na fila aguardando para passar. Esses valores de referência foram estabelecidos com base no Highway Capacity

Manual – TRB (2000) e nos resultados das pesquisas conduzidas por Bezerra (2010) com usuários do país.

Tabela 4.1 Nível de serviço x tempo médio parado esperando para passar.

Nível de serviço	Qualidade da operação	Tempo médio parado (s)
A	Ótima	≤ 15
B	Boa	≤ 30
C	Regular	≤ 50
D	Ruim	≤ 75
E	Péssima	≤ 105
F	Inaceitável	> 105

EXEMPLO 4.10

No caso do Exemplo 4.9, o nível de serviço da operação da interseção semafórica considerada globalmente (tempo parado = 20,58 s) é “B” (qualidade boa). Na aproximação da Rua Palmeiras (tempo parado = 33,05 s), o nível de serviço é “C” (qualidade regular), enquanto na aproximação da Rua Flamengo (tempo médio parado = 13,09 s) é “A” (qualidade ótima).

A menos que haja um motivo especial, o semáforo no período de tempo da pesquisa favorece a aproximação da Rua Flamengo em detrimento da Rua Palmeiras – o ideal seria que ambas as vias operassem com o mesmo nível de serviço (qualidade de operação).

A análise das condições de operação é normalmente realizada em diferentes dias típicos (dia útil, sábado e domingos/feriados) e em distintos períodos do dia: pico da manhã, pico da tarde e períodos típicos de menor movimento. Assim, obtém-se um retrato abrangente das condições operacionais em todos os períodos e dias típicos. Vale destacar que os estudos devem ser realizados nos 15 minutos de maior movimento dentro da hora de maior fluxo no período analisado.

Um parâmetro que também pode ser utilizado para avaliar a qualidade da operação em semáforos é a porcentagem de veículos que passam no primeiro verde após a chegada à fila (se não houver fila é considerada a chegada na linha de retenção); os demais veículos passariam no segundo ou terceiro verde. Esse procedimento, no entanto, não é muito utilizado.

4.8 EXERCÍCIOS

1. Como funcionam os controladores semafóricos de tempo fixo? E os controladores por demanda de tráfego?
2. Quais as formas mais comuns de detecção de veículos utilizadas nos controladores por demanda de tráfego?
3. Qual a diferença entre controle semafórico por demanda atuado e semiatuado?
4. Explicar, em linhas gerais, como funciona o controle semiatuado e o controle atuado pelo tráfego?
5. Para determinar o fluxo de saturação de uma faixa de um cruzamento semaforizado, cronometraram-se dez ciclos de abertura de verde entre a passagem do 4º e do 10º veículo. O cronômetro era acionado quando o 4º veículo passava na linha de retenção e parado quando passava o 10º. Quando havia menos de dez veículos na fila contínua, o cronômetro não era acionado. No final de 20 medições, o tempo total marcado no cronômetro foi de 5 minutos e 20 segundos. Pede-se determinar: o *headway* médio e o fluxo de saturação na faixa pesquisada.
6. Refazer o Exemplo 4.2 considerando: largura da faixa = 4,0 m, declive de 4%, porcentagem de veículos pesados = 15%, porcentagem de motocicletas = 10%, porcentagem de veículos que fazem conversão à esquerda = 10% (faixa compartilhada). Qual o novo valor do fluxo de saturação se a faixa for exclusiva para conversão à esquerda? E se fosse uma faixa exclusiva para conversão à direita? E se fosse uma faixa única compartilhada para conversão à direita?
7. O cruzamento de duas vias de sentido único apresenta as seguintes características: largura da via A = 7 m, largura da via B = 15 m, velocidade de circulação: 40 km/h na via A e 50 km/h na via B. Pede-se determinar: a duração do amarelo, do vermelho geral e do entreverdes nas duas aproximações. Adotar os valores necessários para o cálculo.
8. Qual a duração dos tempos de verde nos exemplos 4.4, 4.6 e 4.7 (neste caso, calcular também a duração dos verdes efetivos que não foram determinados). Considere a duração do amarelo = 3 s e do vermelho geral = 2 s.
9. Definir o plano de operação e a programação de tempos do semáforo mostrado na Figura 4.8, considerando o emprego de um único plano semafórico para todos os períodos do dia, fluxo de saturação igual a 1.500 veíc./h em todas as faixas, amarelo = 3 s e vermelho geral = 1 s. Adotar os outros valores necessários para o cálculo.

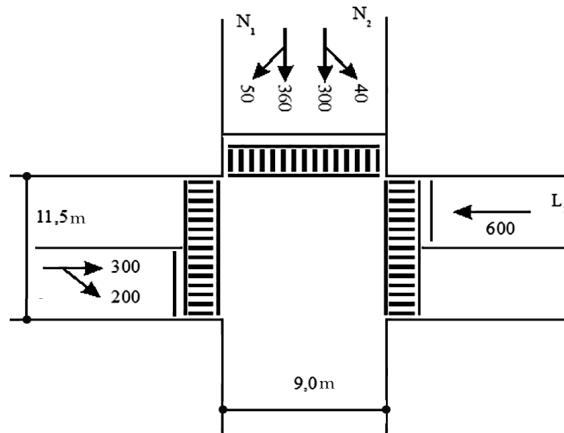


Figura 4.8 Características do cruzamento relativas à questão 9.

10. Determinar a duração da fase verde para os pedestres (vermelha para os veículos) na travessia de uma rua com largura de 8 metros considerando um movimento intermediário de pedestres.
11. Refazer a questão 9 considerando a existência de uma fase exclusiva para a travessia de pedestres no cruzamento (que deve ser dimensionada).
12. Definir o plano de operação e a programação de tempos do semáforo mostrado na Figura 4.9, considerando o emprego de um único plano semafórico para todos os períodos do dia, fluxo de saturação igual a 1.600 veíc./h em todas as faixas, amarelo = 3 s e vermelho geral = 2 s. Adotar os outros valores necessários para o cálculo.

