

Walber Paschoal da Silva

CONTROLE DE TRÁFEGO URBANO

1ª Edição

SÃO JOSÉ DOS PINHAIS
BRAZILIAN JOURNALS PUBLICAÇÕES DE PERIÓDICOS E EDITORA
2022



Walber Paschoal da Silva



Controle de tráfego urbano

1ª Edição

Brazilian Journals Editora

2022

2022 by Brazilian Journals Editora
Copyright © Brazilian Journals Editora
Copyright do Texto © 2022 Os Autores
Copyright da Edição © 2022 Brazilian Journals Editora
Editora Executiva: Barbara Luzia Sartor Bonfim Catapan
Diagramação: Aline Barboza Coelli
Edição de Arte: Brazilian Journals Editora
Revisão: Os Autores

O conteúdo dos livros e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos autores. Permitido o download da obra e o compartilhamento desde que sejam atribuídos créditos aos autores, mas sem a possibilidade de alterá-la de nenhuma forma ou utilizá-la para fins comerciais.

Conselho Editorial:

Prof^a. Dr^a. Fátima Cibele Soares - Universidade Federal do Pampa, Brasil
Prof. Dr. Gilson Silva Filho - Centro Universitário São Camilo, Brasil
Prof. Msc. Júlio Nonato Silva Nascimento - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará, Brasil
Prof^a. Msc. Adriana Karin Goelzer Leining - Universidade Federal do Paraná, Brasil
Prof. Msc. Ricardo Sérgio da Silva - Universidade Federal de Pernambuco, Brasil
Prof. Esp. Haroldo Wilson da Silva - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Brasil
Prof. Dr. Orlando Silvestre Fragata - Universidade Fernando Pessoa, Portugal
Prof. Dr. Orlando Ramos do Nascimento Júnior - Universidade Estadual de Alagoas, Brasil
Prof^a. Dr^a. Angela Maria Pires Caniato - Universidade Estadual de Maringá, Brasil
Prof^a. Dr^a. Genira Carneiro de Araujo - Universidade do Estado da Bahia, Brasil
Prof. Dr. José Arilson de Souza - Universidade Federal de Rondônia, Brasil
Prof^a. Msc. Maria Elena Nascimento de Lima - Universidade do Estado do Pará, Brasil
Prof. Caio Henrique Ungarato Fiorese - Universidade Federal do Espírito Santo, Brasil
Prof^a. Dr^a. Silvana Saionara Gollo - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul, Brasil
Prof^a. Dr^a. Mariza Ferreira da Silva - Universidade Federal do Paraná, Brasil
Prof. Msc. Daniel Molina Botache - Universidad del Tolima, Colômbia
Prof. Dr. Armando Carlos de Pina Filho - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil
Prof. Dr. Hudson do Vale de Oliveira - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Roraima, Brasil
Prof^a. Msc. Juliana Barbosa de Faria - Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Brasil
Prof^a. Esp. Marília Emanuela Ferreira de Jesus - Universidade Federal da Bahia, Brasil
Prof. Msc. Jadson Justi - Universidade Federal do Amazonas, Brasil
Prof^a. Dr^a. Alexandra Ferronato Beatrice - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul, Brasil
Prof^a. Msc. Caroline Gomes Mâcedo - Universidade Federal do Pará, Brasil
Prof. Dr. Dilson Henrique Ramos Evangelista - Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará, Brasil
Prof. Dr. Edmilson Cesar Bortoletto - Universidade Estadual de Maringá, Brasil



Ano 2022

Prof. Msc. Raphael Magalhães Hoed - Instituto Federal do Norte de Minas Gerais, Brasil
Prof^a. Msc. Eulália Cristina Costa de Carvalho - Universidade Federal do Maranhão, Brasil
Prof. Msc. Fabiano Roberto Santos de Lima - Centro Universitário Geraldo di Biase, Brasil
Prof^a. Dr^a. Gabrielle de Souza Rocha - Universidade Federal Fluminense, Brasil
Prof. Dr. Helder Antônio da Silva, Instituto Federal de Educação do Sudeste de Minas Gerais, Brasil
Prof^a. Esp. Lida Graciela Valenzuela de Brull - Universidad Nacional de Pilar, Paraguai
Prof^a. Dr^a. Jane Marlei Boeira - Universidade Estadual do Rio Grande do Sul, Brasil
Prof^a. Dr^a. Carolina de Castro Nadaf Leal - Universidade Estácio de Sá, Brasil
Prof. Dr. Carlos Alberto Mendes Morais - Universidade do Vale do Rio do Sino, Brasil
Prof. Dr. Richard Silva Martins - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Sul Rio Grandense, Brasil
Prof^a. Dr^a. Ana Lídia Tonani Tolfo - Centro Universitário de Rio Preto, Brasil
Prof. Dr. André Luís Ribeiro Lacerda - Universidade Federal de Mato Grosso, Brasil
Prof. Dr. Wagner Corsino Enedino - Universidade Federal de Mato Grosso, Brasil
Prof^a. Msc. Scheila Daiana Severo Hollveg - Universidade Franciscana, Brasil
Prof. Dr. José Alberto Yemal - Universidade Paulista, Brasil
Prof^a. Dr^a. Adriana Estela Sanjuan Montebello - Universidade Federal de São Carlos, Brasil
Prof^a. Msc. Onofre Vargas Júnior - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano, Brasil
Prof^a. Dr^a. Rita de Cássia da Silva de Oliveira - Universidade do Estado do Pará, Brasil
Prof^a. Dr^a. Leticia Dias Lima Jedlicka - Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará, Brasil
Prof^a. Dr^a. Joseina Moutinho Tavares - Instituto Federal da Bahia, Brasil
Prof. Dr. Paulo Henrique de Miranda Montenegro - Universidade Federal da Paraíba, Brasil
Prof. Dr. Claudinei de Souza Guimarães - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil
Prof^a. Dr^a. Christiane Saraiva Ogradowski - Universidade Federal do Rio Grande, Brasil
Prof^a. Dr^a. Celeide Pereira - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Brasil
Prof^a. Msc. Alexandra da Rocha Gomes - Centro Universitário Unifacvest, Brasil
Prof^a. Dr^a. Djanavia Azevêdo da Luz - Universidade Federal do Maranhão, Brasil
Prof. Dr. Eduardo Dória Silva - Universidade Federal de Pernambuco, Brasil
Prof^a. Msc. Juliane de Almeida Lira - Faculdade de Itaituba, Brasil
Prof. Dr. Luiz Antonio Souza de Araujo - Universidade Federal Fluminense, Brasil
Prof. Dr. Rafael de Almeida Schiavon - Universidade Estadual de Maringá, Brasil
Prof^a. Dr^a. Rejane Marie Barbosa Davim - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Brasil
Prof. Msc. Salvador Viana Gomes Junior - Universidade Potiguar, Brasil
Prof. Dr. Caio Marcio Barros de Oliveira - Universidade Federal do Maranhão, Brasil
Prof. Dr. Cleiseano Emanuel da Silva Paniagua - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Brasil
Prof^a. Dr^a. Ercilia de Stefano - Universidade Federal Fluminense, Brasil
Prof. Msc. Marcelo Paranzini - Escola Superior de Empreendedorismo, Brasil
Prof. Msc. Juan José Angel Palomino Jhong - Universidad Nacional San Luis Gonzaga - Ica, Perú
Prof. Dr. Edson da Silva - Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Brasil
Prof. Dr. João Tomaz da Silva Borges - Instituto Federal de Ciência e Tecnologia de Minas Gerais, Brasil



Ano 2022

Profª Drª Consuelo Salvaterra Magalhães - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Brasil

Prof. Dr. José Gpe. Melero Oláquez - Instituto Tecnológico Nacional de México, Cidade do México

Prof. Dr. Adalcio Machado - Universidade Alto Vale do Rio do Peixe, Brasil

Profª Drª Claudia da Silva Costa - Centro Universitário Planalto do Distrito Federal, Brasil

Profª. Msc. Alicia Ravelo Garcia - Universidad Autónoma de Baja California, México

Prof. Dr. Artur José Pires Veiga - Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, Brasil

Profª Drª María Leticia Arena Ortiz - Universidad Nacional Autónoma de México, México

Profª Drª Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás - IFG, Brasil

Profª Drª Muriel Batista Oliveira - Faculdade de Ciências Contábeis de Nova Andradina, Brasil

Prof. Dr. José Amilton Joaquim - Universidade Eduardo Mondlane, Brasil

Prof. Msc. Alceu de Oliveira Toledo Júnior - Universidade estadual de Ponta Grossa, Brasil

Prof. Dr. Márcio Roberto Rocha Ribeiro - Universidade Federal de Catalão, Brasil

Prof. Dr. Alecson Milton Almeida dos Santos - Instituto Federal Farroupilha, Brasil

Profª. Msc. Sandra Canal - Faculdade da Região Serrana, Brasil



Ano 2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

S357c Silva, Walber Paschoal

Controle de tráfego urbano / Walber Paschoal da Silva.
São José dos Pinhais: Editora Brazilian Journals, 2022.
198 p.

Formato: PDF

Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader

Modo de acesso: World Wide Web

Inclui: Bibliografia

ISBN: 978-65-81028-19-0.

DOI: 10.35587/brj.ed.0001352.

1. Veículos. 2. Tráfego Urbano. I. Silva, Walber Paschoal II.
Título.

Brazilian Journals Editora
São José dos Pinhais – Paraná – Brasil
www.brazilianjournals.com.br
editora@brazilianjournals.com.br



Ano 2022

APRESENTAÇÃO

Um dos principais problemas enfrentados pelas grandes cidades é o alto fluxo de veículos nas malhas viárias urbanas. Esse problema, que se agrava ainda mais nos horários de pico, exerce efeitos negativos sobre o conforto dos usuários, sobre a segurança no trânsito e sobre o consumo de combustíveis, tendo em vista que grande parte dos tempos de viagens são gastos com os veículos parados. Este trabalho tem como objetivo proporcionar àqueles responsáveis pelo controle do tráfego das cidades, um ferramental teórico e prático capaz de auxiliá-los durante o processo de desenvolvimento de planos semaforicos adequados à realidade, otimizando a operação e o escoamento dos fluxos de tráfego urbanos.

SOBRE O AUTOR

Possui graduação em Engenharia Civil pela Universidade Federal Fluminense, mestrado em Engenharia de Transportes pela COPPE/UFRJ e doutorado em Engenharia de Transportes pela COPPE/UFRJ. Atualmente é professor associado da Universidade Federal Fluminense. Tem experiência nas áreas: Planejamento de transportes; Engenharia de tráfego; Infraestrutura de transportes; Desenvolvimento urbano sustentável; Sistemas de informações geográficas; e, Sistemas de gerenciamento de projetos de instalações industriais.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Interseção-exemplo 1	15
Figura 2 - Movimentos conflitantes em cruzamentos com de 5 ou mais aproximações..	17
Figura 3 - Acidentes que podem ser evitados pelo semáforo	18
Figura 4 - Acidentes que podem ser evitados pelo semáforo	18
Figura 5 - Acidentes que podem ser evitados pelo semáforo	19
Figura 6 - Combinação de critérios	20
Figura 7 - Comportamento dos volumes de tráfego ao longo dos dias da semana.....	22
Figura 8 - Sistema centralizado de controle por computador	24
Figura 9 - Movimentos (correntes de tráfego)	27
Figura 10 - Aproximações em uma interseção com duas vias de mão única.....	27
Figura 11 - Aproximações em uma interseção com duas vias de mão dupla.....	28
Figura 12 - Tempo de ciclo de uma interseção	28
Figura 13 - Fases e estágios de um semáforo.....	29
Figura 14 - Giro bloqueado.....	30
Figura 15 - Defasagem.....	31
Figura 16 - Conversão à esquerda sem faixa exclusiva e sem tráfego oposto	36
Figura 17 - Conversão à esquerda com faixa exclusiva e sem tráfego oposto	37
Figura 18 - Conversão à esquerda sem faixa exclusiva e com tráfego oposto	38
Figura 19 - Conversão à esquerda sem faixa exclusiva e com tráfego oposto	39
Figura 20 - Conversão à esquerda com faixa exclusiva e com tráfego oposto	41
Figura 21 - Conversão à direita com veículos estacionados	42
Figura 22 - Efeito dos fatores de ajustamento sobre o Fluxo de Saturação	43
Figura 23 - Tempo mínimo de verde efetivo	49
Figura 24 - Interseção-exemplo 4	50
Figura 25 - Identificação dos movimentos.....	55
Figura 26 - Identificação dos movimentos.....	58
Figura 27 - Identificação dos movimentos.....	63
Figura 28 - Interseção-exemplo 10	68
Figura 29 - Adaptação da figura 19 - Interseção-exemplo 10.....	74
Figura 30 - Interseção-exemplo.....	78
Figura 31 - Interseção-exemplo 15	80
Figura 32 - Interseção-exemplo 16	84
Figura 33 - Sincronização de semáforos pelo sistema progressivo (3ª etapa).....	90
Figura 34 - Sincronização de semáforos pelo sistema progressivo (4ª etapa).....	91
Figura 35 - Sincronização de semáforos pelo sistema progressivo (5ª etapa).....	92
Figura 36 - Sincronização de semáforos pelo sistema progressivo (6ª etapa).....	93
Figura 37 - Sincronização de semáforos pelo sistema progressivo (7ª etapa).....	94
Figura 38 - Sincronização de semáforos pelo sistema progressivo (1ª etapa).....	95
Figura 39 - Sincronização de semáforos pelo sistema progressivo (2ª à 8ª etapa)	96
Figura 40 - Sincronização de semáforos pelo sistema progressivo (9ª e 10ª etapas).....	98
Figura 41 - Sincronização de semáforos pelo sistema progressivo (11ª e 12ª etapas)....	99

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Volume veicular mínimo para instalação de semáforo	14
Tabela 2 - Volumes de tráfego da interseção-exemplo 1	15
Tabela 3 - Volume de tráfego médio das 8 h da interseção-exemplo 1	16
Tabela 4 - Interrupção do tráfego contínuo	16
Tabela 5 - Fatores de equivalência de veículos	34
Tabela 6 - Fatores de equivalência de veículos	35
Tabela 7 - Veículos equivalentes	44
Tabela 8 - Velocidades de progressão por tempo de ciclo.....	97

SUMÁRIO

CAPÍTULO 01	11
INTRODUÇÃO	
CAPÍTULO 02	25
CONCEITOS E DEFINIÇÕES	
CAPÍTULO 03	33
PLANOS SEMÁFORICOS ISOLADOS	
CAPÍTULO 04	88
SINCRONIZAÇÃO DE SEMÁFOROS	

CAPÍTULO 01

INTRODUÇÃO

1.1 Histórico e evolução

A primeira regulamentação de tráfego que se tem conhecimento, uma regulamentação de mão única, ocorreu em Nova York, Estado Unidos da América, no ano de 1791, e dizia o seguinte:

“para evitar confusão, as senhoras e senhores ordenarão seus cocheiros que sigam com as cabeças de seus cavalos em direção ao East River”

Nessa época o tráfego era composto basicamente por cavalos e charretes. Mas, esses meios de transporte foram, gradualmente, sendo substituídos por automóveis, ônibus e caminhões. Essa evolução sofrida pelos meios de transporte foi acompanhada pelas técnicas de controle do tráfego, da seguinte forma:

- Regra do direito de passagem;
- Sinal de prioridade;
- Sinal de parada em uma das vias;
- Sinal de parada nas duas vias;
- Controle feito por guarda;
- Semáforo (1º semáforo elétrico – 1914, em Cleveland, Ohio, Estados Unidos da América);
- Semáforos Sincronizados (1ª sincronização – 1918, em Salt Lake City, Estados Unidos da América);
- Controle das pistas.

1.2 O uso de semáforos

Estudos do Departamento Nacional de Trânsito (DENATRAN) mostram que, nas grandes cidades, cerca de 50 % dos tempos de viagens e 30 % do consumo de combustível são gastos com os veículos parados nas interseções (DENATRAN, 2015). Mas, mesmo em cidades menores, esses percentuais continuam sendo

relevantes, exercendo um impacto negativo sobre a circulação viária. Uma das maneiras de se minimizar esse problema, é por meio de uma boa regulação dos semáforos, capaz de proporcionar uma redução significativa dos tempos perdidos por esses veículos parados nas interseções, além de ordenar os fluxos e de aumentar a segurança, tanto de veículos quanto de pedestres.

Os semáforos têm como objetivos principais, evitar acidentes, otimizar a utilização da capacidade do cruzamento, favorecer as vias principais e proteger os pedestres. Mas, por se tratar de uma solução mais radical, nem sempre a instalação de um semáforo em uma interseção é a alternativa mais apropriada e capaz de proporcionar esses benefícios. Portanto, é importante que se realizem estudos preliminares no sentido de apontar se há realmente a necessidade do semáforo, pois em algumas situações como, por exemplo, em interseções com baixo fluxo de veículos, um semáforo pode até aumentar o tempo perdido pelos mesmos na interseção. Nesses estudos preliminares deve-se verificar, primeiramente, a possibilidade de se resolver o problema da interseção em análise, por meio de outras medidas, tais como:

- melhoria na sinalização vertical e horizontal;
- remoção de interferências que prejudiquem a visibilidade da sinalização;
- intervenções na geometria da interseção, no sentido de canalizar os fluxos, separando os movimentos conflitantes;
- melhoria na iluminação; e,
- estabelecimento de limites de velocidade adequados às características de cada aproximação.

Assim, caso nenhuma dessas medidas alternativas sejam capazes de resolver o problema, a decisão sobre a necessidade, ou não, da implantação de semáforos deve ser feita com base em nove critérios técnicos, descritos a seguir.

1. Volume veicular mínimo;
2. Interrupção do tráfego contínuo;

3. Movimentos conflitantes em cruzamentos com 5 ou mais aproximações;
4. Volume mínimo de pedestres;
5. Índice de acidentes e os tipos de colisão;
6. Implantação de movimento progressivo;
7. Controle de áreas congestionadas;
8. Combinação de critérios;
9. Situações locais específicas.

Vale destacar que nesse processo, o conhecimento do local, a experiência e o bom senso do técnico responsável, também são fundamentais para se chegar à decisão final. Isso porque em algumas situações, descobrir e tratar a causa principal do problema pode indicar medidas alternativas, capazes de evitar a necessidade de implantação do semáforo. Por exemplo, segundo DENATRAN (2014), algumas dessas medidas alternativas podem ser:

- Ajustes na geometria;
- Remoção de interferências que prejudiquem a visibilidade;
- Implantação de refúgios para pedestres;
- Direcionamento de pedestres para locais seguros de travessia;
- Proibição de estacionamento;
- Redução das velocidades nas aproximações;
- Melhoria na iluminação;
- Adequação das sinalizações horizontal e vertical;
- Reforço da sinalização de advertência;
- Definição da preferência de passagem;
- Inversão da preferência de passagem;
- Alteração de circulação;
- Implantação de minirrotatórias.

1.2.1 Volume veicular mínimo

A decisão sobre a necessidade de instalação de um semáforo em uma interseção pode ser justificada por meio dos volumes veiculares mínimos apresentados na tabela 1.

Tabela 1 - Volume veicular mínimo para instalação de semáforo

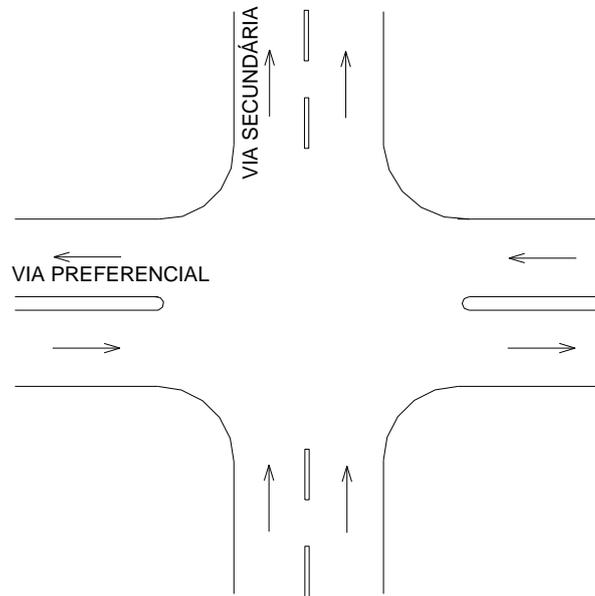
Nº de faixas de tráfego por aproximação		Veículos por hora, na preferencial, nos dois sentidos	Veículos por hora, na secundária, na aproximação mais carregada
Preferencial	Secundária		
1	1	500	150
2 ou mais	1	600	150
2 ou mais	2 ou mais	600	200
1	2 ou mais	500	200

Fonte: adaptado de DENATRAN (1984).

Esses volumes referem-se aos volumes equivalentes, convertendo-se cada tipo de veículo (ônibus, caminhões e motos, etc.) em unidade de carro de passeio (UCP), ou veículo equivalente, e representam a média das 8 horas de maior volume da interseção. Essa média é obtida por meio de contagem realizada, preferencialmente, no período de 7:00 às 20:00 horas, mas pode ser estendido para o período de 6:00 às 21:00h, dependendo das características do tráfego local. Também pode ser a média das 2 horas de maior volume, caso seja possível a implantação de semáforos atuados pelo tráfego ou de tempo fixo com programação múltipla (um plano para cada período do dia). Nessas interseções, naqueles períodos cujo volume veicular não justifica o semáforo, esse receberá uma programação com amarelo intermitente (amarelo piscante), que funciona como uma placa de “PARE” em cada aproximação.