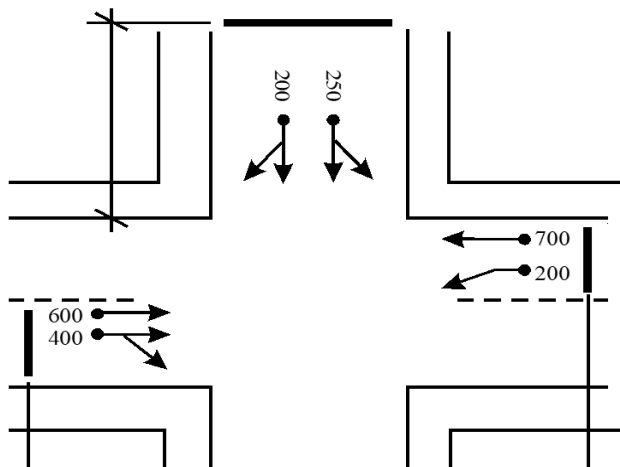


Figura 4.9 Características do cruzamento relativas à questão 10.

13. Refazer a questão 12 considerando $V_{L1} = 900$ v/h em vez de 700 v/h.
14. Considere o caso de uma faixa de aproximação em um semáforo, com os seguintes valores de veículos na fila, obtidos em contagens realizadas a cada 15 segundos (tempo de pesquisa igual 15 minutos): 0, 4, 5, 11, 12, 8,5, 2, 3, 6, 8, 12, 11, 15, 7, 7, 6, 4, 0, 4, 7, 8, 13, 15, 10, 11, 15, 9, 8 e 6. Durante os 15 minutos da pesquisa, chegaram à faixa 300 veículos. Determinar o tempo médio efetivamente parado por veículo.
15. Considere o caso de um semáforo em um cruzamento entre duas vias de sentido único, com duas faixas em cada uma delas. Os volumes contados no período de pico (15 minutos) da hora de pico, bem como os valores do tempo efetivamente parado nesse período, foram: Rua Rincão: Faixa A: 200 veíc., 13 s; Faixa B: 240 veíc., 28 s; Rua Américo: Faixa A: 240 veíc., 55 s; Faixa B: 300 veíc., 78 s. Pede-se determinar: a) o nível de serviço em cada faixa das duas vias; b) o nível de serviço em cada via; c) o nível de serviço global do cruzamento; d) refazer os itens a, b e c considerando o cruzamento sem semáforo, com parada obrigatória apenas para a Rua Américo.

COORDENAÇÃO DE SEMÁFOROS

Capítulo

5

5.1 FORMAS DE CONTROLE DO TRÁFEGO COM SEMÁFOROS

O controle empregado nos cruzamentos semaforizados pode ser classificado em três tipos:

- Controle isolado de cruzamento – O controle dos movimentos do tráfego baseia-se apenas nos volumes de veículos existentes no cruzamento, não sendo consideradas as eventuais influências exercidas pela operação de interseções sinalizadas próximas. O objetivo é minimizar a demora no cruzamento, ou o número de paradas, ou uma função que incorpore os dois parâmetros.
- Controle arterial de cruzamentos (rede aberta) – Este tipo de controle preocupa-se em operar os semáforos de uma via principal (corredor de tráfego) de forma coordenada, permitindo a continuidade de movimentos entre as interseções adjacentes. O exemplo mais comum é o sistema progressivo, também conhecido como “onda verde”. O objetivo é minimizar a demora total nos semáforos da via, ou o número de paradas, ou uma função que incorpore os dois parâmetros.
- Controle de cruzamentos em áreas (rede fechada) – Neste tipo de controle são consideradas todas as interseções semaforizadas vizinhas situadas em uma região, como é comum nas áreas comerciais das cidades de maior porte. O objetivo é minimizar a demora global em todos os semáforos da rede, ou o número de paradas, ou uma função que combine ambos os parâmetros. Em geral, o controle do sistema é centralizado em um local denominado de “central de controle semafórico”.

5.2 INDICAÇÃO PARA OPERAÇÃO SEMAFÓRICA COM COORDENAÇÃO

Quando existem semáforos próximos – até cerca de 500 a 800 metros na prática –, a coordenação entre eles é sempre benéfica, pois reduz o número de paradas e a demora, ou uma função que combine ambos os parâmetros. Essa coordenação também contribui para reduzir o consumo de combustível e a emissão de poluentes.

Outros benefícios obtidos com a coordenação de semáforos próximos incluem: maior controle das velocidades desenvolvidas, redução do tamanho das filas de veículos e aumento da capacidade dos cruzamentos.

5.3 COORDENAÇÃO DE SEMÁFOROS EM UMA VIA DE SENTIDO ÚNICO

O tipo mais comum de coordenação de semáforos em uma via de sentido único é o *sistema progressivo*, também denominado de *onda verde*. Esse sistema, em princípio, consiste em defasar os inícios dos períodos de verde dos semáforos consecutivos de um intervalo igual ao tempo gasto pelos veículos para percorrer a distância entre eles. Dessa forma, os verdes dos semáforos subsequentes ao primeiro se iniciam exatamente no momento em que o primeiro veículo do pelotão chega ao cruzamento, permitindo que todos os veículos do pelotão passem sem parar.

O verde a ser considerado no projeto de sistemas de coordenação de semáforos é o verde efetivo, que, como visto anteriormente, é bastante próximo do verde real. Assim, na prática, pode-se considerar o verde efetivo igual ao verde real.

O valor da defasagem entre os inícios de verde de semáforos consecutivos (*offset*) é dado pela expressão:

$$T_{ij} = \frac{D_{ij}}{V_{ij}}, \text{ isto é: } T_{12} = \frac{D_{12}}{V_{12}}, T_{23} = \frac{D_{23}}{V_{23}}, T_{34} = \frac{D_{34}}{V_{34}}$$

Onde, T_{ij} : tempo de percurso entre os semáforos i e j (s), D_{ij} : distância entre os semáforos i e j (m) e V_{ij} : velocidade no trecho entre os semáforos i e j (m/s).

A Figura 5.1 ilustra o funcionamento do sistema de onda verde.