Exemplo 1: Analisar a necessidade de implantação de semáforo na interseção da figura 1, onde a via preferencial possui 2 sentidos de tráfego e 1 faixa de tráfego por aproximação, e a via secundária é uma via de mão única com 2 faixas de tráfego, tomando como base os dados das tabelas 2 e 3.

Figura 1 – Interseção-exemplo 1.



Fonte: Produção do próprio autor.

Tabela 2 – Volumes de tráfego da interseção-exemplo 1

Hora	Volume (veíc./hora)		
	Via preferencial 2 sentidos	Via secundária	Volume total
7:00 – 8:00	755	405	1160
8:00 – 9:00	805	430	1235
9:00 – 10:00	495	335	830
10:00 – 11:00	470	205	675
11:00 – 12:00	445	200	645
12:00 – 13:00	475	210	685
13:00 – 14:00	435	195	630
14:00 – 15:00	440	190	630
15:00 – 16:00	490	185	675
16:00 – 17:00	605	210	815
17:00 – 18:00	670	245	915
18:00 – 19:00	810	285	1095
19:00 – 20:00	620	180	800



Horários de maior volume total

Fonte: Produção do próprio autor.

Tabela 3 – Volume de tráfego médio das 8 h da interseção-exemplo 1.

Volume médio das 8 horas	
Via preferencial	Via secundária
654	288

Fonte: Produção do próprio autor.

Assim, pelo critério 1, verifica-se que há a necessidade de colocação de semáforo na interseção.

1.2.2 Interrupção do tráfego contínuo

A interrupção do tráfego contínuo é necessária quando o volume de tráfego de uma via principal é muito alto, causando dificuldades para os veículos de uma via secundária atravessarem ou entrarem na corrente de tráfego dessa via principal. Tal situação pode provocar um atraso significativo aos veículos provenientes da via secundária, a tal ponto de justificar a implantação de um semáforo conforme verifica-se na tabela 4.

Tabela 4 – Interrupção do tráfego contínuo.

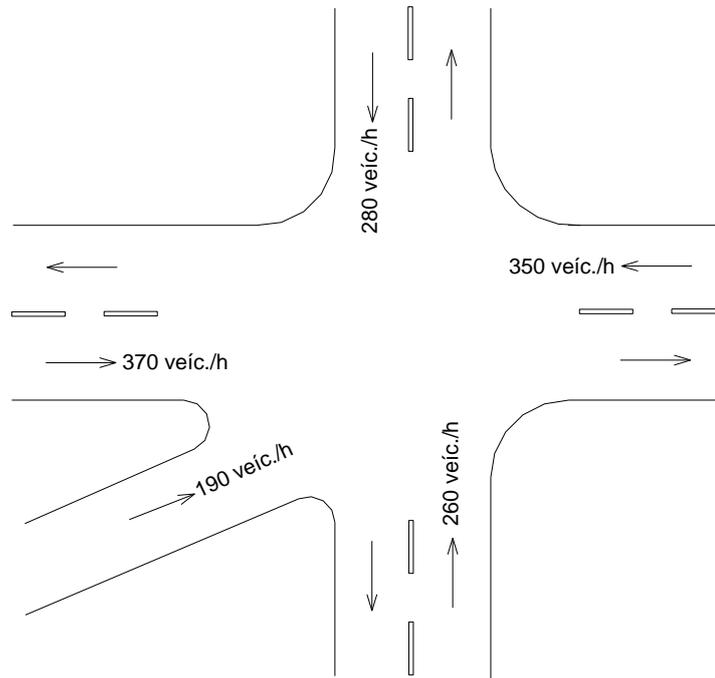
Nº de faixas de tráfego por aproximação		Veículos por hora, na preferencial, nos dois sentidos	Veículos por hora, na secundária, na aproximação mais carregada
Preferencial	Secundária		
1	1	750	75
2 ou mais	1	900	75
2 ou mais	2 ou mais	900	100
1	2 ou mais	750	100

Fonte: Produção do próprio autor.

1.2.3 Movimentos conflitantes em cruzamentos com 5 ou mais aproximações

Interseções com cinco ou mais aproximações, com um volume de tráfego total de, no mínimo, 800 veíc./h, devem ser semaforizadas, conforme ilustra o exemplo da a figura 2, onde o volume total de chegada na interseção é de 1450 veíc./h, justificando, assim, o semáforo.

Figura 2 - Movimentos conflitantes em cruzamentos com de 5 ou mais aproximações



Fonte: Produção do próprio autor.

1.2.4 Volume mínimo de pedestres

O pedestre também representa um fator importante para a análise da necessidade de semáforos nas interseções. Justifica-se a implantação de semáforo quando a interseção apresentar os seguintes volumes mínimos:

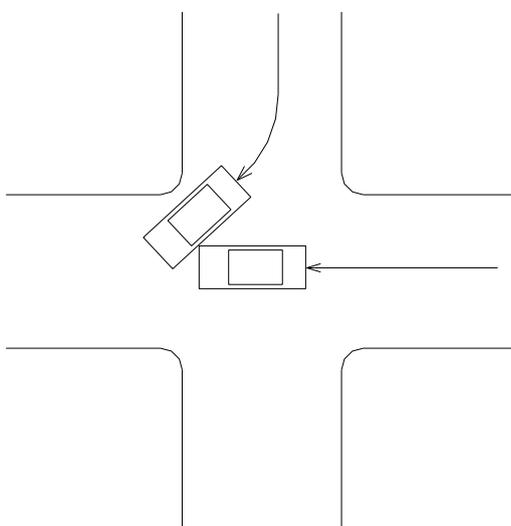
- Volume de pedestres ≥ 250 pedestres/h em ambos os sentidos de travessia da via;
- Volume de veículos ≥ 600 veic./h em ambos os sentidos da via, quando for uma via de mão dupla, sem canteiro central, ou com canteiro central com largura $< 1\text{m}$;
- Volume de veic./h ≥ 1.000 veic./h em ambos os sentidos, quando há canteiro central com largura $\geq 1\text{m}$.

1.2.5 Índice de acidentes e os tipos de colisão

Acidentes com as características descritas a seguir justificam a implantação de semáforos nas interseções.

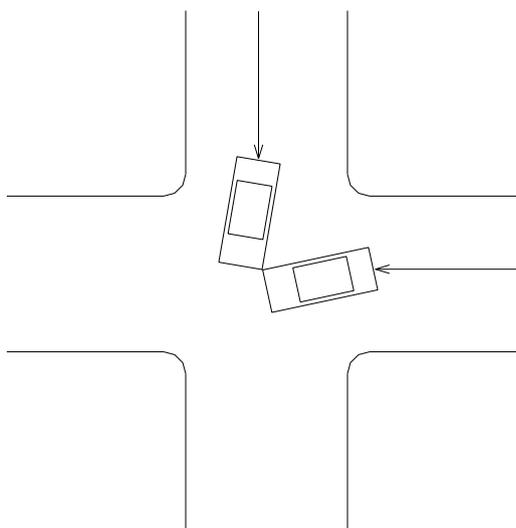
- Acidentes com vítimas com uma frequência de pelo menos 5 por ano;
- Acidentes que podem ser evitados pelo semáforo (figuras 3, 4 e 5).

Figura 3 - Acidentes que podem ser evitados pelo semáforo



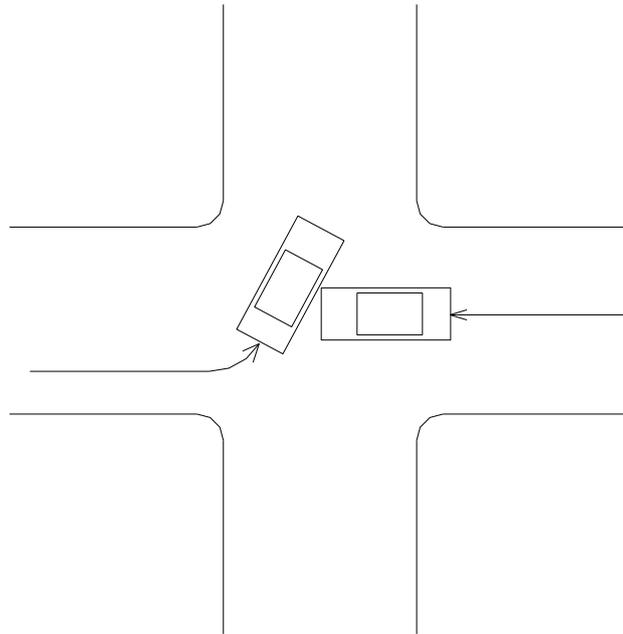
Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 4 - Acidentes que podem ser evitados pelo semáforo



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 5 - Acidentes que podem ser evitados pelo semáforo



Fonte: Produção do próprio autor.

1.2.6 Implantação de movimento progressivo

Um semáforo pode ser instalado para controlar e ordenar o escoamento dos pelotões de tráfego em um corredor, estabelecendo uma velocidade de progressão, de modo a permitir que o pelotão consiga percorrer todo o corredor em um movimento contínuo, sem nenhum tipo de interrupção, tal como uma indicação luminosa vermelha.

1.2.7 Controle de áreas congestionadas

Há situações onde mudanças operacionais ou mesmo físicas não são suficientes para evitar os congestionamentos. Um exemplo de uma dessas situações é quando há, em entrelaçamentos complexos, uma oferta viária (capacidade da interseção) menor que a demanda existente (volume de veículos). Outro exemplo refere-se ao bloqueio de uma interseção em virtude da fila acumulada em outra. Nesse último exemplo o semáforo seria colocado na interseção bloqueada, no sentido de impedir a formação da fila. Portanto são situações que justificam a implantação do semáforo.

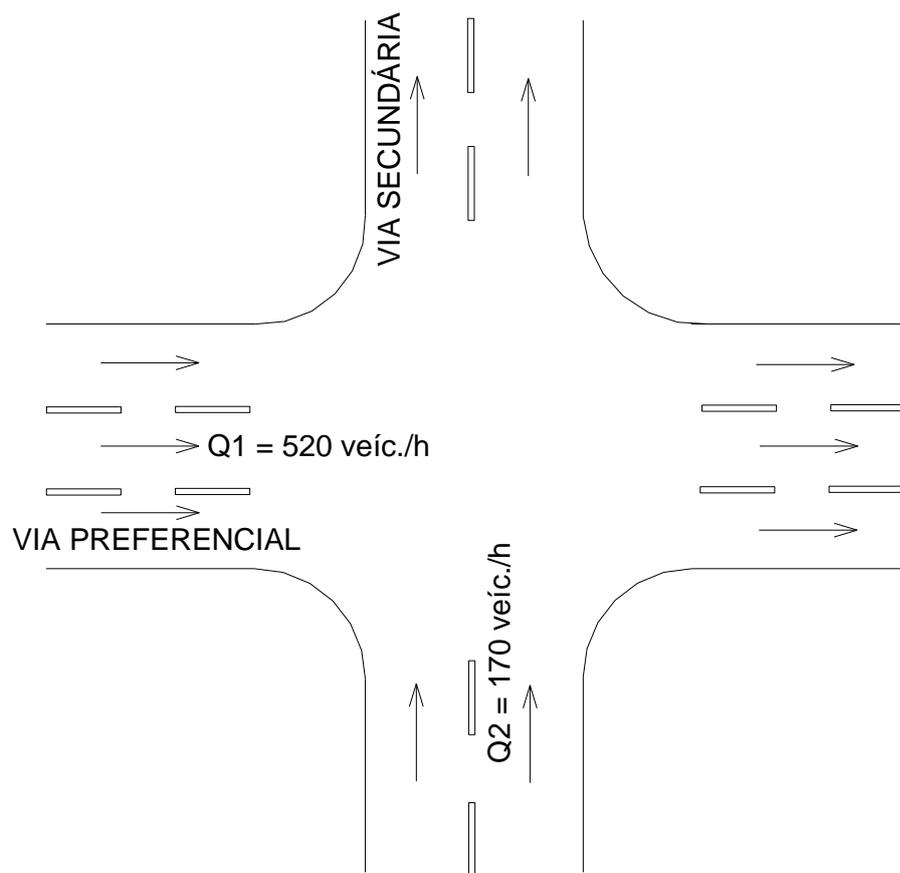
1.2.8 Combinação de critérios

É conveniente a implantação de semáforos em interseções onde ocorra uma sobreposição das situações vistas até aqui, conforme a regra descrita a seguir para a combinação de critérios.

- Quando 2 dos critérios de 1 a 5 são atendidos em, no mínimo, 80 % (exemplo 2, figura 6);
- Quando pelo menos 3 dos critérios de 1 a 5 são atendidos em, no mínimo, 70 %.

Exemplo 2:

Figura 6 - Combinação de critérios



Nº de acidentes com vítimas por ano = 4

Fonte: Produção do próprio autor

Assim verifica-se a necessidade de semáforo nessa interseção, tendo em vista que os pré-requisitos para a combinação dos critérios 1 e 5 são atendidos. Pelo critério 1 os fluxos mínimos deveriam ser de 600 veíc./h, na preferencial, e de 200 veíc./h, na secundária, e na interseção analisada, têm-se, 520 veíc./h (87 % do fluxo mínimo), na preferencial, e 170 veíc./h (85 % do fluxo mínimo), na secundária. E, pelo critério 5, o Nº mínimo de acidentes com vítimas por ano deveria ser de 5, e tem-se no presente caso, 4 (80 % do Nº mínimo).

1.2.9 Situações locais específicas

Situações locais específicas também podem ser usadas como justificativas para a implantação de semáforos, caso tenham embasamento técnico. Por exemplo, algumas situações bem comuns na prática são, travessia de escolas, saídas de veículos de emergência de hospitais, corpo de bombeiros, etc., e distância de visibilidade. O efeito da distância mínima de visibilidade sobre os critérios vistos anteriormente, é medido da seguinte forma:

- Interseções com má visibilidade: os critérios, atendidos em pelo menos 80 % dos valores mínimos estabelecidos, já justificam a implantação de semáforo;
- Interseções com boa visibilidade: os critérios, devem ser atendidos em pelo menos 120 % dos valores mínimos estabelecidos, para justificarem a implantação do semáforo.

1.3 Modos de operação

Há três sistemas principais para se otimizar a operação de uma interseção, minimizando os atrasos sofridos pelos veículos:

- Sistemas de tempo fixo;
- Sistemas atuados pelo tráfego;
- Sistemas centralizados de controle por computador.

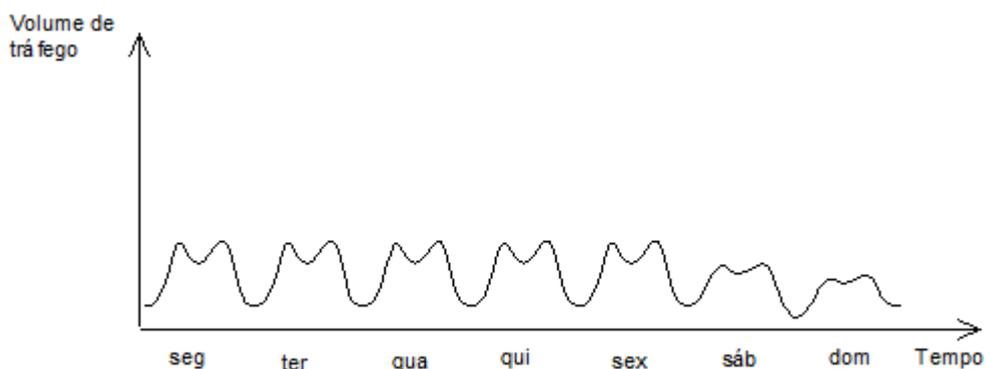
Os sistemas de tempo fixo, assim como os atuados pelo tráfego podem ser aplicados tanto para uma interseção isolada, quanto para uma rede, dependendo da estratégia de operação adotada para o local.

- Semáforos isolados: Um plano semaforico isolado é aquele onde não há uma sincronia com os planos semaforicos das demais interseções adjacentes. Assim há uma maior liberdade para o estabelecimento do ciclo da interseção em estudo, permitindo um plano otimizado para a mesma, tendo em vista que tomará como base apenas os volumes de tráfego dessa interseção.
- Semáforos em rede: Nessa situação os semáforos das interseções são programados de modo a minimizar o atraso da rede como um todo, mesmo que para isso as interseções, isoladamente, não estejam otimizadas. Para tanto, os semáforos são sincronizados, e isso pode ser feito tanto para uma rede aberta (controle arterial de cruzamento – corredores de tráfego), quanto para uma rede fechada (controle por área).

1.3.1 Sistemas de tempo fixo

De acordo com DNIT (2006, p. 25), volume de tráfego representa o “número de veículos que passam por uma seção de uma via, ou de uma determinada faixa, durante uma unidade de tempo”. Usualmente os volumes de tráfego apresentam um comportamento cíclico, obedecendo a um padrão aproximadamente constante para cada hora do dia ao longo da semana (figura 7).

Figura 7 – Comportamento dos volumes de tráfego ao longo dos dias da semana



Fonte: Produção do próprio autor.

Normalmente os volumes de tráfego apresentam um comportamento semelhante ao longo dos dias úteis (segunda-feira a sexta-feira), com uma atenção especial para a segunda-feira e a sexta-feira, que podem sofrer algumas variações. Assim, a semelhança é maior nos chamados dias típicos (terça-feira, quarta-feira e quinta-feira). Já no sábado e no domingo, há uma considerável diferença nos padrões de tráfego. Para essas situações há equipamentos capazes de estabelecer um plano semafórico, de tempo fixo, para cada período do dia, fazendo com que as indicações luminosas mudem em função dos padrões do tráfego de cada um desses períodos.

Vale lembrar que há outros fatores que podem interferir nesses padrões, tais como, a sazonalidade (há períodos do ano nos quais esses padrões podem ser influenciados pelo clima, pelas férias escolares, etc.) e as características locais (há cidades turísticas onde os volumes críticos pode ser encontrados nos finais de semana e feriados, e não nos dias úteis, por exemplo), e todos esses fatores devem ser considerados.

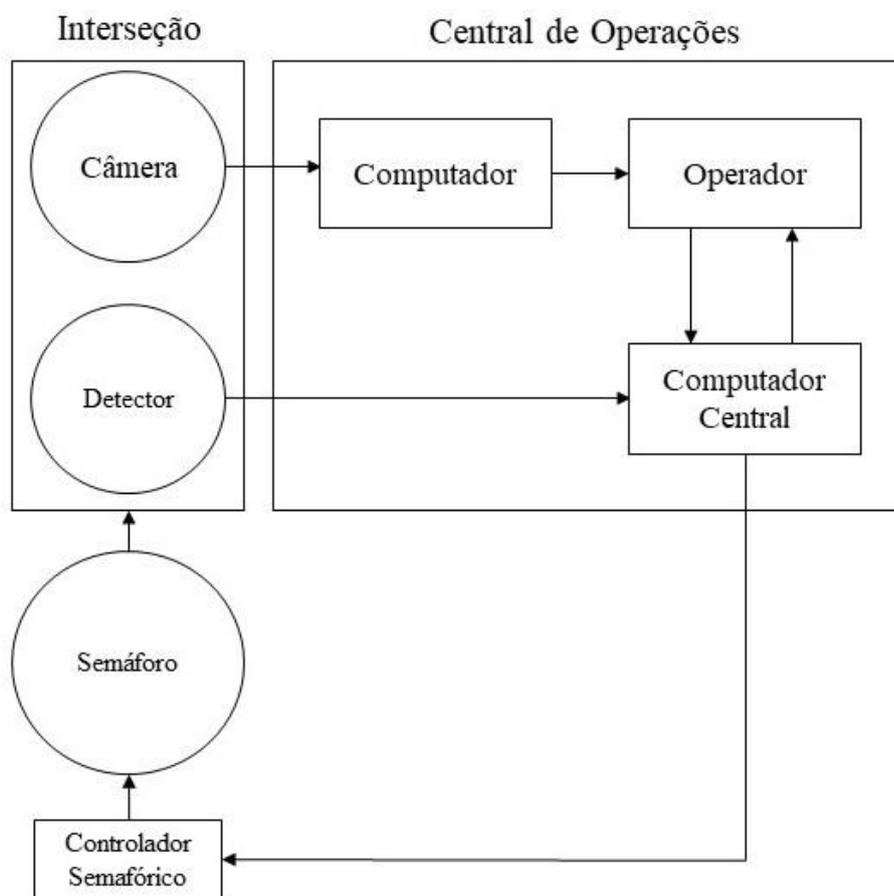
1.3.2 Sistemas atuados pelo tráfego

Os sistemas atuados pelo tráfego, trabalham com equipamentos capazes de detectar os veículos e, com base nos volumes de tráfego medidos, estabelecer automaticamente o plano semafórico da interseção. São indicados em situações onde o comportamento do tráfego não obedece a um padrão, isto é, não é cíclico, ou quando os volumes são muito baixos, aumentando o grau de aleatoriedade das chegadas de veículos na interseção.

1.3.3 Sistemas centralizados de controle por computador

Nesse sistema, os equipamentos (controladores e detectores) são interligados a um computador localizado em uma central de controle, onde pode haver um sistema fechado de TV com câmeras convenientemente posicionadas nos principais corredores de tráfego da área controlada, conforme ilustração da figura 8.