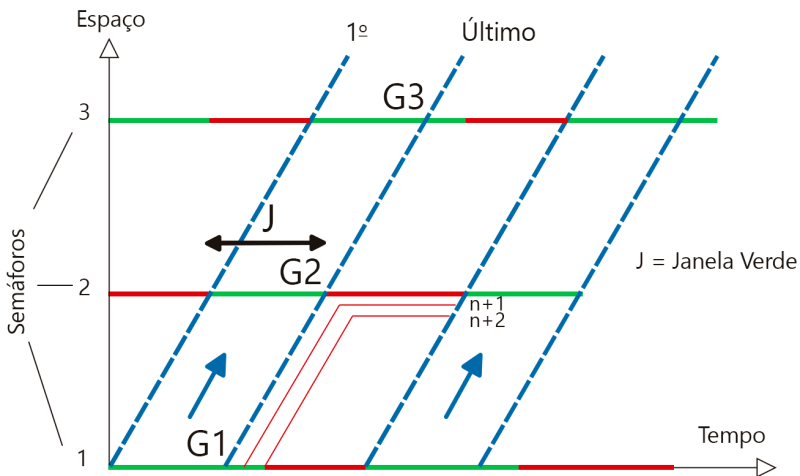


Figura 5.1 Esquema gráfico da operação do sistema de onda verde.

Para que o sistema de onda verde funcione é necessário que todos os semáforos tenham o mesmo tempo de ciclo, garantindo que a sincronização se repita no decorrer do tempo. Isso exige que os controladores dos semáforos que compõem o sistema sejam de alguma forma conectados, seja por cabos ou sinais eletromagnéticos.

Na prática, a repetição da sincronização ao longo do tempo também pode ser obtida quando se utiliza metade ou um quarto do tempo de ciclo em alguns semáforos; entretanto, essa solução reduz muito a eficiência do sistema.

O intervalo de tempo que possibilita o movimento sem paradas ao longo do conjunto de semáforos coordenados é denominado de *janela verde* ou *banda verde*. Em princípio, a janela verde é igual ao menor valor do verde considerando todos os semáforos do sistema, como indicado na Figura 5.1. Isto é:

$$J = \text{menor } G$$

A eficiência do sistema de onda verde (porcentagem do tempo que fica disponível para a passagem dos veículos pelo conjunto de semáforos) é dada pela expressão:

$$E = 100 \cdot \frac{J}{C}$$

Onde, E: eficiência do sistema de onda verde (%), J: largura da janela verde (s) e C: tempo de ciclo (s).

A largura da janela / banda verde (J) define a capacidade do sistema de onda verde, que é calculada pelas expressões:

$$C_c = f \cdot \frac{J}{h} \quad C_h = C_c \cdot \frac{3600 \cdot f \cdot j}{C \cdot h}$$

Onde, C_c: capacidade em veículos/ciclo, J: largura da janela verde (s), f: número de faixas de tráfego, h: intervalo (*headway*) entre os veículos (s) – usualmente adotado igual a 2 s, C_h: capacidade horária em veículos/h e C: ciclo (s).

Um ponto essencial para o funcionamento pleno da coordenação/sincronização de semáforos é a sinalização, informando a existência do sistema de coordenação para que os motoristas ajustem a velocidade de seus veículos, evitando, assim, a necessidade de parar nos semáforos.

Ainda que não seja comum, as velocidades nos distintos tramos da via principal podem ser diferentes.

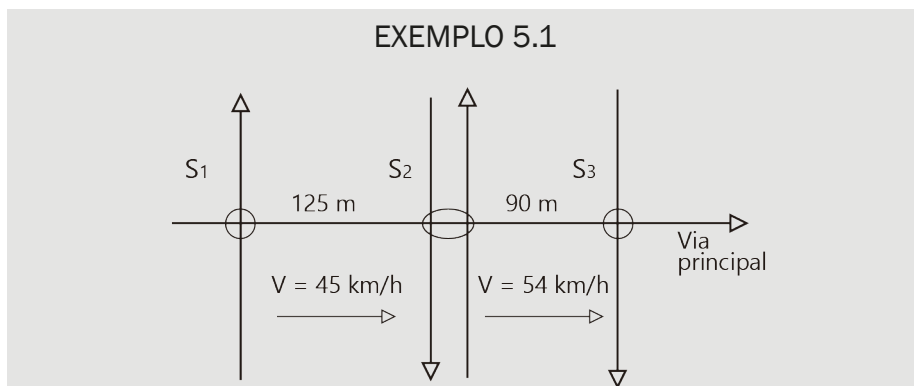


Figura 5.2 Dados para o caso do Exemplo 5.1.

Considere o trecho da via principal com 2 faixas de tráfego mostrada na Figura 5.2, com ciclo = 60 segundos e tempos de verde na via principal igual a: $S_1 = 45s$, $S_2 = 40s$, $S_3 = 45s$. Para operação coordenada/sincronizada dos três semáforos (S1, S2 e S3) resultam os seguintes valores:

- Tempos de percurso: $T_{12} = D_{12} / V_{12} = 125 / (45/3,6) = 10s$,
 $T_{23} = D_{23} / V_{12} = 90 / (54/3,6) = 6s$.
- Instantes dos inícios de verde: $S_1 = 0$, $S_2 = 10s$, $S_3 = 16s$.
- Janela verde (banda verde): J menor $G(45,40,45) = 40s$.
- Eficiência do sistema de onda verde: $E = 100 \cdot (40 / 60) = 100 (40 / 60) = 66,67\%$. A passagem dos veículos pelo conjunto de semáforos está disponível em 66,67% do tempo.
- Capacidade de passagem em cada ciclo: $Cc = f \cdot J / h = 2 \cdot 40 / 2 = 40$ veíc/ciclo.
- Capacidade horária: $Ch = Cc \cdot 3600 / C = 40 \cdot 3600 / 60 = 2.400$ veic/h.