Figura 8 - Sistema centralizado de controle por computador



Fonte: Produção do próprio autor.

CAPÍTULO 02

CONCEITOS E DEFINIÇÕES

2.1 Semáforo

O semáforo é um dispositivo de controle de tráfego que, por meio de indicações luminosas, alterna o direito de passagem de veículos e/ou pedestres em interseções de duas ou mais vias. Os semáforos podem ser de dois tipos, semáforo veicular ou semáforo de pedestres, e as normas NBR 7995 (ABNT, 2013) e NBR 15889 (ABNT, 2019) estabelecem as especificações técnicas desses aparelhos.

2.1.1 Semáforo veicular

É composto por três focos de luz nas cores verde, amarela e vermelha, padronizadas internacionalmente e no Código de Trânsito Brasileiro (DENATRAN, 2008).

- Verde: indica que o motorista pode seguir em frente, virar à esquerda ou à direita (desde que não seja impedido pela autoridade legal), devendo, no entanto, ceder o direito de passagem aos veículos e/ou pedestres que se encontrem legalmente na área da interseção;
- Amarelo: significa “atenção” e indica que o motorista deve parar o veículo, antes de entrar na interseção, e permanecer parado até receber o direito de passagem (por meio da luz verde, ou da intervenção da autoridade legal). Mas, deve seguir em frente e atravessar a interseção, caso não seja possível parar sem colocar em risco a segurança do tráfego. Para tanto, o tempo de amarelo deve ser suficiente para que o motorista possa tomar a decisão correta;
- Vermelho: O motorista deve parar o veículo antes de entrar na interseção, e permanecer parado até receber o direito de passagem (por meio da luz verde ou da intervenção da autoridade legal).

2.1.2 Semáforo de pedestres

É composto por dois focos de luz, uma verde e outra vermelha, cujos significados seguem o mesmo padrão dos semáforos veiculares, sendo que cada foco, usualmente, apresenta uma máscara com representação de uma pessoa nas condições de movimento (cor verde) e de espera (cor vermelha).

- Verde fixo: o pedestre pode atravessar a via, mas cedendo o direito de passagem àqueles veículos que se encontram legalmente na área da interseção;
- Vermelho intermitente: indica que o pedestre que já iniciou a travessia deve terminá-la, e que o pedestre que ainda não a iniciou deve esperar até receber a próxima indicação luminosa verde;
- Vermelho: o pedestre deve parar antes de atravessar a via, e permanecer assim até receber o direito de passagem por meio da luz verde, ou da intervenção da autoridade legal;

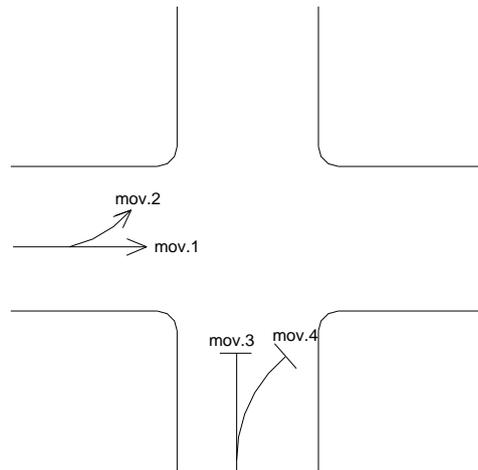
2.2 Movimento

O termo “movimento” é usado para identificar as correntes de tráfego, isto é, a direção e o sentido (origem e destino) de veículos e/ou pedestres. Sua representação gráfica é feita por meio de um traço (indicando a direção) e uma seta (indicando o sentido), conforme ilustra a figura 9. A representação de um movimento interrompido é feita por meio de um traço com uma barra transversal em sua extremidade (figura 9). Quando dois movimentos se cruzam em uma interseção, são chamados de movimentos conflitantes, quando possuem origens diferentes e mesmo destino, movimentos convergentes, e quando possuem mesma origem, mas destinos diferentes, movimentos divergentes.

As correntes de tráfego são definidas como duas ou mais faixas adjacentes controladas pelo mesmo semáforo e tal que o tráfego possa escolher qualquer uma

dessas faixas e se comportar como se fosse uma fila única, ou uma única faixa de tráfego com movimentos diferentes das faixas adjacentes.

Figura 9 – Movimentos (correntes de tráfego)

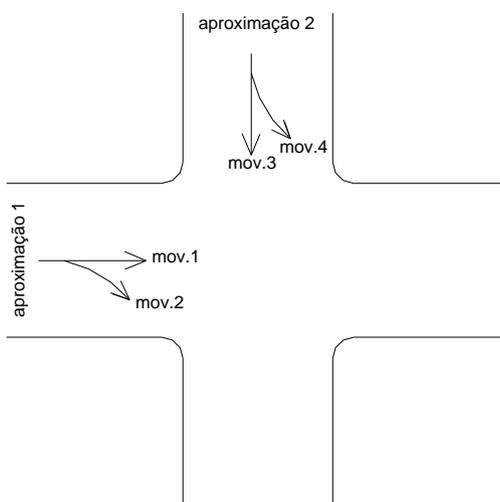


Fonte: Produção do próprio autor.

2.3 Aproximação

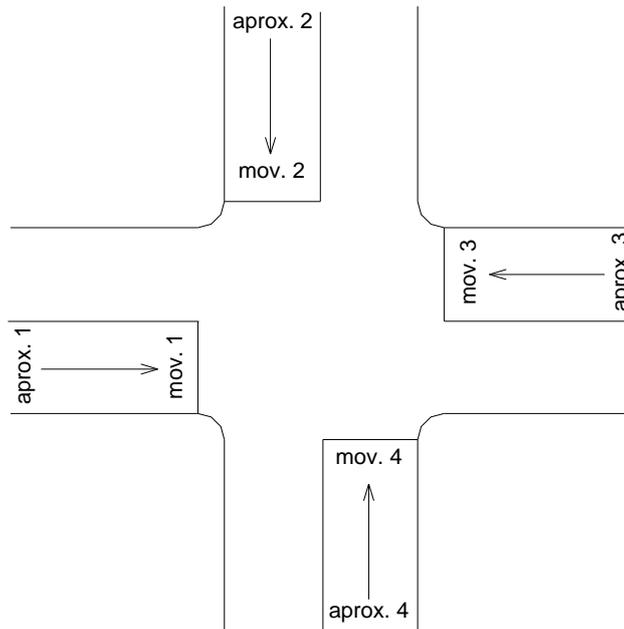
Aproximação é o nome dado a uma faixa que conduz à interseção. Assim, os exemplos das figuras 10 e 11 ilustram as aproximações em uma interseção de duas vias de mão única e em outra de duas vias de mão dupla, respectivamente.

Figura 10 – Aproximações em uma interseção com duas vias de mão única



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 11 – Aproximações em uma interseção com duas vias de mão dupla

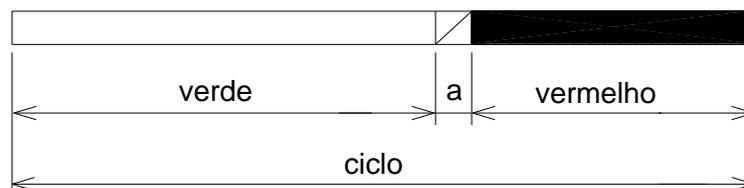


Fonte: Produção do próprio autor.

2.4 Ciclo (c)

O ciclo representa o tempo total, em segundos, de uma sequência ordenada dos tempos de VERDE, AMARELO e VERMELHO, em uma interseção (Figura 12).

Figura 12 – Tempo de ciclo de uma interseção



Convenções: verde
 amarelo
 vermelho

Fonte: Produção do próprio autor.

O tempo de ciclo de uma interseção é considerado ótimo quando se obtém um equilíbrio entre a demanda e o atendimento, evitando-se o congestionamento.

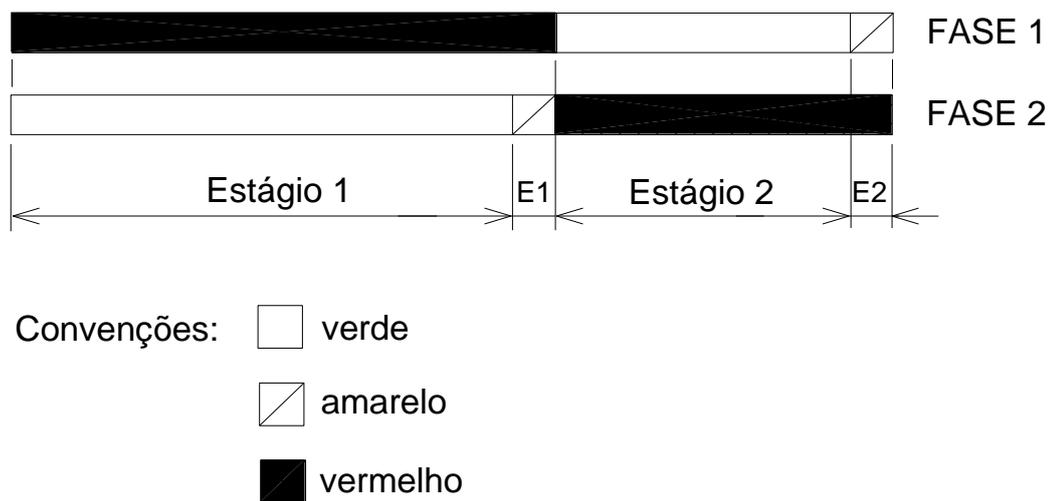
2.5 Fase

É o nome dado à sequência de indicações luminosas (cores) de um semáforo, aplicada a uma ou mais correntes de tráfego, ou movimentos (figura 13).

2.6 Estágio

Estágio ou intervalo é o nome dado à parte do tempo do ciclo durante a qual as indicações luminosas dos semáforos de uma interseção não mudam, e uma ou mais correntes de tráfego e/ou de pedestres recebem o direito de passagem (figura 13).

Figura 13 – Fases e estágios de um semáforo



Fonte: Produção do próprio autor.

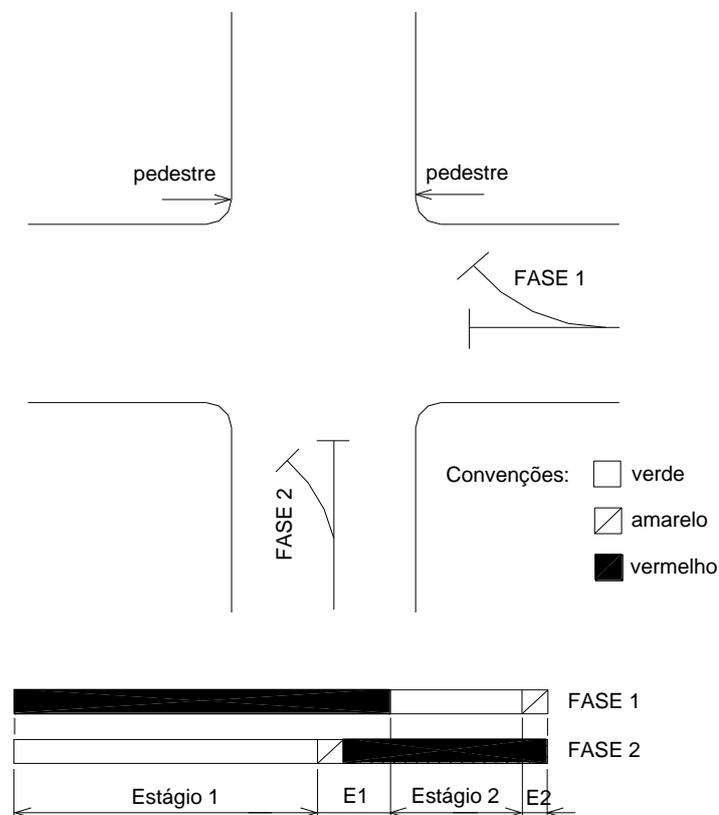
2.7 Entreverdes (e)

O período de entreverdes (CET-SP, 2019; DENATRAN, 1984), termo derivado do inglês *Intergreen* (TRB, 2000), representa o intervalo de tempo compreendido entre o fim do período de verde de uma fase (que está perdendo o direito de passagem), e o início do período de verde da outra fase (que está ganhando o direito de passagem).

Usualmente esse período é igual ao tempo de amarelo, mas em algumas situações, como por exemplo, em um “giro bloqueado”, o entreverdes pode ser maior que o tempo de amarelo ocasionando um período de “vermelho total” (ou vermelho

geral), onde todas as correntes de tráfego recebem a indicação luminosa vermelha ao mesmo tempo, permitindo a travessia dos pedestres (figura 14). Vale observar que o vermelho total (período de entreverdes subtraído do período de amarelo) também pode ser conveniente em cruzamentos com grande número de acidentes, tendo em vista que fornece um tempo extra para o escoamento dos veículos (ou pedestres) na interseção, ou daqueles veículos que eventualmente tenham avançado no início sinal vermelho.

Figura 14 – Giro bloqueado

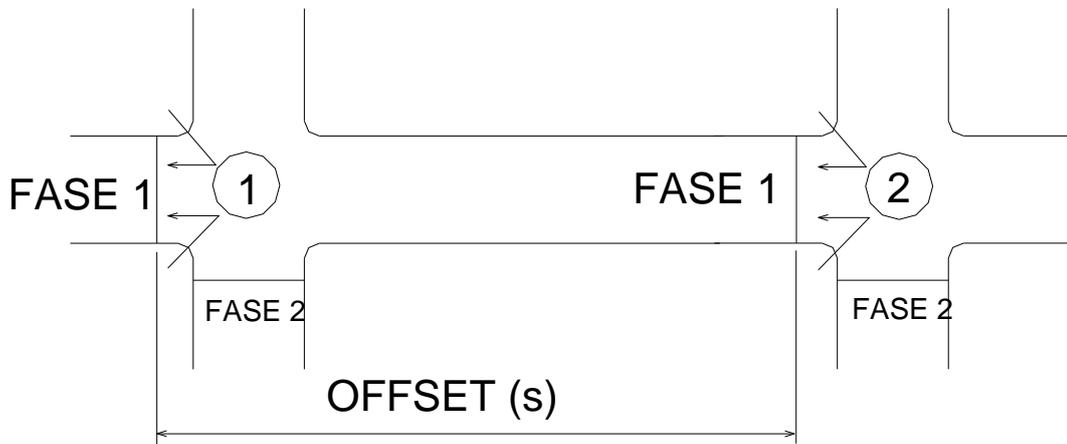


Fonte: Produção do próprio autor.

2.8 Defasagem

Defasagem, ou offset, representa a diferença, em segundos, ou % do comprimento do ciclo, entre os instantes de acionamento da indicação verde dos semáforos de dois cruzamentos consecutivos (figura 15).

Figura 15 - Defasagem



Fonte: Produção do próprio autor.

2.9 Fluxo de saturação

O fluxo de saturação (S), representa a capacidade máxima de escoamento da via em regime ininterrupto, como se o semáforo estivesse constantemente com a luz verde.

2.10 Capacidade da interseção

É o número máximo de veículos que consegue atravessar a interseção durante um determinado intervalo de tempo.

2.11 Grau de saturação

Grau de saturação (X) é o nome dado à relação entre a demanda de tráfego e a capacidade de uma aproximação.

2.12 Tempo perdido

Com os devidos cuidados os veículos podem atravessar a interseção durante o período de amarelo, de tal forma que o tempo total disponível para o escoamento do tráfego, compreende, além do tempo de verde, o tempo de amarelo. Mas, o efeito de reação/aceleração, no início do período de verde (provocando atrasos iniciais), e o efeito da desaceleração durante o período de amarelo, provocam, na prática, uma perda desse tempo total disponível para a travessia. Assim, tempo perdido é o nome dado ao tempo que se perde em face desses efeitos.

2.12 Verde efetivo

É o período de verde necessário para escoar os veículos da fase de uma interseção.

2.14 Verde real

É o período de verde corrigido do tempo perdido, ou seja, é o tempo de verde real do semáforo.

CAPÍTULO 03

PLANOS SEMÁFORICOS ISOLADOS

3.1 Considerações gerais

O objetivo dos semáforos é coordenar o tráfego em um sistema viário, no sentido de proporcionar maior fluidez e segurança. Calcular um plano semaforico consiste, basicamente, em:

- Determinar o tempo de ciclo ótimo da interseção;
- Calcular os tempos de verde necessários para cada fase, em função do ciclo ótimo adotado;
- Calcular as defasagens entre os semáforos adjacentes, se necessário.

Assim, o plano semaforico de uma interseção procura estabelecer uma regulagem do semáforo, capaz a minimizar os atrasos dos veículos. Neste capítulo são vistas as técnicas relativas à operação de interseções em tempo fixo e no modo isolado. Nesse sentido, o método aqui adotado para o cálculo dos planos semaforicos é o Método de Webster (Webster e Cobbe, 1966), tendo em vista ser completo e detalhado, e por possibilitar a determinação dos tempos de verde e do comprimento do ciclo, capazes de proporcionar o menor atraso geral possível na interseção. Também é utilizado como base teórica dos conceitos e procedimentos aqui apresentados, o manual de sinalização semaforica da Companhia de Engenharia de Tráfego da cidade de São Paulo (CET-SP, 2001).

3.2 Variáveis do problema

No processo de cálculo de planos semaforicos, são consideradas as seguintes variáveis:

- Fluxo de saturação;
- Capacidade de uma aproximação;
- Tempo perdido total no cruzamento durante um ciclo;
- Taxa de ocupação de uma aproximação;
- Grau de saturação de uma aproximação;
- Taxa de ocupação do cruzamento;
- Tempo de ciclo mínimo;
- Tempo de ciclo ótimo.

3.2.1 Fluxo de saturação

O fluxo de saturação corresponde à capacidade máxima de escoamento de uma via em regime ininterrupto, e é calculado por meio da fórmula de Webster (equação 1).

$$S=525L \quad (1)$$

Onde: L = largura (útil) da aproximação (m);

S = fluxo de saturação em UCP (unidade de carros de passeio) por hora de tempo verde (V_{eq}/htv).

Essa fórmula toma como referência uma aproximação padrão, onde todas as condições de operação são ideais, isto é, não sofrem interferências de fatores externos, tais como, movimentos de conversão à esquerda, veículos estacionados ao longo da via, etc. Assim, é necessário o uso de alguns fatores de ajustamento capazes de adaptar essa fórmula, que foi desenvolvida para condições ideais, às situações reais do local em estudo. Esses fatores são descritos nas seções de 3.2.1.1 a 3.2.1.5.

3.2.1.1 Composição do tráfego

Uma das condições ideais, para as quais foi desenvolvida a fórmula de Webster, é a existência de apenas carros de passeio (veículos leves) no volume de tráfego, o que não ocorre na prática. Portanto, para converter os vários tipos de veículos em carros de passeio, é necessário que se apliquem os fatores de equivalência da tabela 5 (DENATRAN, 2014).

Tabela 5 - Fatores de equivalência de veículos

Tipo de veículo	Fator de equivalência (V_{eq})
Carro de passeio	1,00
Ônibus	2,00
Caminhão (2 eixos)	2,00
Caminhão (3 eixos)	3,00
Motocicleta	0,33

Fonte: DENATRAN (2014).

A tabela 5 apresenta os valores de equivalência usuais, e não contempla vários outros tipos, tais como, bicicletas, bondes, ônibus articulados e carretas. Para essas situações, o DENATRAN (2014) recomenda que tais pesos sejam estabelecidos por meio de estudos específicos. Há ainda a tabela 6 (DENATRAN, 1984), que, embora mais antiga e com alguns valores diferentes, apresenta mais tipos de veículos.

Tabela 6 - Fatores de equivalência de veículos

Tipo de veículo	Fator de equivalência (V_{eq})
Carro de passeio	1,00
Ônibus	2,25
Caminhão médio ou pesado	1,75
Caminhão leve	1,00
Caminhão conjugado (carreta)	2,50
Motocicleta	0,33
Bicicleta	0,20
Bonde	2,60

Fonte: DENATRAN (1984).

3.2.1.2 Declividade

O efeito da declividade (equação 2) altera o escoamento do fluxo de tráfego da seguinte maneira:

- Subida → S sofre uma redução de 3 % a cada 1 % de subida;
- Descida → S sofre um aumento de 3 % a cada 1 % de descida.

$$i = \frac{DV}{DH} \times 100 \quad (2)$$

Onde: i – declividade (%);

DV – Desnível vertical;

DH – Distância horizontal.