Quando há com frequência veículos parados nos semáforos a jusante no momento em que o pelotão se aproxima – seja devido à entrada de veículos das vias secundárias na via principal, ao fato de veículos da via principal não terem conseguido passar no verde anterior ou à entrada de veículos provenientes de estacionamentos e garagens –, pode-se antecipar o início dos verdes, de modo a permitir que esses veículos se movimentem

antes da chegada do pelotão principal. Esse procedimento é denominado de esvaziamento de caixa e está ilustrado na Figura 5.3.

O indicado é que o valor de tempo de antecipação do início do verde seja determinado com base em observação no campo.

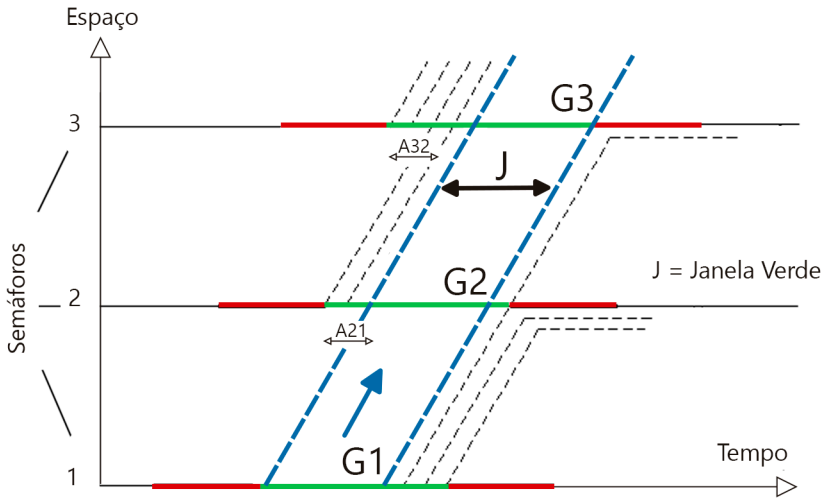


Figura 5.2 Antecipação dos inícios dos verdes.

Vale observar que a antecipação dos verdes proporciona os benefícios da onda verde também para os veículos que estavam parados nos semáforos intermediários como mostra a Figura 5.2. Por exemplo, o primeiro e o segundo veículos parados no semáforo 2 conseguem passar pelos demais semáforos situados a jusante sem necessidade de parar, e assim sucessivamente. Em razão disso, ainda que a antecipação dos inícios dos verdes leve a uma redução da eficiência do sistema no que se refere à passagem do pelotão principal pelo conjunto de semáforos – devido à diminuição da largura da janela verde, conforme mostrado na Figura 5.2 –, a eficiência global do sistema não é alterada.

EXEMPLO 5.2

Retome o caso do Exemplo 5.1 e considere uma antecipação do verde de 6s no semáforo 2 em relação ao 1 (A_{21}) e de 4s no semáforo 3 em relação ao semáforo 2 (A_{32}). Com isso, resultam os seguintes novos valores:

- Instantes dos inícios de verde: $S_1 = 0$, $S_2 = 10 - 6 = 4s$, $S_3 = 16 - (6 + 4) = 6s$.
- Janela verde (banda verde) para o pelotão principal: $J = 40 - (6 + 4) = 30s$.
- Eficiência da onda verde para o pelotão principal: $E = 100 \cdot (30 / 60) = 50\%$.
- Capacidade de passagem em cada ciclo: $C_c = 2 \cdot 30 / 2 = 30$ veíc/ciclo.
- Capacidade horária: $Ch = C_c \cdot 3600 / C = 30 \cdot 3600 / 60 = 1.800$ veic/h.

O sistema de coordenação em que os verdes são abertos à medida que o pelotão de veículos avança é denominado de *sistema progressivo*. Esse sistema apresenta elevada eficiência quando o fluxo de veículos não é alto.

Para aumentar a eficiência da coordenação/sinconização é comum operar os cruzamentos semaforizados com indícios de congestionamentos maiores nas vias secundárias, o que resulta em maior tempo de verde para a via principal.

Um ponto relevante ao sucesso da coordenação é o comportamento dos condutores na adequação das velocidades dos veículos. Nesse sentido, o emprego de temporizadores nos semáforos auxilia bastante.

Quando o fluxo de veículos aumenta, as filas residuais nos semáforos tendem a crescer, exigindo maiores valores para os intervalos de antecipação do início dos verdes, até o ponto em que todos os semáforos precisam abrir o verde simultaneamente — o chamado *sistema simultâneo*.

Em condições de tráfego congestionado, pode ser necessário operar a onda verde como um *sistema reverso*, ou seja, abrir primeiro o verde do último semáforo para esvaziar a última quadra, depois o penúltimo, e assim sucessivamente, de forma a dar vazão ao fluxo da via principal congestionada. Esse sistema pode ser denominado de “onda vermelha”. Nesse caso, o objetivo deixa de ser permitir que os veículos passem sem parar nos semáforos próximo, mas sim que o tráfego possa fluir, ainda que com velocidade média bastante baixa, ou seja, em condições extremamente precárias.

Nesses casos, também é importante utilizar sinalização adequada para evitar a obstrução dos cruzamentos, de modo a não impedir a passagem dos veículos provenientes das vias secundárias.

5.4 COORDENAÇÃO DE SEMÁFOROS EM UMA VIA DE DUPLO SENTIDO

No caso de vias de mão dupla, somente uma situação muito especial permite obter a eficiência plena do sistema de onda verde nos dois sentidos de fluxo.

Essa condição especial corresponde a observância da expressão colocada a seguir, estabelecida com base no gráfico da Figura 5.4.

$$C = \frac{2 \cdot T}{n}, \text{ sendo: } T = \frac{D}{V}$$

Onde, C: duração do ciclo (s), D: distância entre os semáforos (m), V: velocidade de circulação (m/s), n: número inteiro e T: tempo de percurso entre os semáforos (s).

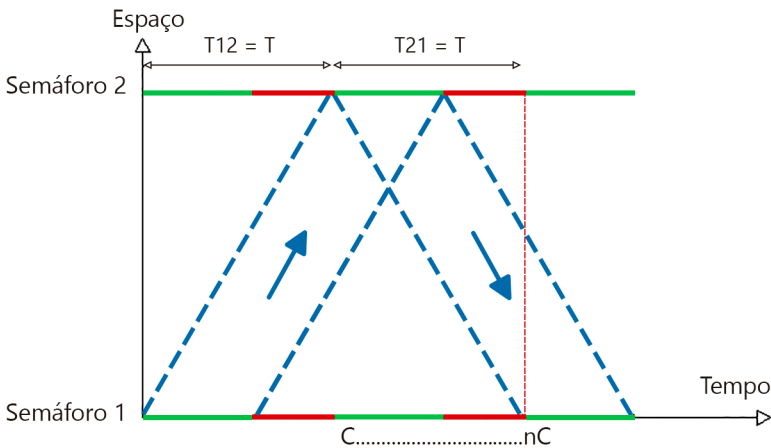


Figura 5.4 Situação especial para coordenação plena em vias de duplo sentido.

EXEMPLO 5.3

Considere os seguintes valores: $D = 400\text{m}$, $V = 36\text{km/h}$ e $n = 1$. Nesse caso, para sincronização plena nos dois sentidos de tráfego resultam os seguintes valores:

- Tempo de percurso entre os semáforos: $T = D / V = 400 / (36/3,6) = 40\text{s}$.
- Ciclo semaforico: $C = 2 \cdot T / n = 2 \cdot 40 / 1 = 80\text{s}$ (se n fosse igual a 2, resultaria $C = 40\text{s}$; C fica menor quando n aumenta).

- Admitindo um tempo de verde para a via principal igual a 50s e 2 faixas de tráfego, obtém-se: $E = 50/80 = 62,5\%$ (eficiência), $J = 50s$ (janela/banda verde), $Cc = 2 \cdot 50/2 = 50$ veíc/ciclo/sentido e $Ch = 50 \cdot 3600/60 = 3.000$ veíc/h/sentido.

Essa relação entre as variáveis deve sempre existir entre dois pares de semáforos consecutivos no grupo de semáforos da via principal.

Quando existem dois semáforos muito próximos em uma via de duplo sentido com fluxos equivalententes, o mais indicado é operar com abertura simultânea dos períodos de verde (Figura 5.5). Com isso é garantido igual eficiência em ambos os sentidos.

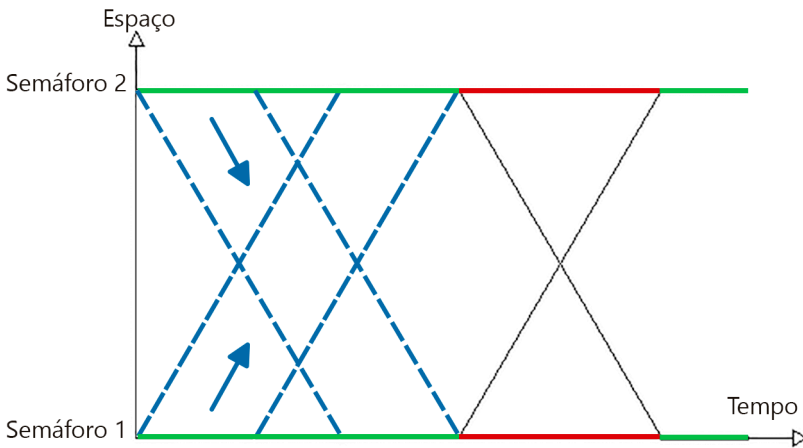


Figura 5.5 Coordenação com abertura simultânea dos verdes para dois semáforos.

Esse raciocínio também se aplica para o caso de mais de dois semáforos próximos, conforme ilustrado na Figura 5.6 para a situação de três semáforos, sendo a janela verde por sentido calculada pela expressão:

$$J = G - (N - 1) \cdot T, \text{ onde } T = D/V$$

Onde, J : janela verde do sistema (s), G : verde da via principal, N : número de semáforos coordenados, T : tempo de percurso entre os semáforos em (s), D : distância entre os semáforos (m), V : velocidade média de percurso (m/s).

EXEMPLO 5.4

Considere os seguintes valores: $D = 195\text{m}$, $V = 54 \text{ km/h}$, $N = 3$, verde na via principal = 60s e ciclo semafórico = 90s. Nesse caso, têm-se os seguintes resultados:

- Tempo de percurso entre os semáforos: $T = D / V = 195 / (54/3,6) = 13\text{s}$.
- Valor da janela/banda verde: $J = G - (N - 1) \cdot T = 60 - (3 - 1) \cdot 13 = 34\text{s}$ (se $N = 4$, $J = 21\text{s}$; se $N=5$, $J = 8\text{s}$; quanto maior N , menor a janela verde para o pelotão principal).

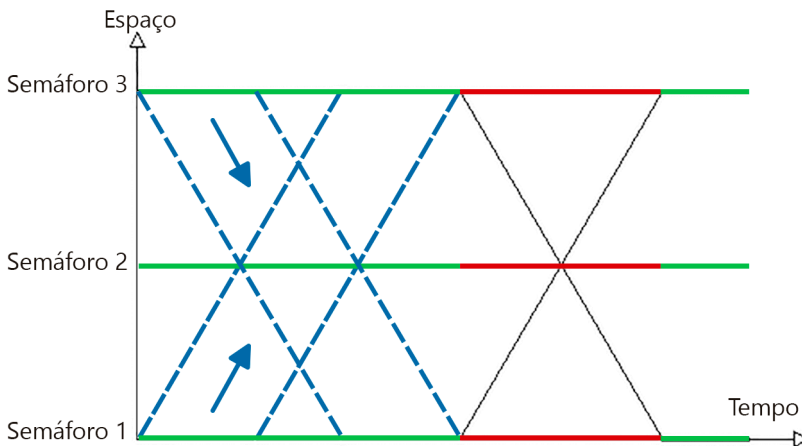


Figura 5.6 Coordenação com abertura simultânea dos verdes para três semáforos consecutivos.