3.2.1.3. Conversão

3.2.1.3.1 Efeito da conversão à esquerda

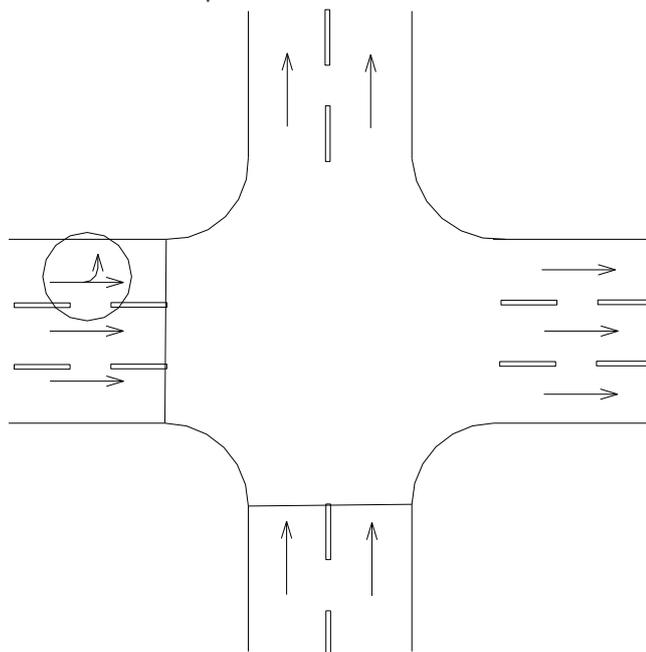
A conversão à esquerda afeta o fluxo de saturação tendo em vista que o veículo, que vai virar à esquerda, reduz a velocidade antes dessa conversão fazendo com que os veículos que vão seguir em frente também tenham que reduzir suas velocidades. Assim, além do risco de acidentes, há uma diminuição da capacidade da rodovia.

Em algumas situações há ainda a necessidade uma faixa de tráfego e/ou uma fase exclusiva para os veículos que dobram à esquerda, diminuindo assim a capacidade da via. Esse efeito é ainda sentido quando há tráfego oposto (vias de mão dupla). O cálculo dessa influência da conversão à esquerda sobre o fluxo de saturação foi desenvolvido por Webster, e é feito por meio de um coeficiente de equivalência com os veículos que seguem em frente, levando em conta o tipo de conversão à esquerda.

- Sem faixa exclusiva e sem tráfego oposto

O movimento de conversão não influi no fluxo de saturação (figura 16).

Figura 16 – Conversão à esquerda sem faixa exclusiva e sem tráfego oposto



Fonte: Produção do próprio autor.

- Com faixa exclusiva, mas sem tráfego oposto (figura 17)

O efeito sobre o fluxo de saturação é calculado da seguinte forma (equações 3 e 4):

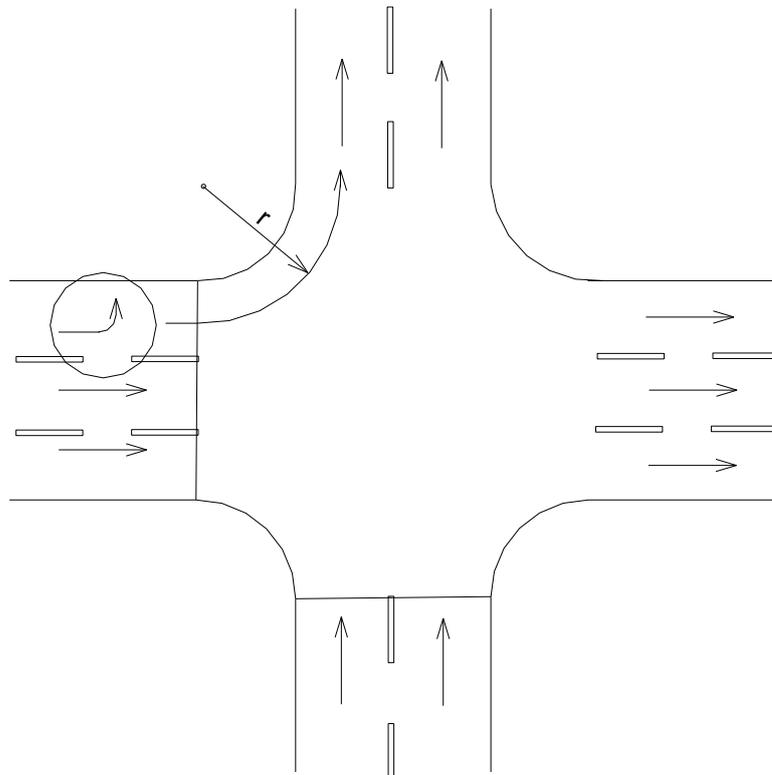
Para fila única:
$$S = \frac{1800}{1 + \frac{1,52}{r}} \quad (3)$$

Para fila dupla:
$$S = \frac{3000}{1 + \frac{1,52}{r}} \quad (4)$$

Onde: S – fluxo de saturação (v_{eq}/htv)

r – raio de curvatura do movimento (m)

Figura 17 - Conversão à esquerda com faixa exclusiva e sem tráfego oposto



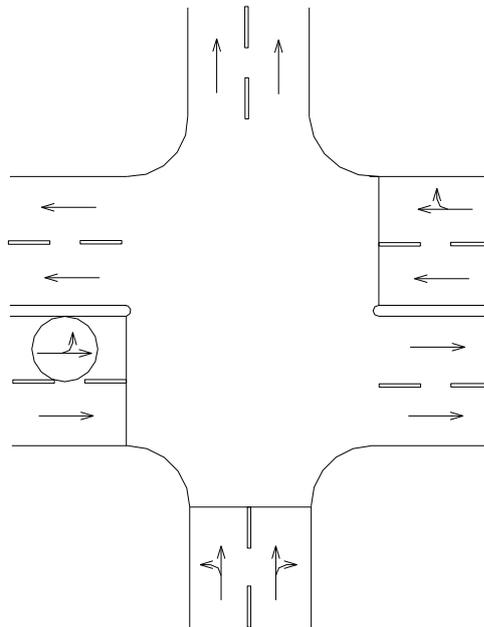
Fonte: Produção do próprio autor.

- Sem faixa exclusiva e com tráfego oposto

Essa representa a pior situação, pois a conversão à esquerda causa atrasos aos veículos que desejam seguir em frente, inibindo o uso dessa faixa por esses veículos (figura 18). Outro problema é que os veículos que desejam dobrar à esquerda e permanecem na interseção no final do verde, retardam o início do verde da fase da via transversal. Levando-se em conta apenas o primeiro efeito, o cálculo do veículo equivalente é feito da seguinte maneira:

Cada veículo que vira à esquerda = 1,75 veículo que segue em frente

Figura 18 - Conversão à esquerda sem faixa exclusiva e com tráfego oposto



Fonte: Produção do próprio autor.

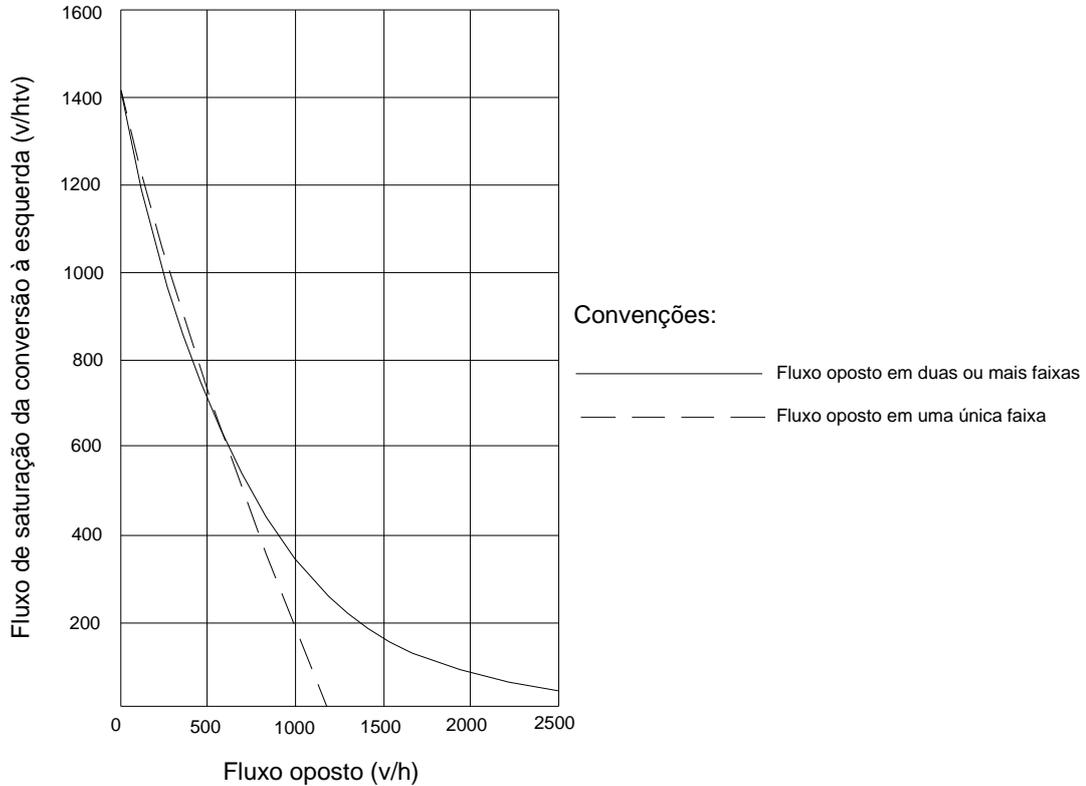
No entanto, para o segundo efeito, onde sobram veículos no final do verde, deve-se adotar o seguinte procedimento:

- Determinar a demanda média de conversão à esquerda, por ciclo (equação 5).

$$N = \frac{\text{veíc./h}}{\text{ciclos/h}} \quad (5)$$

- ii. Determinar o fluxo de saturação de conversão à esquerda (S_{ce}), por meio da demanda horária e do gráfico da figura 19.

Figura 19 - Conversão à esquerda sem faixa exclusiva e com tráfego oposto



Fonte: Produção do próprio autor.

- iii. Transformar esse valor (S_{ce}) no número máximo de veículos capaz de dobrar à esquerda, por ciclo (N_{ce}), por meio da equação 6.

$$N_{ce} = S_{ce} \left(\frac{g_{ef} - q_{fo}C}{S_{fo} - g_{fo}} \right) \quad (6)$$

Onde: N_{ce} – número máximo de veículos que fazem a conversão à esquerda, por ciclo;

S_{ce} – fluxo de saturação de conversão à esquerda (veíc./s);

g_{ef} – tempo de verde efetivo dedicado ao fluxo oposto (s);

q_{fo} – demanda do fluxo oposto (veíc./h);

S_{fo} – saturação do fluxo oposto (veíc./htv);

C – tempo de ciclo (s).

- iv. Caso $N \leq N_{ce}$, o movimento à esquerda é acomodado pelas condições presentes, e não há nada a modificar;

Caso $N > N_{ce}$, sobram veículos que não conseguiram dobrar à esquerda e é necessário reestudar o problema, calculando-se quantos veículos restaram:

$$N_r = N - N_{ce} \quad (7)$$

Onde: N_r – número de veículos que não conseguiram realizar o movimento de conversão em um ciclo;

N – número médio de veículos que desejam realizar a conversão;

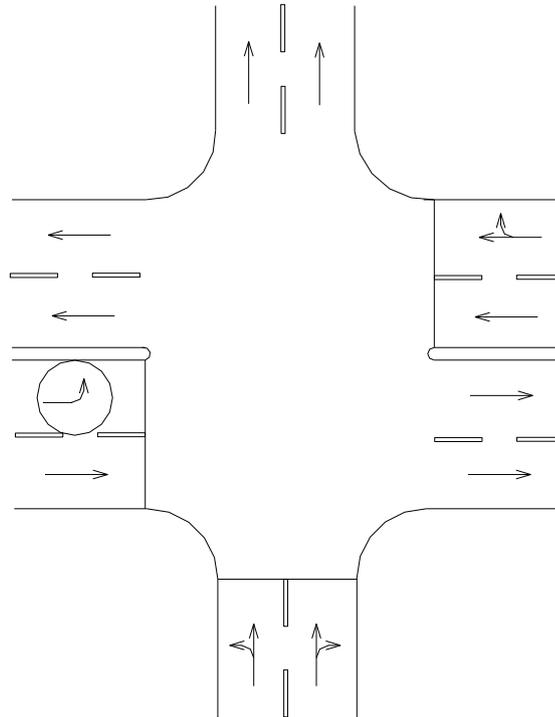
N_{ce} – número máximo de veículos que podem realizar a conversão.

O tempo necessário para o escoamento de todos os veículos retidos, é de $2,5N_r$ (s), tendo em vista que, segundo estudos do DENATRAN, cada veículo leva em média 2,5 segundos para dobrar à esquerda. Esse tempo pode ser fornecido por meio de um vermelho total.

- Com faixa exclusiva e com tráfego oposto

Nessa situação os veículos que seguem em frente não sofrem atrasos, mas assim como no caso anterior continua ocorrendo um retardamento do início do verde da fase da via transversal, devido aos veículos que permanecem na interseção no final do verde tentando dobrar à esquerda (figura 20), e o procedimento adotado deve ser o mesmo visto para essa situação.

Figura 20 - Conversão à esquerda com faixa exclusiva e com tráfego oposto



Fonte: Produção do próprio autor.

3.2.1.3.2 Efeito da conversão à direita

Na fórmula do fluxo de saturação está implícito que uma porcentagem de 10% do fluxo de veículos dobra à direita. Portanto, o efeito da conversão à direita sobre o fluxo de saturação só é considerado quando o número de veículos dobrando à direita, representar mais de 10% do fluxo total. Para o ajuste do fluxo de saturação, deve-se considerar que cada veículo que dobra à direita, acima dos 10%, equivale a 1,25 veículo que segue em frente.

3.2.1.4 Veículos estacionados

O efeito causado pelos veículos estacionados é a perda da largura da via (figura 21), o que afeta o fluxo de saturação das equações 8 e 9. Deve-se observar que, na equação 8, quando a distância entre a linha de parada e o primeiro veículo estacionado for menor que 7,6m, deve-se adotar um $z=7,6m$, e caso o valor do p calculado seja negativo, deve-se considerar $p=0$ (não há perda de largura).

$$p = 1,68 - 0,9 \left(\frac{z - 7,6}{g} \right) \quad (8)$$

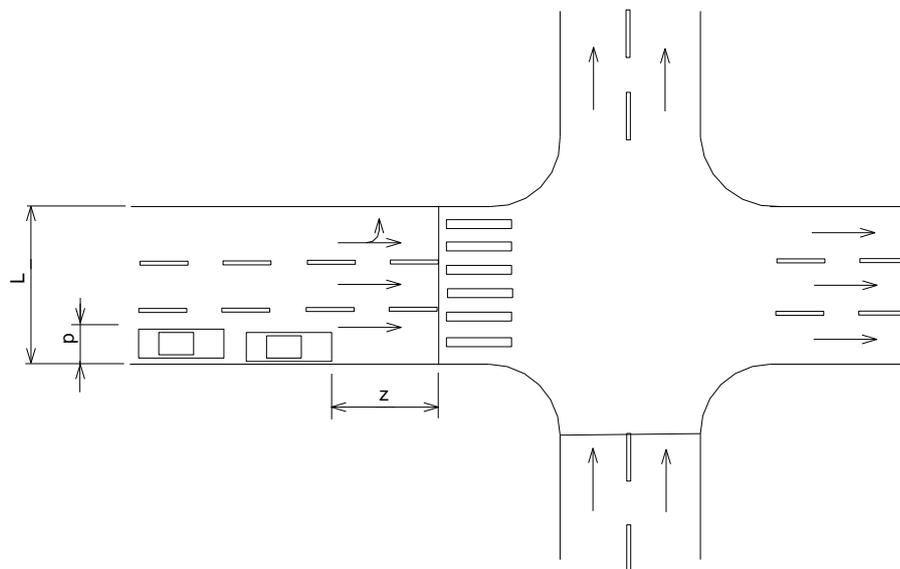
$$S = 525(L - p) \quad (9)$$

Onde: p – perda de largura (m);

z – distância entre a linha de retenção e o primeiro veículo estacionado (m);

g – tempo de verde (s).

Figura 21 – Conversão à direita com veículos estacionados



Fonte: Produção do próprio autor.

3.2.1.5 Localização

O ambiente no entorno da via também afeta o fluxo de saturação, embora de um modo mais sutil. Esse efeito pode ser corrigido por meio dos seguintes fatores de ajustamento:

$f_{aj} = 1,25$ → área com pouca interferência de pedestres;

$f_{aj} = 1,00$ → área com média intensidade de pedestre;

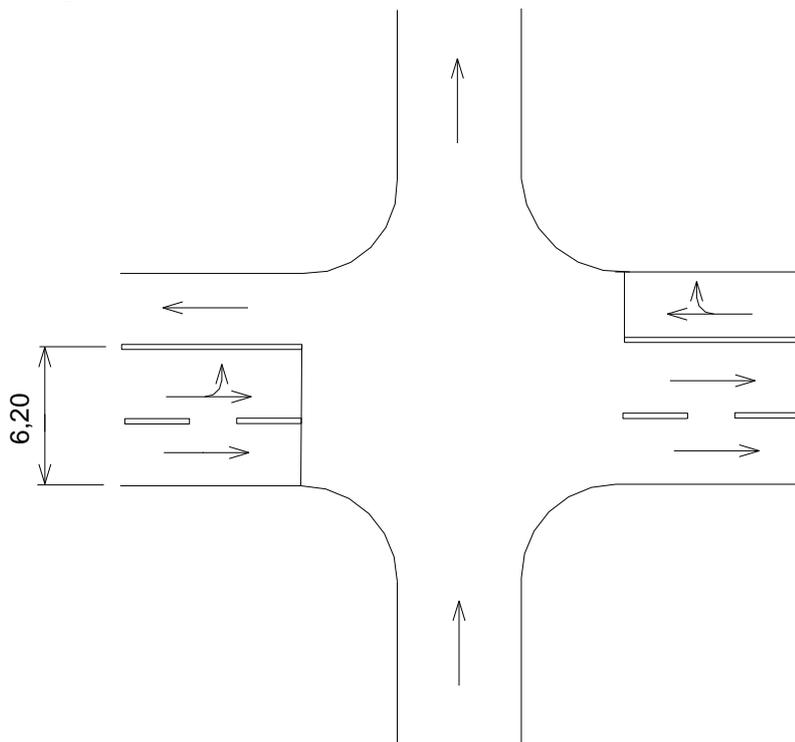
$f_{aj} = 0,85 \rightarrow$ área com muita intensidade de pedestre.

Exemplo 3:

Dada a interseção da figura 22, calcular o fluxo de saturação pelo método de Webster, considerando-se que:

- O tráfego é composto por 72 % de carros de passeio, 15 % de ônibus, 10 % de caminhões médios ou pesados, e 3 % de motos;
- Há uma rampa de subida de 3 %;
- 20 % do fluxo dobra à esquerda, sem faixa exclusiva, e sem veículos retidos ao final do tempo de verde;
- 9 % do fluxo dobra à direita; os veículos estão estacionados a 20m da linha de parada;
- O tempo de verde medido em campo é de 30 segundos; e,
- A via se encontra em uma área central com intenso movimento de pedestres.

Figura 22 – Efeito dos fatores de ajustamento sobre o Fluxo de Saturação



Fonte: Produção do próprio autor.

Solução:

$$S_{\text{padrão}} = 525 \text{ L}$$

$$S_{\text{padrão}} = 525 \times 6,20$$

$$S_{\text{padrão}} = \mathbf{3.255 V_{eq}/htv}$$

Esse é o fluxo de saturação para condições ideais, o qual deve ser adaptado às condições reais da interseção em estudo, aplicando-se os fatores de ajustamento.

- Fator de ajustamento para efeito da composição do tráfego e cálculo dos veículos equivalentes (tabela 7):

Tabela 7 – Veículos equivalentes

veículo	%		f_{eq}		V_{eq}
Carro de passeio	72	X	1,00	=	72,00
Ônibus	15	X	2,25	=	33,75
Caminhão	10	X	1,75	=	17,50
Motocicleta	3	X	0,33	=	1,00
Total	100		→		124,25

Fonte: Produção do próprio autor.

O resultado mostra que cada 100 veículos (indistintos) na corrente de tráfego equivalem a 124,25 carros de passeio (veículos equivalentes). Portanto, o fator de correção é:

$$f_{aj} = \frac{100}{124,25} = 0,80$$

- Fator de ajustamento para efeito da declividade:

Tendo em vista que para cada 1 % de subida, há uma redução de 3 % no fluxo de saturação, e que a rampa da via em estudo é de 3 %, tem-se uma redução de 9 % no fluxo de saturação. Assim:

$$f_{aj} = 0,91$$

- Fator de ajustamento para efeito da conversão à direita:

Sendo o volume de veículos dobrando à direita inferior a 10% do volume total, o fluxo de saturação não é afetado por esses veículos.

- Fator de ajustamento para efeito da conversão à esquerda:

Tendo em vista que se tem uma situação onde não há faixa especial e há tráfego oposto, mas não há veículos retidos na interseção ao final do tempo de verde, deve-se considerar que cada veículo que dobra à esquerda equivale a 1,75 veículo que segue em frente. Portanto, de cada 100 veículos da aproximação, 20 dobram à esquerda e, dessa maneira, equivalem a 35 veículos que seguem em frente ($20 \times 1,75$), representando um acréscimo de 15 veículos ($35 - 20$) sobre o total de 100. Assim, o fator de ajustamento será:

$$f_{aj} = \frac{100}{115} = 0,87$$

- Fator de ajustamento para efeito de veículos estacionados na via:

Como os veículos estacionados na via estão a 20m da linha de parada:

$$p = 1,68 - 0,9 \left(\frac{20 - 7,6}{30} \right) = 1,31$$

Portando, a largura útil da aproximação é:

$$L_{\text{útil}} = 6,20 - 1,31 = 4,89m$$

- Fator de ajustamento para efeito da localização:

$$f_{aj} = 0,85 \text{ (área com muita intensidade de pedestre).}$$

Deste modo, o fluxo de saturação corrigido será:

$$S = 525 \times (6,20 - 1,31) \times 0,80 \times 0,91 \times 0,87 \times 0,85 = 1382,09 V_{eq}/htv$$

3.2.2 Capacidade de uma aproximação

A capacidade de uma aproximação sinalizada é definida como sendo o número máximo de veículos capazes de atravessar o cruzamento durante um período de tempo, e é calculada por meio da equação 10:

$$Cap = S \times \frac{g_{ef}}{C} \quad (10)$$

Onde: Cap – capacidade (% do fluxo de saturação);

S – fluxo de saturação em UCP (unidade de carros de passeio) por hora de tempo verde (V_{eq}/htv);

g_{ef} – tempo de verde efetivo (s);

C – tempo de ciclo (s).