De maneira geral, a coordenação de semáforos em vias de mão dupla, buscando beneficiar os dois sentidos de fluxo, geralmente não apresenta ganhos satisfatórios. Nesses casos, o objetivo principal é estabelecer janelas verdes com larguras proporcionais ao fluxo de veículos em cada sentido. A melhor solução – aquela em que a soma das larguras das bandas verdes nos dois sentidos é máxima e proporcionais aos respectivos fluxos – pode ser obtida de três modos: por tentativa e erro; seguindo técnicas específicas, mais ou menos complexas; ou utilizando programas de computador (existem no mercado diversos softwares desenvolvidos para determinar a programação semafórica ótima para vias com duplo sentido de tráfego). Nos casos mais simples, o processo de tentativa e erro se mostra

bastante eficiente. Já em situações mais complexas recomenda-se utilizar programas de computador.

Para obter ganhos maiores na coordenação de semáforos em vias de mão dupla, um procedimento bastante utilizado é variar o sentido da onda verde ao longo do dia, de modo a beneficiar o fluxo predominante em cada período. Assim, por exemplo, pela manhã o sincronismo seria no sentido Bairro–Centro e à tarde no sentido Centro–Bairro. Outra possibilidade é estabelecer a onda verde em trechos alternados, de forma que em cada trecho se beneficie um dos sentidos.

Uma estratégia bastante empregada é promover a abertura simultânea do verde nos dois sentidos e operar com a maior largura possível de janela verde em ambos, utilizando tempo de ciclo alto e tempo de verde mínimo para as vias secundárias que cruzam a via principal, garantindo, no entanto, que na maioria dos ciclos todos os veículos das vias secundárias sejam liberados no primeiro verde.

5.5 COORDENAÇÃO DE SEMÁFOROS EM UMA REDE DE SEMÁFOROS NO CRUZAMENTO DE DOIS BINÁRIOS

A Figura 5.7 mostra o caso típico de uma rede de semáforos no cruzamento de dois binários (conjunto de vias de sentido único).

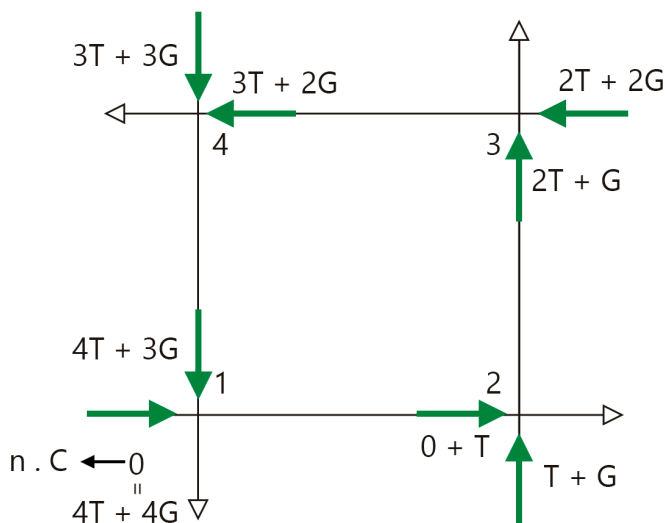


Figura 5.7 Rede de semáforos no cruzamento de dois binários.

Admitindo uma rede totalmente simétrica, isto é, $G = C/2$ em todas as aproximações de todos os semáforos e tempo de percurso igual a T em todos os tramos, resultam os valores mostrados na Figura 5.7.

Assim, para que haja coordenação nas quatro ligações (rede fechada), é necessário que a seguinte relação básica seja verificada:

$$4 \cdot T + 4 \cdot G = n \cdot c \rightarrow 4T + 4 C/2 = n \cdot c \rightarrow C = \frac{4 \cdot T}{n - 2}$$

Foi admitido que $G = C/2$, o que constitui uma aproximação, pois foi desprezado o tempo perdido no ciclo. Como o tempo perdido representa uma pequena fração do ciclo, grosso modo 10%, essa simplificação tem consequência desprezível nas aplicações práticas.

EXEMPLO 5.5

Considere os seguintes valores: $D = 195\text{m}$, $V = 54 \text{ km/h}$ e $n = 3$.

Nesse caso, resultam os seguintes valores:

- Tempo de percurso em todos os tramos: $T = D / V = 195 / (54/3,6) = 13\text{s}$.
- Valor do ciclo: $C = 4 \cdot T / (n - 2) = 4 \cdot 13 / (3 - 2) = 52\text{s}$ (se $n = 4$, $C = 26\text{s}$; quanto maior n , menor o valor do ciclo (ciclos muito pequenos são inviáveis).
- Duração do verde (relação obrigatória): $G = C / 2 = 52 / 2 = 26\text{s}$.
- Valor da janela/banda verde em todos os tramos: $J = 26\text{s}$.

Contudo, quaisquer que sejam os valores dos parâmetros, é sempre possível operar com coordenação ótima em três das quatro ligações (rede aberta).

Essas conclusões podem ser generalizadas para redes maiores, isto é: a coordenação de ligações que não fecham a rede é sempre possível, mas a coordenação de qualquer outra ligação que leve ao fechamento da rede está sujeita à restrição expressa por equação similar à estabelecida para a rede simples analisada.

A Figura 5.8 ilustra este fato. A coordenação dos semáforos nas vias mostradas com linha contínua é sempre possível; já a inclusão de coordenação em qualquer das outras vias mostradas com linha tracejada está sujeita à verificação de equação similar à desenvolvida para a rede simples analisada.

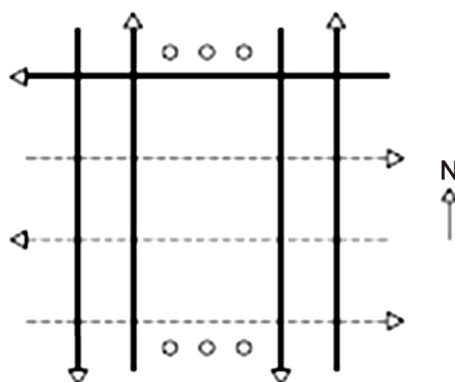


Figura 5.8 Rede fechada e rede aberta.