3.2.3 Tempo perdido (tempo morto)

Conforme visto anteriormente, é o tempo que se perde devido aos efeitos de reação/aceleração no início do período de verde (atrasos iniciais) e desaceleração no período de amarelo, em cada fase (equação 11).

$$I = (g + t_a) - g_{ef} \quad (11)$$

Onde: I – tempo perdido numa fase (s);

g – tempo de verde real (s);

t_a – tempo de amarelo (s);

g_{ef} – tempo de verde efetivo (s).

3.2.4 Tempo perdido total

O tempo perdido total de uma interseção representa a soma dos tempos perdidos para cada uma de suas fases durante um ciclo (equação 12).

$$T_p = \sum_{i=1}^n I_i + \sum_{i=1}^n (E - t_a)_i \quad (12)$$

Onde: T_p – tempo perdido total do cruzamento, por ciclo (s);

n – número de fases da aproximação;

E – período de entreverdes, em segundos, definido como o tempo entre o fim do período de verde de uma fase que está perdendo o direito de passagem e o início de outra que o está ganhando; o número de períodos entreverdes é igual ao número de fases da interseção, e o seu dimensionamento em situações mais complexas pode usar como base o manual da CET-SP (2010);

I_i – tempo perdido da fase i , em segundos;

t_{a_i} – tempo de amarelo da fase i .

O segundo termo da equação 12 só existe quando há vermelho total, ou seja, quando o período de entreverdes é maior que o tempo de amarelo.

3.2.5 Taxa de ocupação de uma aproximação

A taxa de ocupação (y) de uma aproximação é definida como sendo a relação entre a demanda de tráfego e o fluxo de saturação (equação 13).

$$y_i = \frac{q_i}{S_i} \quad (13)$$

Onde: y_i – taxa de ocupação da aproximação i (medida absoluta);

q_i – demanda (fluxo horário) da aproximação i (V_{eq}/h);

S_i – fluxo de saturação da aproximação i (V_{eq}/htv).

3.2.6 Grau de saturação

É a relação entre a demanda de tráfego e a capacidade de atendimento de uma aproximação (equação 14).

$$X_i = \frac{q_i}{cap._i} = \frac{q_i}{\frac{S_i \times g_{ef}}{C}} = \frac{y_i \times C}{g_{ef}} \quad (14)$$

Onde: X_i – grau de saturação da aproximação i ;

y_i – taxa de ocupação da aproximação i (medida absoluta);

q_i – demanda (fluxo horário) da aproximação i (V_{eq}/h);

S_i – fluxo de saturação da aproximação i (V_{eq}/htv);

C – tempo de ciclo do cruzamento (s);

g_{ef} – tempo de verde efetivo da fase associada ao movimento da aproximação (s).

3.2.7 Tempo de ciclo mínimo

Em uma determinada aproximação, apenas durante o período de verde da sua fase é que os veículos são escoados. Portanto, todos os veículos que chegam ao longo do ciclo devem ser escoados durante o período de verde, para que não haja fila acumulada de um ciclo para outro. Em outras palavras, a taxa de chegada deve ser menor ou igual à capacidade da aproximação (equação 15).

$$q_i \leq \frac{g_{ef_i} S_i}{C} \quad (15)$$

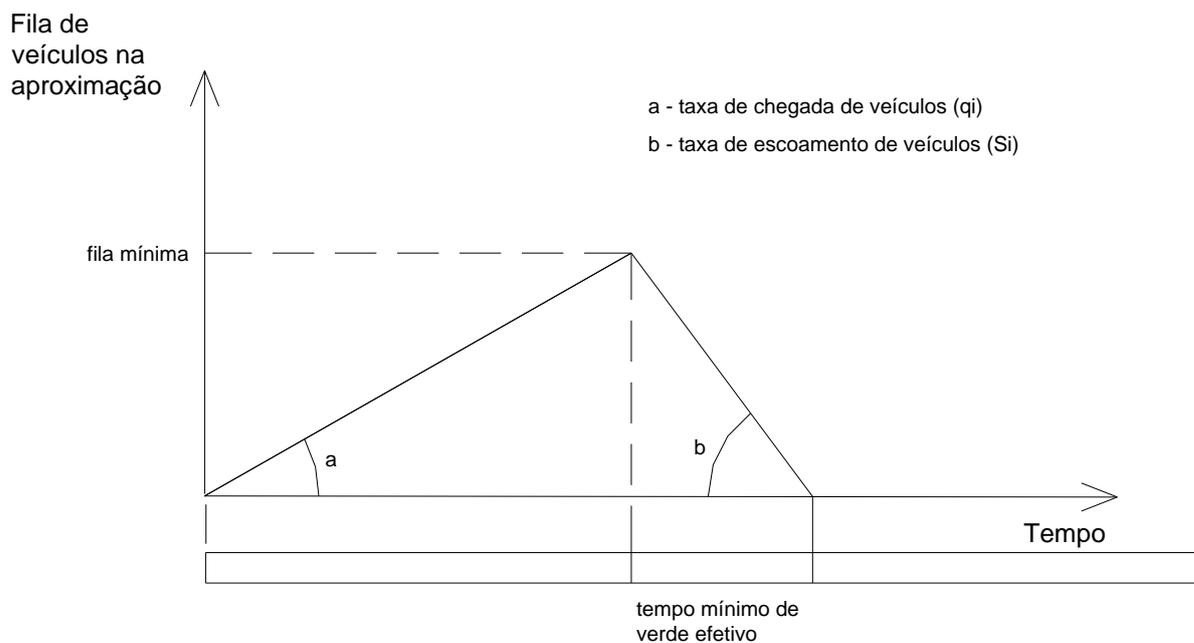
Quando essa taxa de chegada é igual à capacidade, o tempo de verde efetivo é mínimo, sendo apenas suficiente para escoar exatamente a demanda do ciclo (equação 16).

$$g_{ef_i}^{(min)} = y_i \times C \quad (16)$$

Onde: $g_{ef_i}^{(min)}$ – tempo de verde efetivo mínimo da fase associada à aproximação i (s).

A figura 23 mostra o tempo mínimo de verde efetivo, capaz de evitar o congestionamento da aproximação. Normalmente, durante um período de verde, há movimentos de tráfego em duas ou mais aproximações. Portanto, nessas situações o cálculo do ciclo mínimo deve levar em conta a taxa de ocupação da aproximação crítica (aproximação com maior valor de y).

Figura 23 - tempo mínimo de verde efetivo



Fonte: Produção do próprio autor.

Assim, tendo em vista que o tempo de ciclo resulta da soma dos tempos de verde efetivo de cada fase, mais o tempo perdido total da interseção, pode-se calcular o tempo de ciclo mínimo por meio das equações 17, 18 e 19.

$$C_{\min.} = \sum_{i=1}^n g_{efi}^{\min.} + T_p \quad (17)$$

$$C_{\min.} = \frac{T_p}{1 - Y} \quad (18)$$

$$Y = \sum_{i=1}^n y_{crit.}^{(i)} \quad (19)$$

Onde: $C_{\min.}$ – tempo de ciclo mínimo (s);

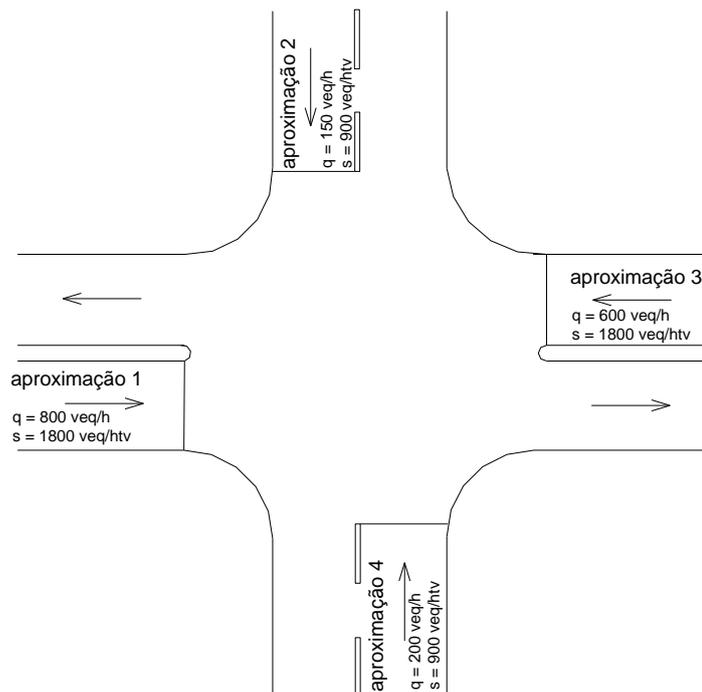
T_p – tempo perdido total (s);

n – número de fases do cruzamento;

Y – somatório das taxas de ocupação críticas de cada fase do cruzamento (equação 19).

Exemplo 4: Determinar o ciclo mínimo da interseção da figura 24, composta por duas vias de mão dupla com quatro aproximações, admitindo-se duas fases de operação, cada uma com um tempo perdido de 3 s

Figura 24 – Interseção-exemplo 4



Fonte: Produção do próprio autor.

Solução:

i. Cálculo da taxa de ocupação de cada aproximação:

$$y_1 = \frac{800}{1800} = 0,44$$

$$y_2 = \frac{150}{900} = 0,17$$

$$y_3 = \frac{600}{1800} = 0,33$$

$$y_4 = \frac{200}{900} = 0,22$$

ii. Determinação do y crítico e do Y total:

$$\text{Fase 1 (movimentos 1 e 3)} \quad \Rightarrow y_{\text{crít.}}^{(1)} = 0,44$$

$$\text{Fase 2 (movimentos 2 e 4)} \quad \Rightarrow y_{\text{crít.}}^{(2)} = 0,22$$

$$Y = y_{\text{crít.}}^{(1)} + y_{\text{crít.}}^{(2)} = 0,44 + 0,22 = 0,66$$

iii. Determinação do tempo perdido total:

$$T_p = l_1 + l_2 = 3 + 3 = 6 \text{ s}$$

iv. Cálculo do ciclo mínimo:

$$C_{\text{mín.}} = \frac{6}{1 - 0,66} = 17,65 \cong 18 \text{ seg.}$$

É importante observar que o cálculo do ciclo mínimo tem implícito em suas fórmulas que a taxa de chegada de veículos é uniforme e permanece inalterada durante os ciclos. Assim, com base no volume horário e no tempo de ciclo da interseção, é calculada a taxa de chegada média por ciclo. No entanto, na prática essa taxa de chegada é aleatória, fazendo com que os volumes médios em cada ciclo sejam diferentes.

O efeito dessa aleatoriedade sobre o ciclo mínimo é que em um determinado ciclo a taxa de chegada será um pouco menor que a média, para a qual o ciclo foi definido, provocando um tempo de verde ocioso. Em um outro ciclo essa taxa de chegada será um pouco maior que a média, originando uma fila excedente (fila aleatória), pois os últimos veículos não vão conseguir atravessar durante o tempo de verde, e permanecerão parados até o ciclo seguinte. O tempo perdido por esses veículos que não conseguem atravessar a interseção durante o primeiro o período de verde, e só o fazem no ciclo seguinte, é denominado atraso aleatório.

Estudos desenvolvidos com base na Teoria das Filas mostram que essa fila excedente cresce infinitamente, embora na prática isso não ocorra em virtude da reação dos motoristas que, vendo os congestionamentos, adotam rotas alternativas. No entanto não se deve trabalhar com o ciclo mínimo, mas sim com um ciclo tal que, seja um pouco maior que o ciclo mínimo (oferecendo uma folga capaz de extinguir o atraso aleatório), mas que também não seja além do necessário, pois caso isso aconteça haverá um período de verde ocioso para a aproximação em estudo, provocando um aumento do atraso dos veículos na aproximação conflitante, devido ao conseqüente aumento do período de vermelho (atraso uniforme), piorando o desempenho da interseção como um todo. Esse tempo de ciclo é chamado de ciclo ótimo.

3.2.8 Tempo de ciclo ótimo

Webster concluiu em seus trabalhos que, para efeito prático, a relação entre o atraso médio na interseção e o tempo de ciclo pode ser expressa em função apenas do tempo total perdido no ciclo (T_p), e do somatório das taxas de ocupação crítica (Y) do cruzamento. E mostrou que se pode obter uma aproximação ideal o suficiente para o valor do ciclo ótimo através da equação 20.

$$C_o = \frac{1,5 \times T_p + 5}{1 - Y} \quad (20)$$

Onde: C_o – tempo de ciclo ótimo (s);

T_p – tempo total perdido (s);

Y – somatório das taxas de ocupação críticas de cada fase do cruzamento (equação 19).

3.2.9 Atraso total

O atraso total de uma interseção resulta da soma dos atrasos uniformes e aleatórios de cada uma de suas fases, e é calculado por meio da equação 21, a seguir, desenvolvida por Webster a partir de simulações.

$$d = \frac{9}{10} \left[\frac{c(1-\lambda)^2}{2(1-\lambda X)} + \frac{X^2}{2q(1-X)} \right] \quad (21)$$

Onde: d – atraso médio por veículo em uma aproximação (s);

C – tempo de ciclo (s);

λ – relação entre o tempo de verde efetivo e o tempo de ciclo (g_{ef}/C);

X – grau de saturação ($q/Cap.$);

q – demanda (veíc./s).

3.2.10 Verde efetivo

Conhecendo-se o ciclo ótimo, parte-se para a determinação dos tempos necessários para o escoamento dos fluxos de veículos de cada aproximação, tempos de verde efetivo das fases da interseção. Em suas simulações, Webster descobriu que o atraso total de uma interseção, equação 21, é minimizado quando os tempos de verde efetivo do ciclo ótimo são proporcionais às taxas de ocupação crítica de suas respectivas fases, conforme mostra a equação 22.

$$g_{ef} = \frac{y_{crit.}^i}{Y} (C_o - Tp) \quad (22)$$

Onde: g_{ef}^i – tempo de verde efetivo da fase i (s);

C_o – tempo de ciclo ótimo (s);

$y_{crít.}^i$ – taxa de ocupação crítica da fase i ;

Y – somatório das taxas de ocupação crítica das fases da interseção;

T_p – tempo perdido total no ciclo (s).

3.2.11 Verde real

De posse dos tempos de verde efetivo de cada fase, determinam-se os tempos de verde real, os quais serão usados para regular os semáforos da interseção, por meio da equação 23.

$$g_i = g_{ef_i} + l_i - t_{a_i} \quad (23)$$

Onde: g_{ef_i} – tempo de verde efetivo da fase i (s);

g_i – tempo de verde real da fase i (s);

l_i – tempo perdido na fase i (s);

t_{a_i} – tempo de amarelo da fase i (s).

3.2.12 Comprimento da fila média

Para se conhecer a extensão da fila de veículos formada em uma aproximação durante o período de vermelho de um ciclo, e, assim, saber se a mesma vai ou não interferir em uma interseção próxima, podem-se usar as equações 24 e 25. O número médio de veículos será dado pelo maior dos dois valores de N .

$$N = q \left(\frac{r}{2} + d \right) \quad (24)$$

ou

$$N = qr \quad (25)$$

Onde: N – fila média (veíc.);

q – fluxo de veículos (veíc./s);

r – tempo de vermelho efetivo (análogo ao conceito de verde efetivo, s);

d – atraso médio por veículo (s).

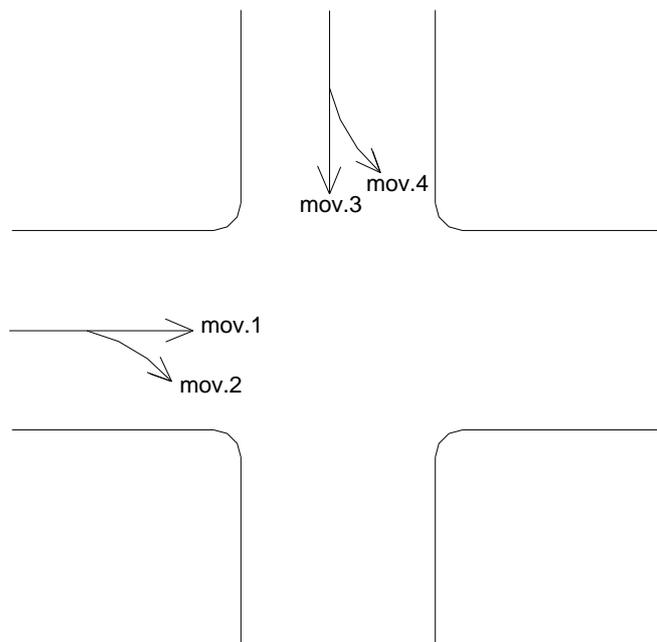
3.3 Faseamento

O número de fases da interseção é determinado a partir do fluxo de tráfego, seguindo-se os seguintes passos:

- 1º) Identificação dos movimentos;
- 2º) Estabelecimento dos movimentos conflitantes;
- 3º) Seleção dos movimentos que possam ocorrer simultaneamente em diferentes estágios;
- 4º) Determinação dos grupos focais, suas sequências luminosas e durações;
- 5º) Preparo dos diagramas de tempos.

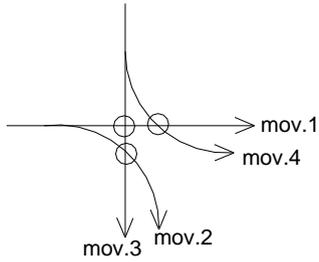
Exemplo 5: Dada a interseção da figura 25, de duas vias de mão única, elaborar um diagrama de estágios para operar em dois estágios.

Figura 25 - Identificação dos movimentos



Fonte: Produção do próprio autor.

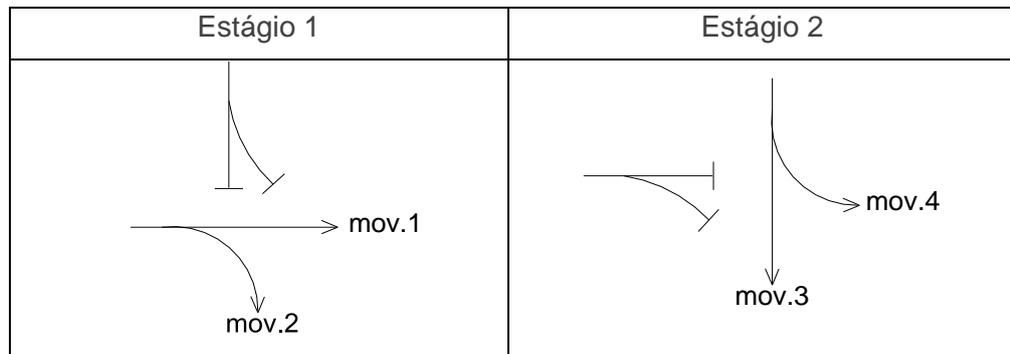
Movimentos conflitantes:



Mov.	1	2	3	4
1	-		X	X
2		-	X	
3	X	X	-	
4	X			-

Movimentos possivelmente não conflitantes: (1-2), (2-4) e (3-4).

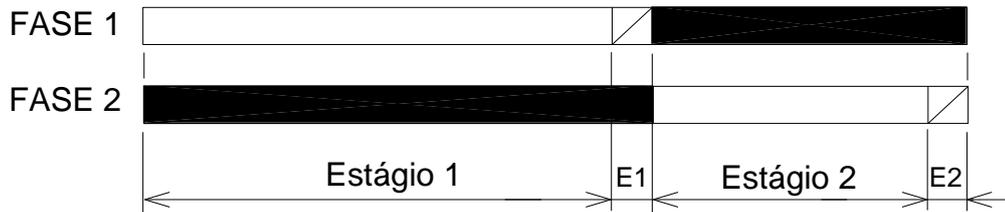
Diagrama de estágios (movimentos simultâneos):



Quadro resumo:

MOV.	EST.		GRUPO FOCAL	TIPO DE GRUPO FOCAL	SEMÁFOROS
	1	2			
1	X	-	GF 1	<ul style="list-style-type: none"> ● vermelho ▨ amarelo ○ verde 	
2	X	-			
3	-	X	GF 2	<ul style="list-style-type: none"> ● vermelho ▨ amarelo ○ verde 	
4	-	X			

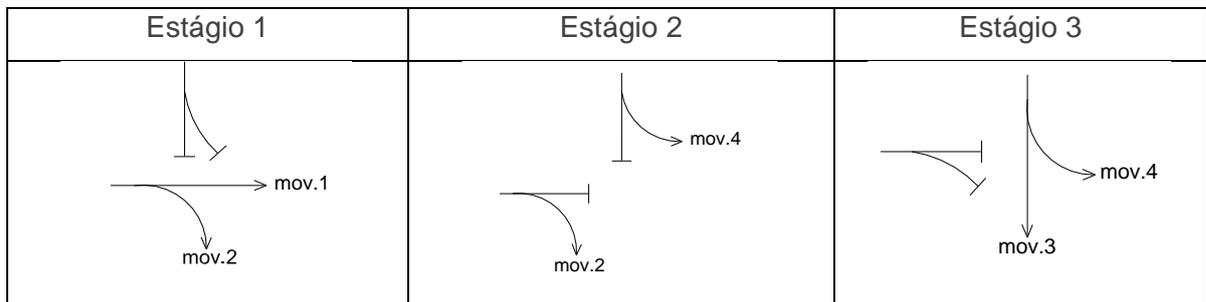
Diagrama de tempos:



Convenções: verde
 amarelo
 vermelho

Exemplo 6: Para a mesma interseção do Exemplo 5, elaborar um diagrama de estágio para operar em três estágios.

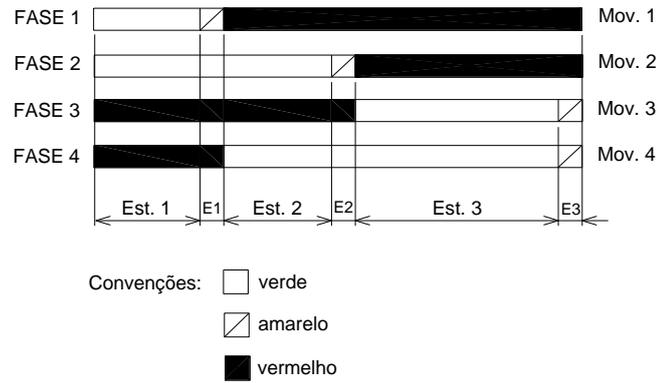
Diagrama de estágios (movimentos simultâneos):



Quadro resumo:

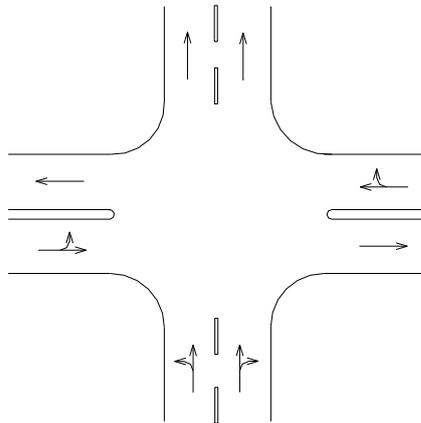
Mov	Est.			Grupo focal	Tipo de grupo focal	Semáforos
	1	2	3			
1	X			GF 1	<input checked="" type="checkbox"/> vermelho <input checked="" type="checkbox"/> amarelo <input type="checkbox"/> verde	
2	X	X		GF 2	<input type="checkbox"/> vermelho <input type="checkbox"/> amarelo <input checked="" type="checkbox"/> verde	
3			X	GF 3	<input checked="" type="checkbox"/> vermelho <input checked="" type="checkbox"/> amarelo <input type="checkbox"/> verde	
4		X	X	GF 4	<input type="checkbox"/> vermelho <input type="checkbox"/> amarelo <input checked="" type="checkbox"/> verde	

Diagrama de tempos:



Exemplo 7: Desenvolver o faseamento da interseção da figura 26.

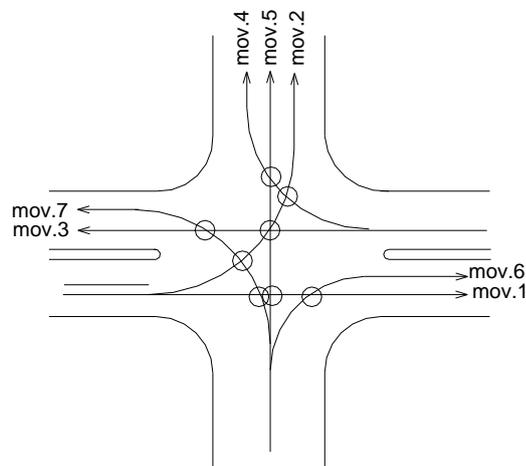
Figura 26 - Identificação dos movimentos



Fonte: Produção do próprio autor.

Alternativa 1:

Identificação dos movimentos:



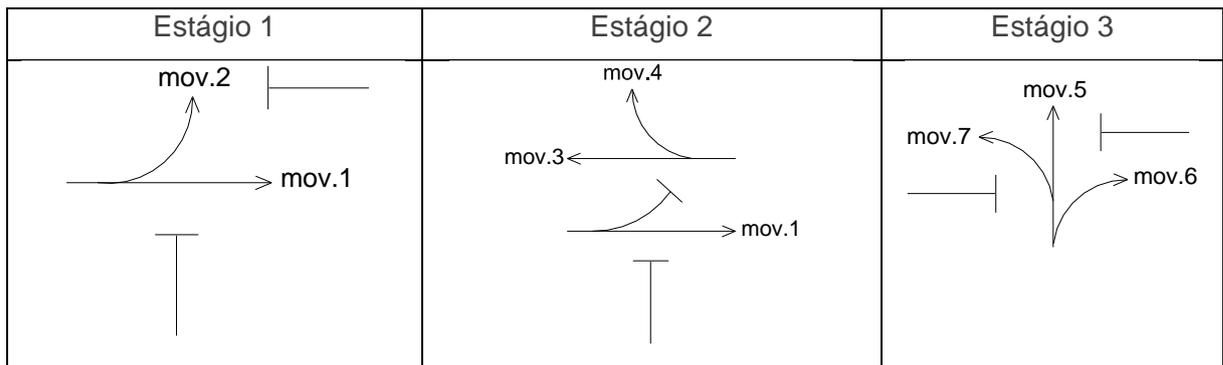
Movimentos conflitantes:

Mov.	1	2	3	4	5	6	7
1	-				X	X	X
2		-	X	X	X		X
3		X	-		X		X
4		X		-	X		
5	X	X	X	X	-		
6	X					-	
7	X	X	X				-

Movimentos possivelmente não conflitantes:

(1-2), (1-3), (1-4), (2-6), (3-4), (3-6), (4-6), (4-7), (5-6), (5-7) e (6-7).

Diagrama de estágios:



Quadro resumo:

Mov	Est.			Grupo focal	Tipo de grupo focal	Semáforos
	1	2	3			
1	X	X		GF 1		
2	X			GF 2		
3		X		GF 3		
4		X				
5			X	GF 4		
6			X			
7			X			

Diagrama de tempos:

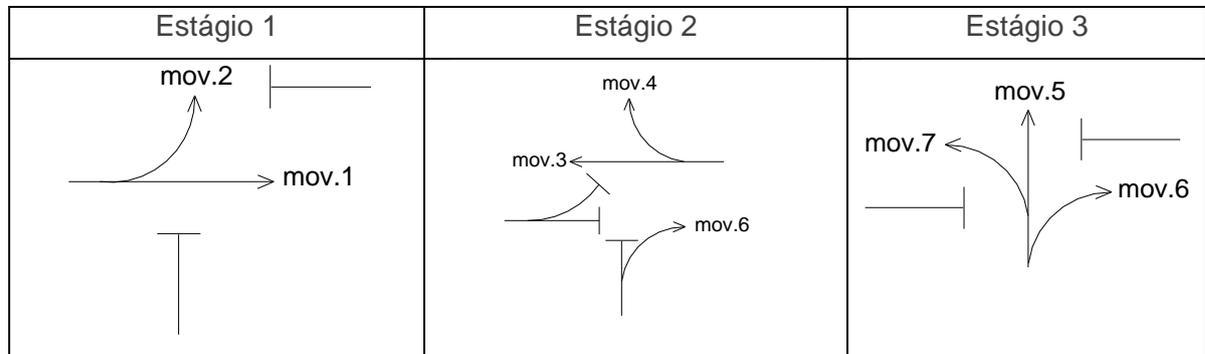


Convenções:

- verde
- amarelo
- vermelho

Alternativa 2:

Diagrama de estágios:



Quadro resumo:

Mov	Est.			Grupo focal	Tipo de grupo focal	Semáforos
	1	2	3			
1	X			GF 1	<input checked="" type="checkbox"/> vermelho <input checked="" type="checkbox"/> amarelo <input type="checkbox"/> verde	
2	X					
3		X		GF 2	<input checked="" type="checkbox"/> vermelho <input checked="" type="checkbox"/> amarelo <input type="checkbox"/> verde	
4		X				
5			X	GF 3		

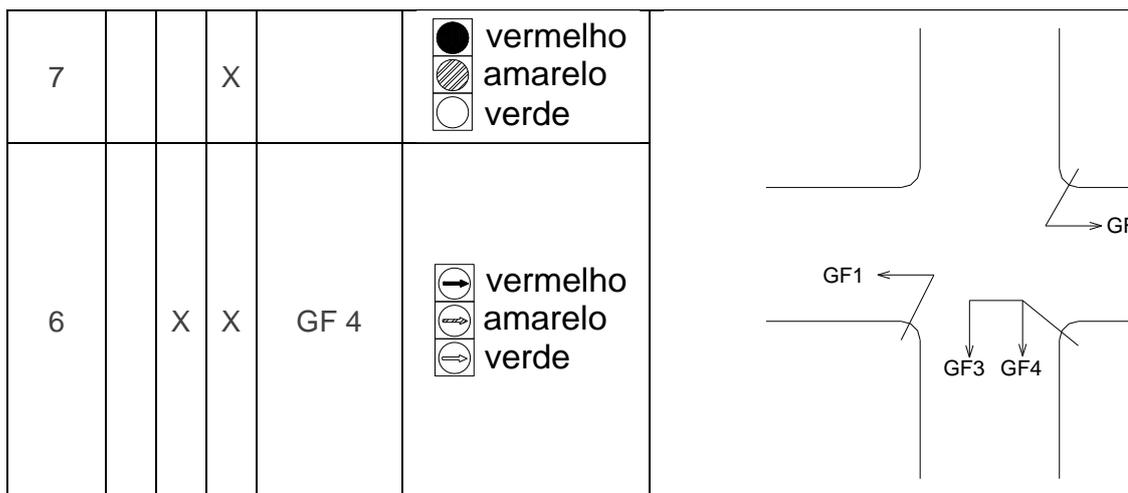


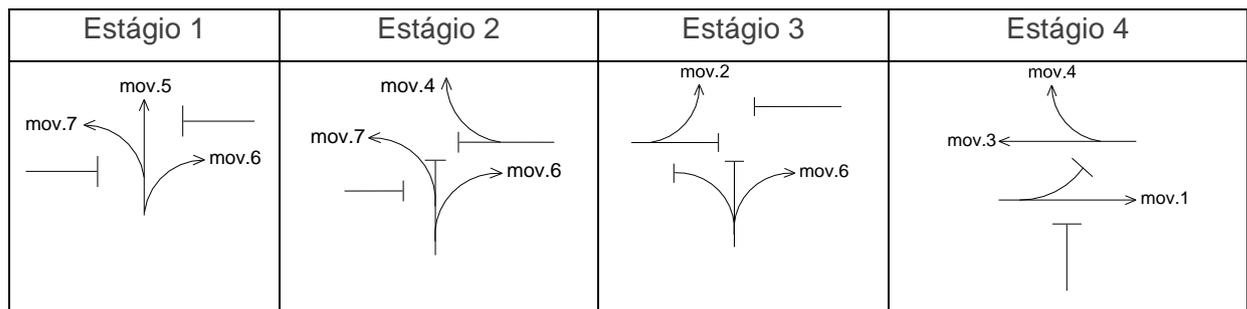
Diagrama de tempos:



Convenções: verde
 amarelo
 vermelho

Exemplo 8: Estudar o faseamento do exemplo 7 considerando-se uma operação em 4 estágios.

Diagrama de estágios:



Quadro resumo:

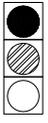
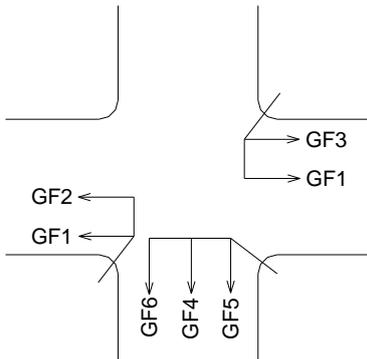
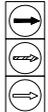
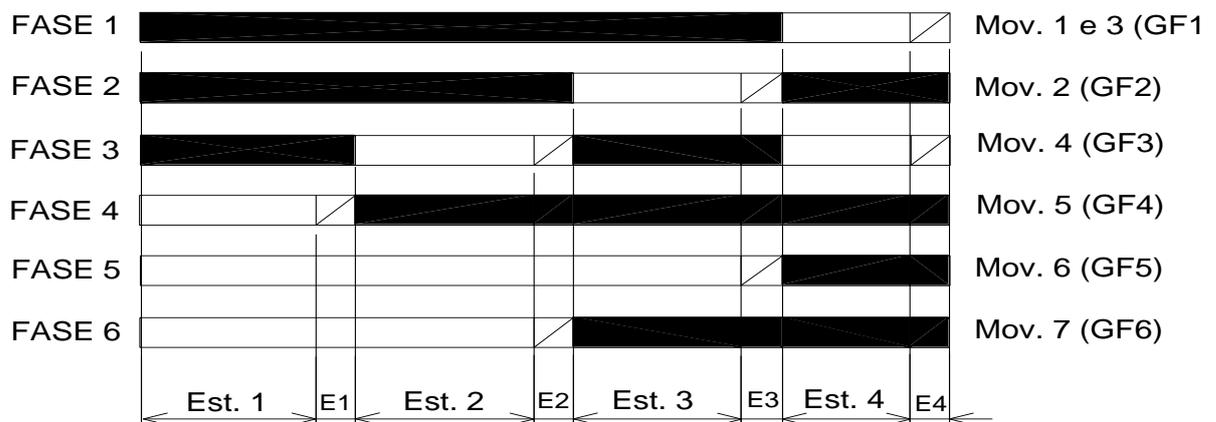
Mov	Est.				Grupo focal	Tipo de grupo focal	Semáforos
	1	2	3	4			
1				X	GF 1	 vermelho amarelo verde	
3				X			
2			X		GF2	 vermelho amarelo verde	
4		X		X	GF3	 vermelho amarelo verde	
5	X				GF 4	 vermelho amarelo verde	
6	X	X	X		GF5	 vermelho amarelo verde	
7	X	X			GF 6	 vermelho amarelo verde	

Diagrama de tempos:

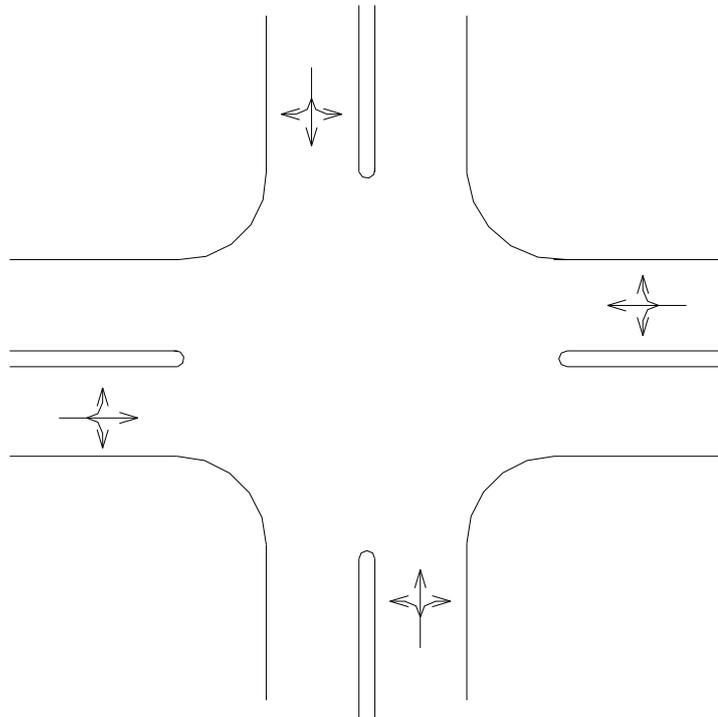


Convenções:

-  verde
-  amarelo
-  vermelho

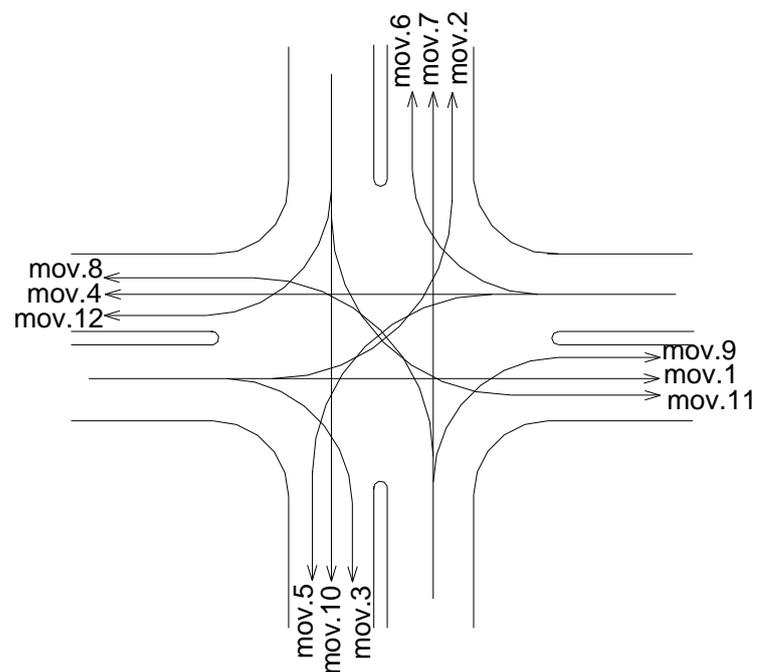
Exemplo 9: Estudar o faseamento da interseção da figura 27, considerando-se que os movimentos de conversão à direita devem ter prioridade.

Figura 27 - Identificação dos movimentos



Fonte: Produção do próprio autor.

Identificação dos movimentos:



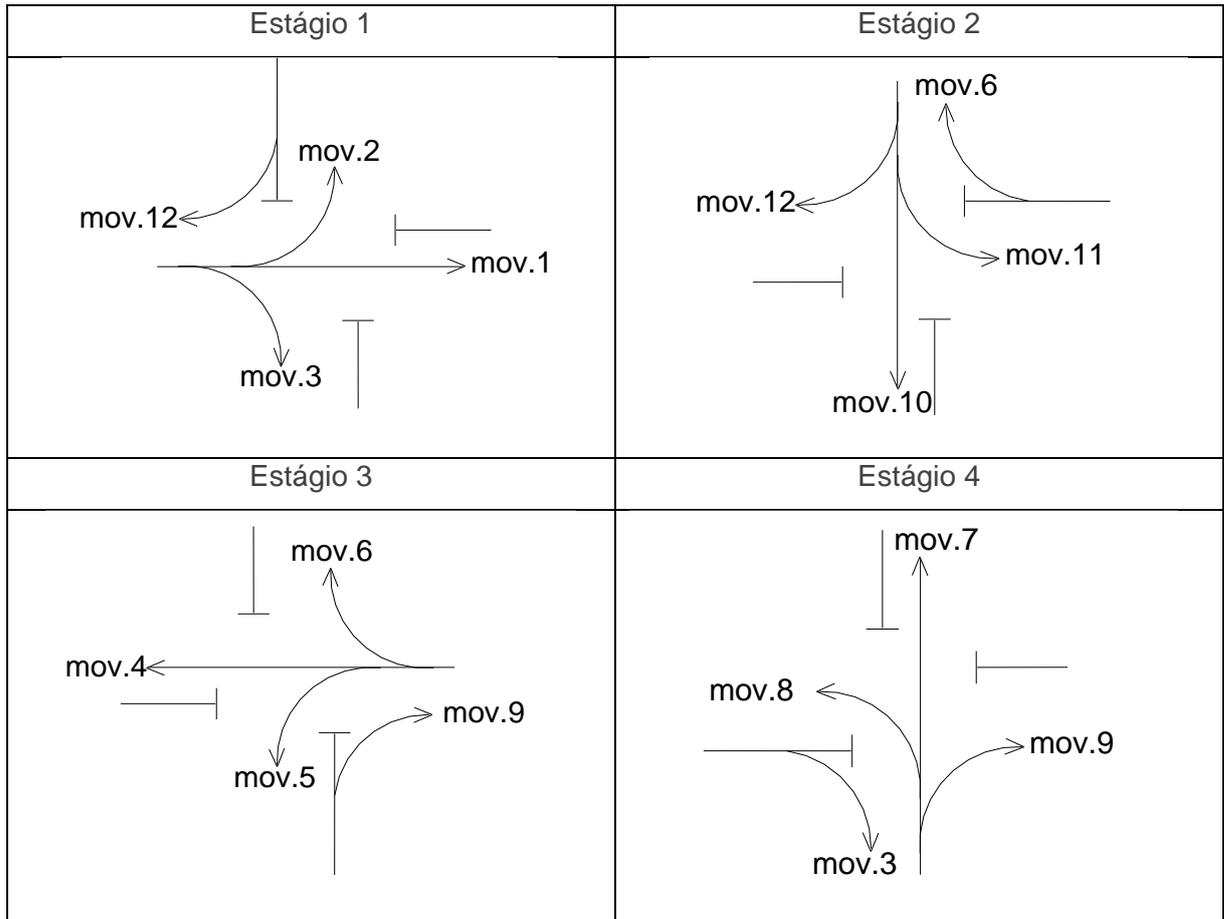
Movimentos conflitantes:

Mov.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	-				X		X	X	X	X	X	
2		-		X	X	X	X	X		X	X	
3			-		X					X		
4		X		-			X	X		X	X	X
5	X	X	X		-		X	X		X	X	
6		X				-	X					
7	X	X		X	X	X	-				X	
8	X	X		X	X			-		X	X	X
9	X								-		X	
10	X	X	X	X	X			X		-		
11	X	X		X	X		X	X	X		-	
12				X				X				-

Movimentos possivelmente não conflitantes:

(1-2), (1-3), (1-4), (1-6), (1-12),
 (2-3), (2-9), (2-12)
 (3-4), (3-6), (3-7), (3-8), (3-9), (3-11), (3-12),
 (4-5), (4-6), (4-9),
 (5-6), (5-9), (5-12),
 (6-8), (6-9), (6-10), (6-11), (6-12),
 (7-8), (7-9), (7-10), (7-12),
 (8-9),
 (9-10), (9-12),
 (10-11), (10-12),
 (11-12).