5.6 COORDENAÇÃO DE SEMÁFOROS EM UMA REDE

Redes de semáforos próximos são comuns nas regiões comerciais de grande movimento das cidades de maior porte. Nesses casos, a otimização da operação exige a utilização de programas específicos de computador, que permitem simular várias alternativas.

Diversos programas têm sido desenvolvidos para a análise da operação de semáforos, contemplando funções de simulação e otimização. Entre os softwares disponíveis no mercado destacam-se: TRANSYT, SIGOP, NETSIM, INTEGRATION, SCOOT, AIMSUN, VISSIM, entre outros.

5.7 NÍVEL DE SERVIÇO EM VIAS COM SEMÁFOROS

Em vias principais dotadas de semáforo, a metodologia descrita a seguir pode ser utilizada para avaliar a qualidade da operação (nível de serviço).

O parâmetro que caracteriza o nível de serviço é a velocidade média de viagem, em comparação com a velocidade máxima desenvolvida na via em trechos sem dispositivos de controle (como semáforo, parada obrigatória ou “dê a preferência”) e em condições de fluxo baixo. Na maioria dos casos, a velocidade máxima pode ser considerada igual ao limite legal estabelecido para a via.

Os principais fatores que afetam a velocidade média de viagem nas vias principais com semáforos são: volume (fluxo) de tráfego, número de semáforos por quilômetro, programação semaforica, existência ou não de coordenação entre os semáforos, o tipo de coordenação adotada

e eventual presença de interseções com parada obrigatória ou “dê a preferência” (ainda que incomum nas vias principais, pode ocorrer, por exemplo, em rotatórias).

A velocidade de viagem pode ser determinada por meio de modelos teóricos, simulação em computador utilizando programas apropriados ou com observações diretas em campo por intermédio de carro-teste.

Os modelos teóricos e as simulações apresentam certa complexidade na sua aplicação, mas permitem simular diferentes cenários, sendo especialmente úteis no estudo de projetos de alterações viárias.

O método de carro-teste consiste em percorrer o trecho em estudo com um ou mais veículos, medindo o tempo total de percurso com cronômetro. A divisão da extensão do trecho pelo tempo de percurso fornece diretamente a velocidade média de viagem. O tempo de percurso inclui o tempo em movimento, o tempo parado em semáforos e cruzamentos não preferenciais e o tempo de desaceleração e aceleração nas paradas.

A velocidade média de viagem no período de estudo deve ser calculada pela média aritmética das velocidades obtidas entre 6 e 12 percursos com carros-testes.

A análise das condições de operação deve ser realizada em diferentes dias típicos (dias úteis, sábados, domingos/feriados) e em distintos períodos do dia: pico da manhã, pico da tarde e períodos característicos de menor movimento. Dessa forma, obtém-se um retrato fiel das condições de operação ao longo do dia e da semana.

É indicado que os estudos sejam realizados sempre nos 15 minutos de maior movimento dentro da hora de pico do período analisado.

A avaliação deve ser feita por trechos da via e também em sua extensão total, considerando separadamente os dois sentidos de circulação. Isso permite identificar as condições de operação de cada segmento e sentido de tráfego.

Na Tabela 5.1 é apresentado o nível de serviço em função da velocidade média de viagem para os diferentes tipos de via classificados de acordo com a velocidade livre (velocidade máxima desenvolvida em trechos sem paradas e com baixo fluxo. Na maioria dos casos, essa velocidade pode ser admitida igual ao limite legal. Esses valores de referência foram estabelecidos com base no *Highway Capacity Manual* – TRB (2000) e em pesquisas com usuários do país realizadas por Bezerra (2010).

Tabela 5.1 Nível de serviço x velocidade média de viagem em trechos de vias com fluxo interrompido.

Velocidade livre típica (km/h)	80	70	60	50	40
Nível de serviço	Velocidade média de viagem (km/h)				
A (ótimo)	≥70	≥62	≥53	≥44	≥35
B (bom)	≥60	≥53	≥45	≥38	≥30
C (regular)	≥50	≥44	≥38	≥32	≥25
D (ruim)	≥40	≥35	≥30	≥25	≥20
E (péssimo)	≥30	≥27	≥23	≥19	≥25
F (inaceitável)	<30	<27	<23	<19	<15

EXEMPLO 5.6

Em um corredor de tráfego urbano semaforizado, com extensão de 2,0 km e onde a velocidade limite é de 50 km/h, foram obtidos os seguintes valores do tempo total de viagem (6 medições) no sentido Norte - Sul no pico da tarde : 230s, 240s, 225s, 235s, 225s e 250s. Nesse caso, resultam os seguintes valores:

- Tempo médio de percurso: $T = 234,17s$.
- Velocidade média de percurso: $V = 2,0 / (234,17/3600) = 30,75 \text{ km/h}$.
- $V = 30,75 \text{ km/h}$ está entre 25 km/h e 32 km/h (considerando $V \text{ livre} = 50 \text{ km/h}$), portanto nível de serviço D (qualidade de operação ruim).

Esse método de análise permite identificar as condições de operação existentes e avaliar os resultados de modificações introduzidas na via, tais como: alterações na programação dos semáforos, mudanças na forma de sincronismo, implantação de um novo semáforo, eliminação de cruzamentos com parada obrigatória ou “dê a preferência”, implantação de faixa exclusiva para ônibus, entre outras.

A associação dos valores de velocidade e de fluxo nos diferentes períodos e dias típicos possibilita a elaboração de um diagrama volume de tráfego × velocidade × nível de serviço para cada sentido e para cada trecho, bem como para a extensão total da via.

5.7 EXERCÍCIOS

1. Numa via de sentido único existem três semáforos separados por 150 m e 300 m no sentido do fluxo. A velocidade média no trecho é de 54 km/h, o ciclo dos semáforos de 90 s e o tempo de verde na via é de 60 s. Projetar um sistema de coordenação tipo onda verde para a via, determinando todos os parâmetros de desempenho do sistema. Elaborar gráfico ilustrativo.
2. Resolver o exercício 1 considerando uma antecipação de verde para esvaziamento de caixa de 5 s no 2º e no 3º semáforo.
3. Numa via de duplo sentido existem três semáforos separados por 300 m. Para uma velocidade média no trecho de 36 km/h, determinar o valor do ciclo que permita uma coordenação com eficiência máxima e igual nos dois sentidos. Determinar todos os parâmetros de desempenho do sistema considerando o tempo de verde para a via principal igual a 60% do ciclo. Elaborar gráfico ilustrativo.
4. Numa via de duplo sentido existem três semáforos separados por 100 m e 200 m. O ciclo dos semáforos é de 90 s e o tempo de verde para a via de 60 s. Considerando uma velocidade média de 36 km/h, determinar todos os parâmetros de desempenho do sistema para uma coordenação com abertura simultânea dos tempos de verde. Elaborar gráfico ilustrativo.
5. Considere a rede de semáforos da Figura 5.7 e os seguintes valores: $D = 120\text{m}$, $V = 35\text{ km/h}$ e $G = C/2$. Determinar os valores do ciclo e do verde para operação coordenada/sincronizada em rede fechada. Determinar também a janela verde e a capacidade de tráfego em cada tramo considerando 2 faixas de trânsito.
6. Em seis percursos realizados com carro-teste no sentido Leste–Oeste de uma via, durante os 15 minutos de pico da manhã, num trecho de 2,80 km, foram obtidos os seguintes tempos de viagem (em segundos): 250, 270, 230, 260, 220 e 240. Determinar a velocidade média de viagem do trecho no período considerado. Levando em conta o limite legal de velocidade na via igual a 65 km/h, indicar o nível de serviço no período estudado?

7. Numa via urbana semaforizada com velocidade máxima de 60 km/h, foram determinados os valores médios apresentados na tabela a seguir para a velocidade e o fluxo em um dos sentidos em cinco períodos distintos do dia. Determinar o nível de serviço em cada período e elaborar um diagrama associando o fluxo na via com a velocidade e o nível de serviço.

Período	1	2	3	4	5
Velocidade (km/h)	10	40	60	20	30
Fluxo (veículo/h)	1800	800	400	2200	1400



BIBLIOGRAFIA

BRASIL. Conselho Nacional de Trânsito. Manual Brasileiro de Sinalização de Trânsito: Volume V: Sinalização Semafórica. Brasília, DF: CONTRAN, 2014.

CET – Companhia de Engenharia de Tráfego. Manual de Sinalização Semafórica – Critérios de Programação. São Paulo: CET, 2001.

DENATRAN – Departamento Nacional de Trânsito. Manual de Semáforos. 2ª Edição. Brasília: DENATRAN, 1984.

FERRAZ, A. C. P. Notas de aula. São Carlos, 2015.

BEZERRA, B. S. Semáforos: gestão técnica, percepção do desempenho, duração dos tempos. Tese de doutorado. EESC – USP. São Carlos, 1990.

FRANÇOSO, M. T. Estudo sobre semáforos isolados de tempo fixo. Dissertação de mestrado. EESC – USP, São Carlos, 1990.

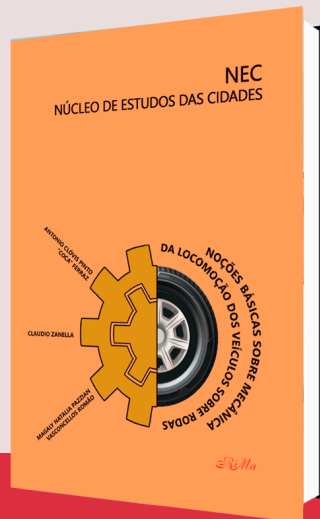
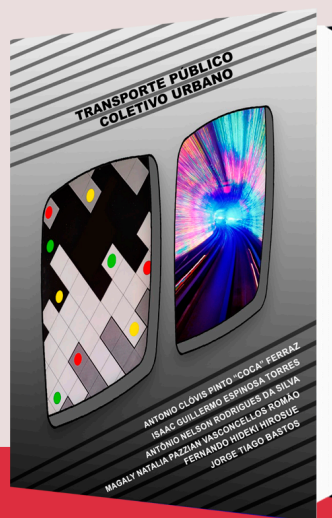
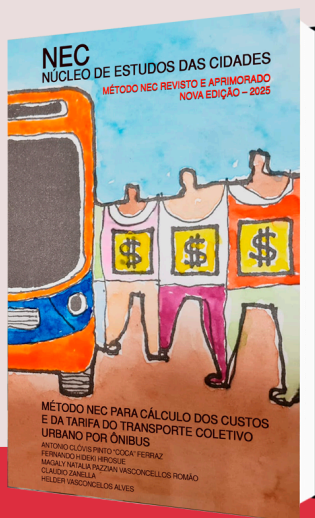
PARREIRA, A. B. Verificação da validade de alguns modelos teóricos de comportamento de tráfego em interseções de vias urbanas. Dissertação de mestrado. EESC-USP. São Carlos, 1983.

SPILOGON, L. M. G. Semáforo: grupo focal convencional x grupo focal com informação do tempo restante. Dissertação de mestrado. EESC-USP. São Carlos, 2010.

FORNACIARI, I. A. Investigações no campo da programação semafórica. Dissertação de mestrado. EESC-USP. São Carlos, 2010.

TRB – Transportation Research Board (2000). HCM – Highway Capacity Manual. Washington D.C.: NRC.

Outras publicações do NEC – NÚCLEO DE ESTUDOS DAS CIDADES.



Publicações disponíveis no site da RiMa Editora
www.rimaeditora.com.br

LIVRO DEDICADO À CIDADE DE RIO VERDE (GO),
EM RECONHECIMENTO À EXCELÊNCIA DO
TRABALHO DESENVOLVIDO NO CAMPO DA
MOBILIDADE URBANA

RioVerdeGo
CIDADE CONECTADA COM O FUTURO

APOIO