Diagrama de estágios:

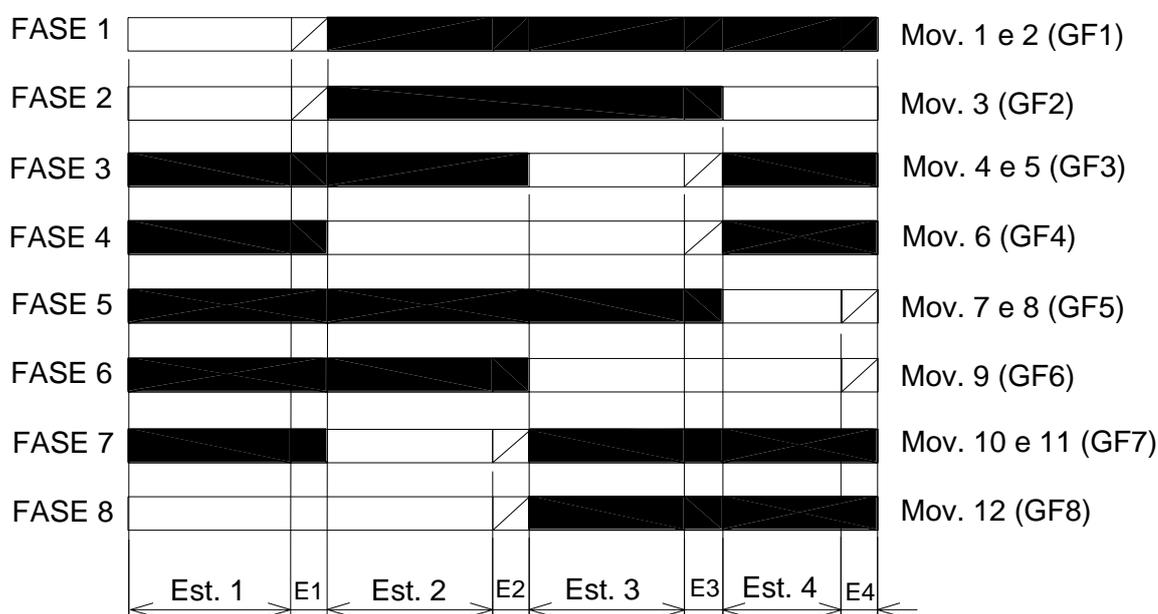


Quadro resumo:

Mov	Est.				Grupo focal	Tipo de grupo focal	Semáforos
	1	2	3	4			
1	X				GF 1	<ul style="list-style-type: none"> ● vermelho ▨ amarelo ○ verde 	
2	X						
3	X			X	GF 2	<ul style="list-style-type: none"> ⬆ vermelho ↔ amarelo ⬇ verde 	
4			X		GF 3	<ul style="list-style-type: none"> ● vermelho ▨ amarelo ○ verde 	
5			X				
6		X	X		GF 4	<ul style="list-style-type: none"> ⬆ vermelho ↔ amarelo ⬇ verde 	
7				X	GF 5	<ul style="list-style-type: none"> ● vermelho ▨ amarelo ○ verde 	
8				X			

9			X	X	GF 6	 vermelho  amarelo  verde	
10		X			GF 7	 vermelho  amarelo  verde	
11		X					
12	X	X			GF 8	 vermelho  amarelo  verde	

Diagrama de tempos:



Convenções:  verde
 amarelo
 vermelho

3.4 Procedimento para elaboração de um plano semafórico isolado

O procedimento prático para elaboração de um plano de tráfego de tempo fixo para um semáforo isolado, consiste nas seguintes etapas:

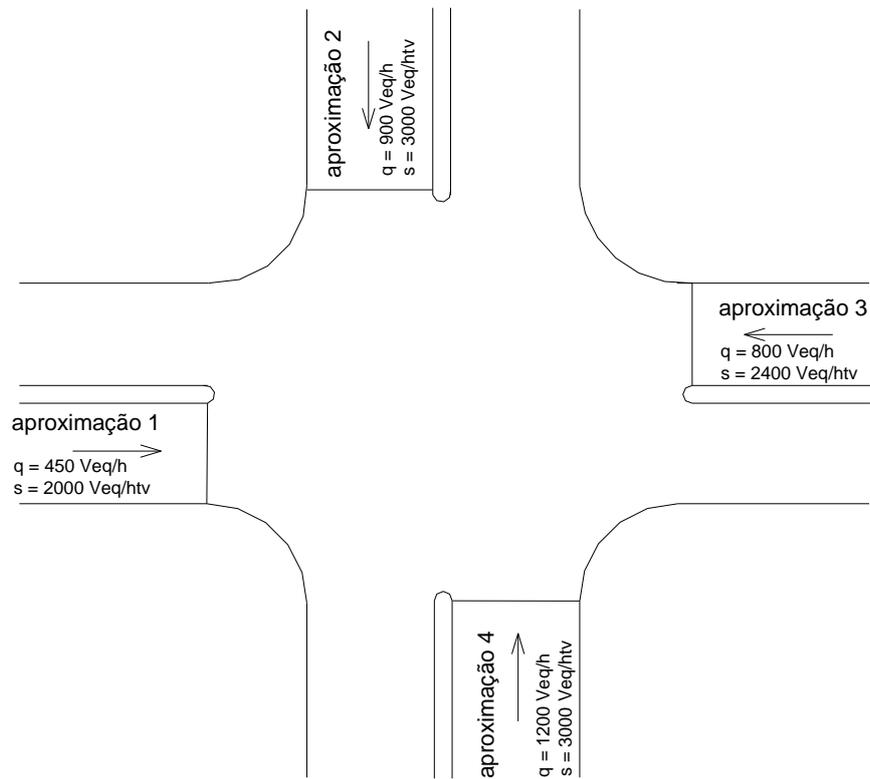
1ª Etapa – Determinar os fluxos de saturação das aproximações (corrigido das interferências locais);

- 2ª Etapa – Determinar a demanda horária (UCP/h) nas aproximações da interseção, a partir de uma contagem de veículos;
- 3ª Etapa – Estudar o faseamento da interseção;
- 4ª Etapa – Calcular as taxas de ocupação (y) das aproximações, e a partir dos valores críticos determinar Y ;
- 5ª Etapa – Calcular o tempo perdido total (T_p), a partir do tempo perdido em cada fase do ciclo;
- 6ª Etapa – Calcular o tempo de ciclo ótimo da interseção, pela fórmula de Webster;
- 7ª Etapa – Determinar os tempos de verde efetivo de cada fase do cruzamento;
- 8ª Etapa – Determinar os tempos de verde para implementação no controlador de tráfego (tempo de verde real).

Exemplo 10:

Dado o cruzamento da figura 28, a seguir, dimensionar os tempos ótimos do cruzamento, para operação com 2 fases, conforme o diagrama de estágios dado. O tempo de amarelo é igual a 3 segundos e o tempo perdido por fase é 2 segundos. O período de entreverdes é igual ao tempo de amarelo.

Figura 28 – Interseção-exemplo 10



Fonte: Produção do próprio autor.

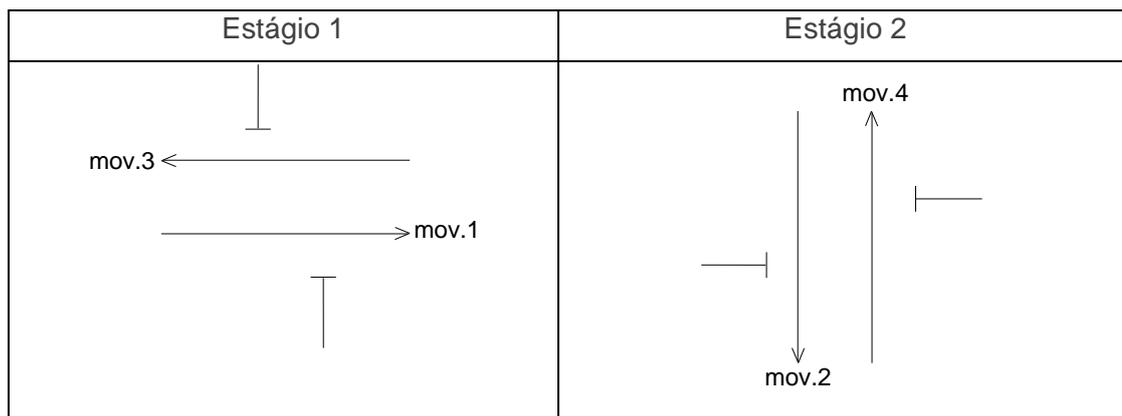
Movimento	Taxa de chegada q_i (V_{eq} / h)	Fluxo de saturação S_i (V_{eq} / htv)
1	450	2000
2	900	3000
3	800	2400
4	1200	3000

Solução:

- Movimentos conflitantes:

Mov.	1	2	3	4
1	–	X		X
2	X	–	X	
3		X	–	X
4	X		X	–

- Movimentos possivelmente não conflitantes: (1-3) e (2-4).
- Diagrama de estágios (movimentos simultâneos):



- Quadro resumo:

MOV.	EST.		GRUPO FOCAL	TIPO DE GRUPO FOCAL	SEMÁFOROS
	1	2			
1	X		GF 1		
3	X				
2		X	GF 2		
4		X			

- Cálculo das taxas de ocupação:

$$\text{Fase 1: } y_1 = \frac{450}{2000} = 0,23$$

$$y_3 = \frac{800}{2400} = 0,33$$

$$y_3 > y_1 \Rightarrow y_{crit}^{(1)} = 0,33$$

$$\text{Fase 2: } y_2 = \frac{900}{3000} = 0,30$$

$$y_4 = \frac{1200}{3000} = 0,40$$

$$y_4 > y_2 \Rightarrow y_{crit}^{(2)} = 0,40$$

- Somatório das taxas de ocupação crítica de cada fase:

$$Y = y_{crit}^{(1)} + y_{crit}^{(2)} = 0,33 + 0,40 = 0,73$$

- Cálculo do tempo total perdido no ciclo:

$$T_p = \sum_{i=1}^2 I_i + \sum_{i=1}^2 (E - t_a)_i = 2 + 2 = 4seg.$$

- Cálculo do tempo de ciclo ótimo:

$$C_o = \frac{1,5T_p + 5}{1 - Y} = \frac{1,5 \times 4 + 5}{1 - 0,73} \cong 41seg.$$

- Distribuição dos tempos de verde:

$$g_{ef} = \frac{y_{crit}}{Y} (C_o - T_p)$$

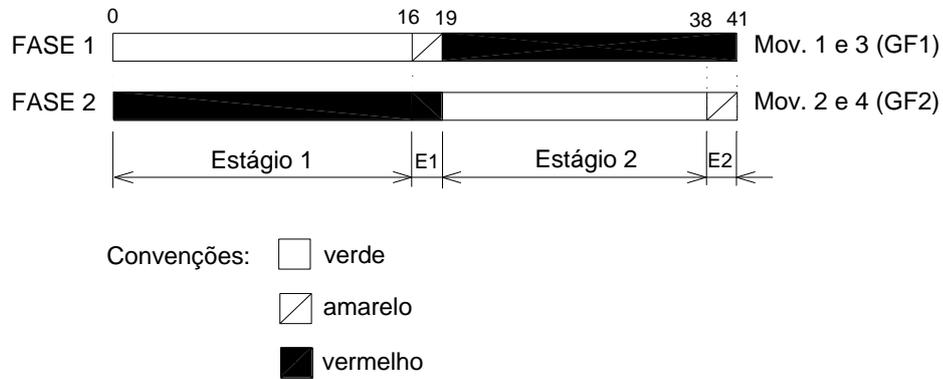
$$g_{ef_1} = \frac{0,33}{0,73} (41 - 4) \cong 17seg.$$

$$g_{ef_2} = \frac{0,40}{0,73} (41 - 4) \cong 20seg.$$

$$g_{real_1} = g_{ef_1} + I_1 - t_a = 17 + 2 - 3 = 16seg.$$

$$g_{real_2} = g_{ef_2} + I_2 - t_a = 20 + 2 - 3 = 19seg.$$

- Diagrama de tempos:



Exemplo 11: Considerando-se que a interseção do Exemplo 10 fará parte de um corredor sincronizado com um tempo de ciclo de 100 s, e com uma capacidade prática de 90% da capacidade normal, calcular a reserva de capacidade das suas aproximações.

- Distribuição dos tempos de verde:

$$g_{ef_1} = \frac{0,33}{0,73} (100 - 4) \cong 43seg.$$

$$g_{ef_2} = \frac{0,40}{0,73} (100 - 4) \cong 53seg.$$

- Cálculo da capacidade de cada aproximação:

$$aprox. 1 \rightarrow Cap = \frac{43 \times 2000}{100} = 860veíc./h \Rightarrow Cap_{90\%} = 774veíc./h$$

$$aprox. 2 \rightarrow Cap = \frac{53 \times 3000}{100} = 1590veíc./h \Rightarrow Cap_{90\%} = 1431veíc./h$$

$$aprox. 3 \rightarrow Cap = \frac{43 \times 2400}{100} = 1032veíc./h \Rightarrow Cap_{90\%} = 929veíc./h$$

$$aprox. 4 \rightarrow Cap = \frac{53 \times 3000}{100} = 1590veíc./h \Rightarrow Cap_{90\%} = 1431veíc./h$$

- Cálculo da reserva de capacidade:

$$\begin{aligned} \text{aprox. 1} &\rightarrow \text{ReservaCap} = 774 - 450 = 324 \text{veic./h} \Rightarrow 72\% \\ \text{aprox. 2} &\rightarrow \text{ReservaCap} = 1431 - 900 = 531 \text{veic./h} \Rightarrow 59\% \\ \text{aprox. 3} &\rightarrow \text{ReservaCap} = 929 - 800 = 129 \text{veic./h} \Rightarrow 16\% \\ \text{aprox. 4} &\rightarrow \text{ReservaCap} = 1431 - 1200 = 231 \text{veic./h} \Rightarrow 19\% \end{aligned}$$

Assim, a reserva de capacidade da aproximação 3, por exemplo, é de 16%, ou seja, essa aproximação é capaz de suportar um incremento de até 16% (129 veic./h) do seu fluxo horário (800 veic./h). Verifica-se, portanto que, para essa situação, as aproximações 3 e 4 são consideradas as mais críticas da interseção, tendo em vista que apresentam as menores reservas de capacidade.

Exemplo 12: Para a mesma interseção do exemplo 10, calcular o atraso sofrido pelos veículos na aproximação 4.

- Cálculo da porcentagem de verde:

$$\lambda_4 = \frac{g_{ef2}}{\text{ciclo}} = \frac{20}{41} = 0,49 \Rightarrow 49\%$$

- Cálculo do grau de saturação:

$$X_4 = \frac{y_4}{\lambda_4} = \frac{0,40}{0,49} = 0,82$$

- Cálculo do atraso médio:

$$d = \frac{9}{10} \left[\frac{c(1 - \lambda)^2}{2(1 - \lambda X)} + \frac{X^2}{2q(1 - X)} \right]$$

$$d_4 = \frac{9}{10} \left[\frac{41(1 - 0,49)^2}{2(1 - 0,49 \times 0,82)} + \frac{(0,82)^2}{2 \times 0,33(1 - 0,82)} \right] = 13 \text{seg./veic.}$$

Exemplo 13: Ainda com base no exemplo 10, calcular o comprimento da fila média na aproximação 4.

$$N_a = q_4 \left(\frac{r_4}{2} + d_4 \right) = \frac{1200}{3600} \left(\frac{41 - 20}{2} + 13 \right) = 7,8 \text{ veíc.}$$

$$N_b = q_4 r_4 = \frac{1200}{3600} \times (41 - 20) = 6,9 \text{ veíc.}$$

Assim, como deve-se considerar o maior entre os dois valores, o comprimento da fila média da aproximação 4 será de 7,8 veículos.

Exemplo 14: Supondo que a aproximação 4, do exemplo 10, possua uma faixa exclusiva para conversão à esquerda, com raio de curvatura de 10m e fluxo de conversão de 200 veíc./h, desenvolver o novo plano semaforico.

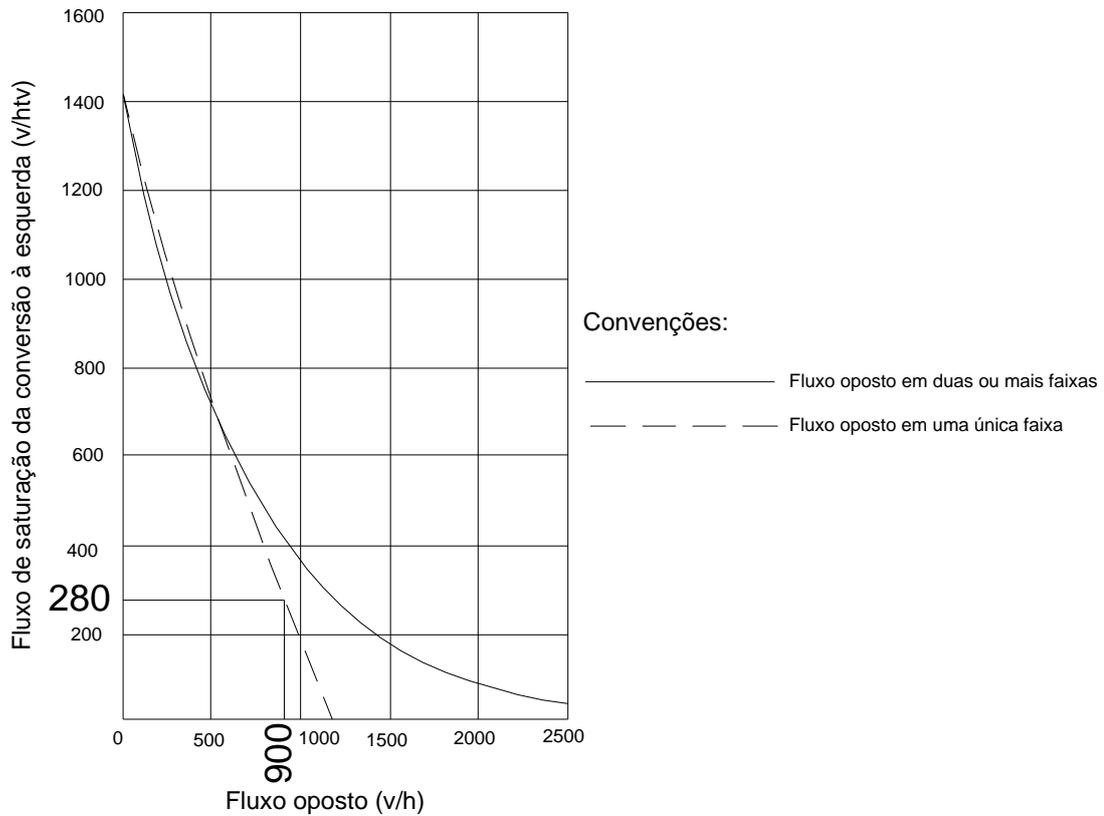
Alternativa 1 – Interseção operando com duas fases (exemplo 10):

- Cálculo do número médio de veículos esperado por ciclo:

$$N = \frac{200}{3600} \times 41 = 2,28 \text{ veíc./ciclo}$$

- Determinação do fluxo de saturação de conversão à esquerda, sendo que há faixa especial e tráfego oposto em fila única (figura 29):

Figura 29 – Adaptação da figura 19 - Interseção-exemplo 10



Fonte: Produção do próprio autor.

$$S_{ce} = 420 \text{veic./htv}$$

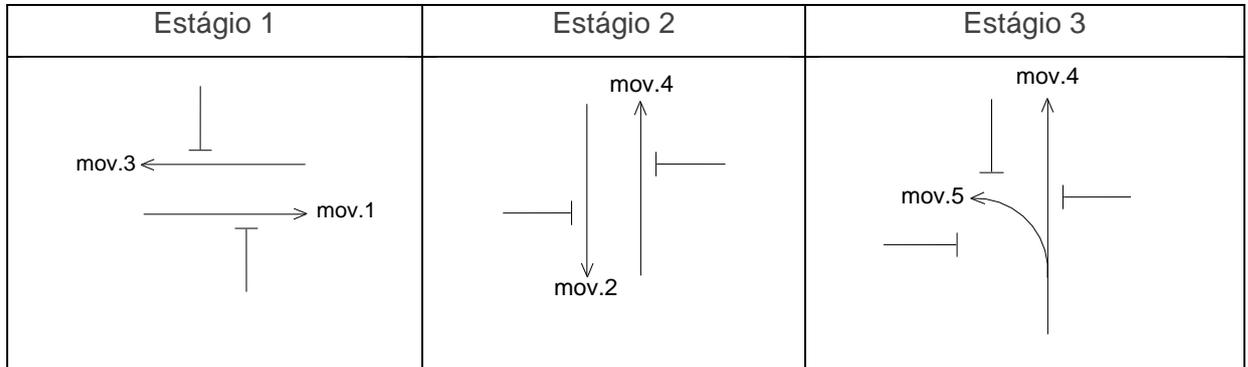
- Cálculo do número máximo de veículos que podem dobrar à esquerda por ciclo:

$$N_{ce}^{m\acute{a}x.} = \frac{280}{3600} \times 41 = 3,19 \text{veic./ciclo}$$

Como $N_{ce}^{m\acute{a}x.} > N$, o volume de veículos que dobra à esquerda é suportado pelas condições locais, e não há a necessidade de nenhuma alteração.

Alternativa 2 – Interseção operando com fase especial para a conversão à esquerda:

Diagrama de estágios:



Quadro resumo:

Mov	Est.			Grupo focal	Tipo de grupo focal	Semáforos
	1	2	3			
1	X			GF 1		
3	X					
2		X		GF2		
4		X	X	GF3		
5			X	GF 4		

- Cálculo das taxas de ocupação:

Fase 1: $y_{crit}^{(1)} = 0,33$

Fase 2: $y_{crit}^{(2)} = 0,40$

Fase 3: $y_{crit_{ce}}^{(3)} = \frac{q_{ce}}{S_{ce}} \rightarrow$

taxa de ocupação do movimento de conversão.

- Fluxo de saturação de conversão à esquerda (fluxo oposto em fila única):

Tendo em vista que haverá uma fase especial para o fluxo que dobra à esquerda, a situação é classificada como sendo “com faixa especial e sem fluxo oposto”.

$$S_{ce} = \frac{1800}{1 + \frac{1,52}{r}} = \frac{1800}{1 + \frac{1,52}{10}} = 1562 \text{veíc./htv}$$

$$\text{Fase 3: } y_{crit_{ce}}^{(3)} = \frac{q_{ce}}{S_{ce}} = \frac{200}{1562} = 0,13$$

- Somatório das taxas de ocupação crítica de cada fase:

$$Y = y_{crit}^{(1)} + y_{crit}^{(2)} + y_{crit}^{(3)} = 0,33 + 0,40 + 0,13 = 0,86$$

- Cálculo do tempo total perdido no ciclo:

$$T_p = \sum_{i=1}^2 I_i + \sum_{i=1}^2 (E - t_a)_i = 2 + 2 + 2 = 6 \text{seg.}$$

- Cálculo do tempo de ciclo ótimo:

$$C_o = \frac{1,5T_p + 5}{1 - Y} = \frac{1,5 \times 6 + 5}{1 - 0,86} \cong 100 \text{seg.}$$

- Distribuição dos tempos de verde:

$$g_{ef} = \frac{y_{crit}}{Y} (C_o - T_p)$$

$$g_{ef_1} = \frac{0,33}{0,86} (100 - 6) \cong 36 \text{seg.}$$

$$g_{ef_2} = \frac{0,40}{0,86}(100 - 6) \cong 44seg.$$

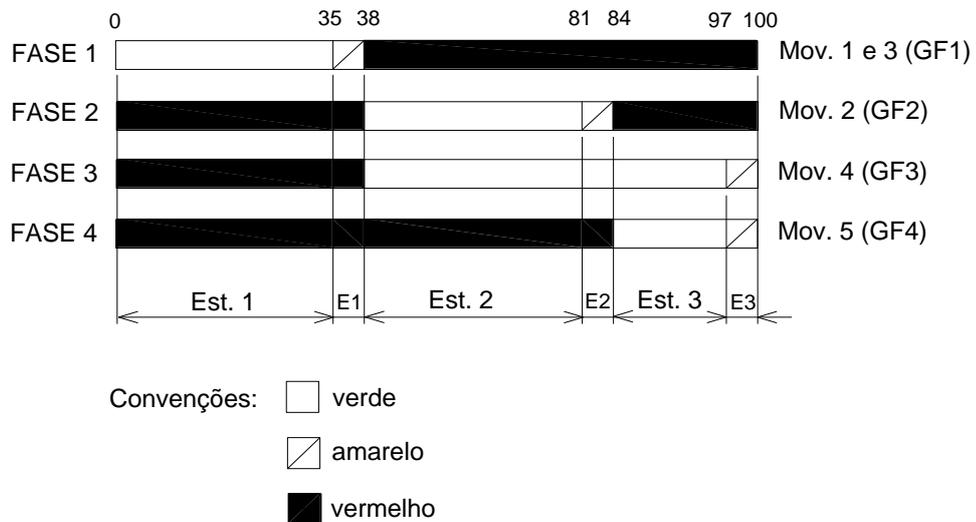
$$g_{ef_3} = \frac{0,13}{0,86}(100 - 6) \cong 14seg.$$

$$g_{real_1} = g_{ef_1} + I_1 - t_a = 36 + 2 - 3 = 35seg.$$

$$g_{real_2} = g_{ef_2} + I_2 - t_a = 44 + 2 - 3 = 43seg.$$

$$g_{real_3} = g_{ef_3} + I_3 - t_a = 14 + 2 - 3 = 13seg.$$

- Diagrama de tempos:

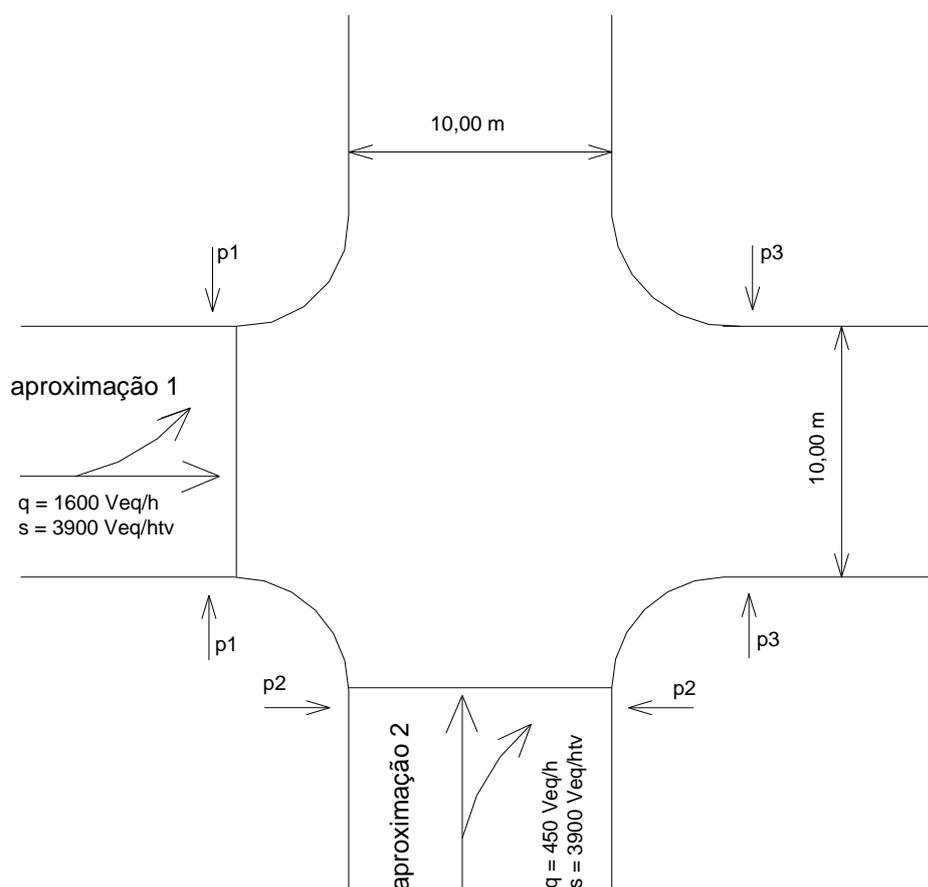


3.5 Considerações a respeito dos pedestres

Alguns cuidados especiais devem ser tomados quando há fluxos de pedestres nas travessias das interseções. Um desses cuidados refere-se ao tempo mínimo necessário para que os pedestres consigam atravessar a via (pedestres p1 e p2 da figura 30), ou seja, o tempo mínimo de vermelho que o semáforo dessa via deve apresentar. O outro cuidado diz respeito ao tipo de travessia indicado na figura 30

como p3, chamado de “giro bloqueado”, muito comum em áreas com intenso movimento de pedestres, tais como os centros comerciais das grandes cidades.

Figura 30 – Interseção-exemplo



Fonte: Produção do próprio autor.

Para o primeiro caso (travessias p1 e p2, figura 30) o tempo mínimo necessário para a travessia é dado pelo tempo de verde efetivo da via conflitante. Assim, por exemplo, o tempo de verde efetivo mínimo da aproximação 1 é determinado em função do tempo necessário para o pedestre p2 atravessar a via. Essa análise é especialmente relevante em interseções com baixo volume de tráfego, tendo em vista que o tempo de ciclo ótimo se torna pequeno, e como consequência os tempos de verde efetivo também ficam pequenos. Na prática o valor mínimo recomendado para o ciclo ótimo varia entre 30 e 35 s, em função do fluxo de pedestres, e o tempo de verde efetivo de cada fase não deve ser inferior a 10 s sejam quais forem o volume de pedestres observado e o tempo necessário para os mesmos atravessarem a via.

Portanto o tempo de verde efetivo mínimo pode ser calculado da seguinte forma (equação 26):

$$g_{ef.mín}^{(p)} = \frac{L}{V_p} + ts \quad (26)$$

Onde: $g_{ef.mín}^{(p)}$ – tempo de verde efetivo mínimo da fase associada à travessia de pedestres (s);
L – comprimento da travessia (largura da via) a ser percorrida pelo pedestre (m);
 V_p – velocidade média do pedestre (m/s)*;
ts – tempo de segurança (s)**.

* Usualmente $V_p=1,2$ m/s, mas deve-se observar que esse é um valor médio, e que pode variar em função das características locais. Por exemplo, para uma travessia próxima a um hospital, a um asilo, ou a uma associação de deficientes físicos, pode ser necessário trabalhar com uma velocidade mais baixa, deixando-se um tempo maior para a travessia.

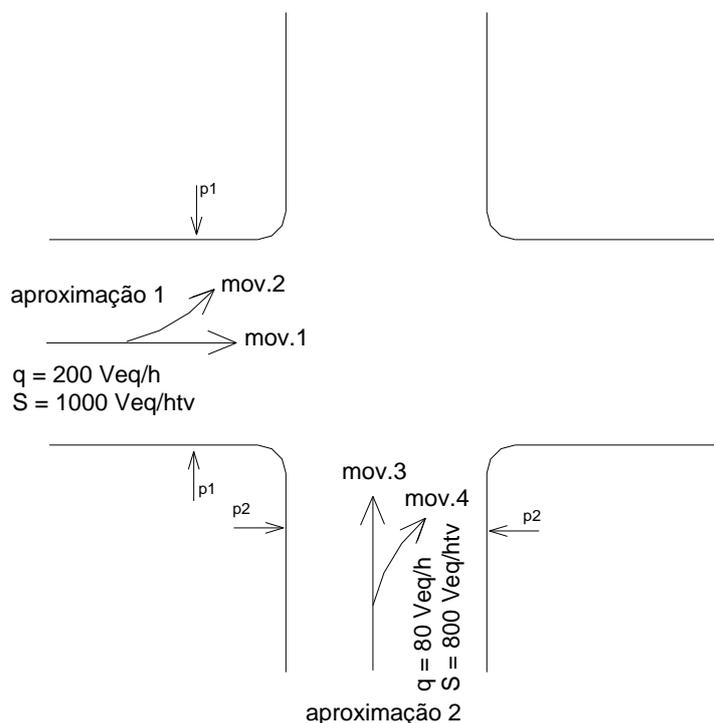
** O valor prático para o tempo de segurança é de 5 s, mas, assim como no caso anterior, esse valor pode variar em função das características locais.

É importante ressaltar que a equação 26 determina o tempo mínimo necessário para a travessia dos pedestres. Em casos onde o fluxo de pedestres é muito intenso, ou que haja um alto índice de acidentes com pedestres atravessando a via, podem-se adotar tempos maiores para essa travessia. Para tanto não há uma fórmula específica, fica a critério do técnico responsável pelo estudo, o qual deve tomar a decisão com base em sua experiência, conhecimento do local e bom senso, tendo em vista que o aumento do tempo disponível para a travessia de pedestres, aumenta o atraso uniforme nas aproximações da interseção, podendo inclusive provocar congestionamentos e atrasos aleatórios, especialmente em horários de pico e nos grandes centros urbanos. Assim, deve-se primeiramente estudar a possibilidade de transferência desses fluxos de pedestres para outros pontos de travessia mais seguros, ou mesmo intervenções físicas que impeçam a travessia de pedestres nesses locais críticos, tais como, cercas.

Quanto à segunda situação apresentada (travessia p3, figura 30), é necessário que se crie um estágio específico para o pedestre atravessar a via, que pode ser obtido por meio de uma fase especial somente para os pedestres (colocando-se um grupo focal para pedestre), ou simplesmente colocando-se um período de vermelho total para as aproximações, suficiente para essa travessia. Então, com base no tempo necessário para o pedestre atravessar a via, determina-se o período de vermelho total das aproximações da interseção.

Exemplo 15: Para a interseção da figura 31, desenvolver o plano semafórico, considerando as travessias de pedestres indicadas e que ambas as vias têm largura de 10,00m. O tempo de amarelo é igual a 3 s e o tempo perdido por fase, devido ao efeito reação/aceleração, é de 2 s

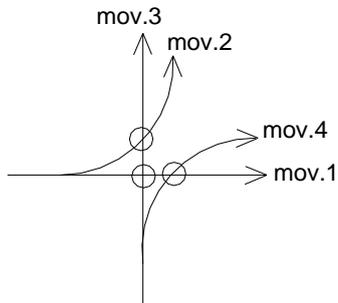
Figura 31 – Interseção-exemplo 15



Fonte: Produção do próprio autor.

Solução:

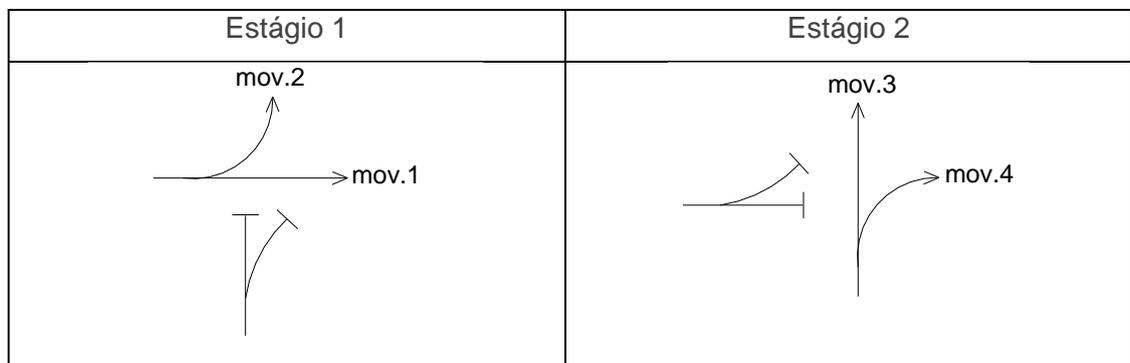
Movimentos conflitantes:



Mov.	1	2	3	4
1	-		X	X
2		-	X	
3	X	X	-	
4	X			-

Movimentos possivelmente não conflitantes: (1-2), (2-4) e (3-4).

Diagrama de estágios:



Quadro resumo:

MOV.	EST.		GRUPO FOCAL	TIPO DE GRUPO FOCAL	SEMÁFOROS
	1	2			
1	X	-	V1	<ul style="list-style-type: none"> ● vermelho ▨ amarelo ○ verde 	
2	X	-			
3	-	X	V2	<ul style="list-style-type: none"> ● vermelho ▨ amarelo ○ verde 	
4	-	X			
5	-	X	P3		
6	X	-	P4		

- Cálculo das taxas de ocupação:

$$\text{Fase 1: } y_1 = \frac{200}{1000} = 0,20$$

$$\text{Fase 2: } y_2 = \frac{80}{800} = 0,10$$

- Somatório das taxas de ocupação crítica de cada fase:

$$Y = y_{crit}^{(1)} + y_{crit}^{(2)} = 0,20 + 0,10 = 0,30$$

- Cálculo do tempo total perdido no ciclo:

$$T_p = \sum_{i=1}^2 I_i + \sum_{i=1}^2 (E - t_a)_i = 2 + 2 = 4seg.$$

- Cálculo do tempo de ciclo ótimo:

$$C_o = \frac{1,5T_p + 5}{1 - Y} = \frac{1,5 \times 4 + 5}{1 - 0,30} \cong 16seg.$$

16 s é menor que o mínimo admissível $\Rightarrow C_o = 30seg.$

- Distribuição dos tempos de verde:

$$g_{ef_1} = \frac{0,20}{0,30} (30 - 4) \cong 17seg.$$

$$g_{ef_2} = \frac{0,10}{0,30} (30 - 4) \cong 9seg.$$

Pela geometria da interseção, e considerando-se a velocidade média de travessia dos pedestres, tem-se:

$$g_{ef.min.1}^{(p)} = \frac{10,00}{1,2} + 5 \cong 13seg.$$

$$g_{ef.min.2}^{(p)} = \frac{10,00}{1,2} + 5 \cong 13seg.$$

Verifica-se que o tempo de verde efetivo da fase 2 (9 s) é menor que o mínimo permitido (13 s). Portanto, deve-se adotar o valor mínimo. Então:

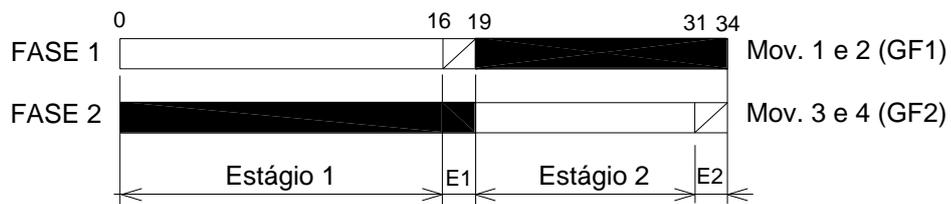
$$g_{ef_2} = 13seg.$$

E o ciclo passa a ser: $C = g_{ef_1} + g_{ef_2} + Tp = 17 + 13 + 4 = 34seg.$

$$g_{real_1} = g_{ef_1} + I_1 - t_a = 17 + 2 - 3 = 16seg.$$

$$g_{real_2} = g_{ef_2} + I_2 - t_a = 13 + 2 - 3 = 12seg.$$

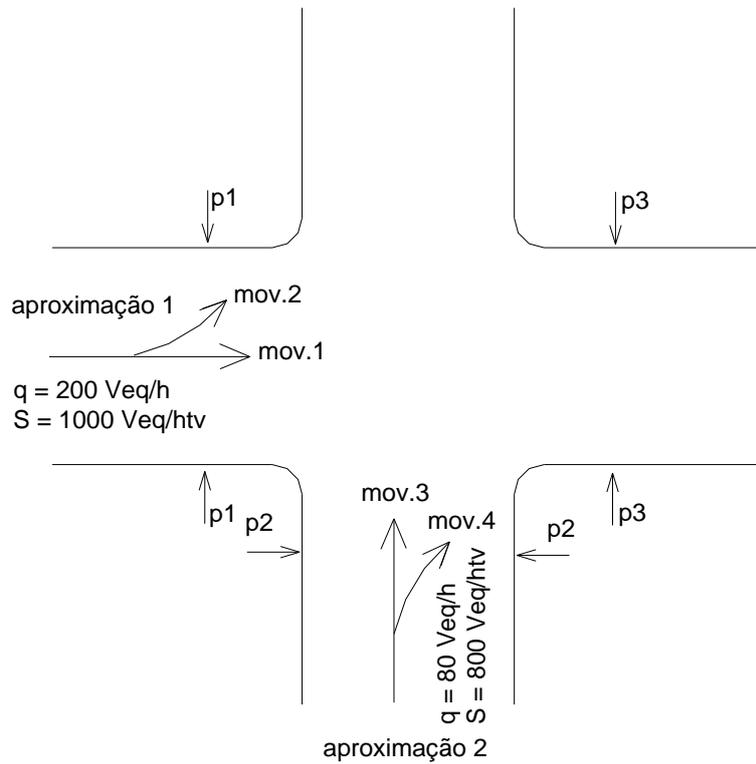
- Diagrama de tempos:



Convenções: verde
 amarelo
 vermelho

Exemplo 16: Para a mesma interseção do exemplo 15, desenvolver o plano semafórico, considerando também a travessia de pedestres p3 indicada na figura 32.

Figura 32 – Interseção-exemplo 16



Fonte: Produção do próprio autor.

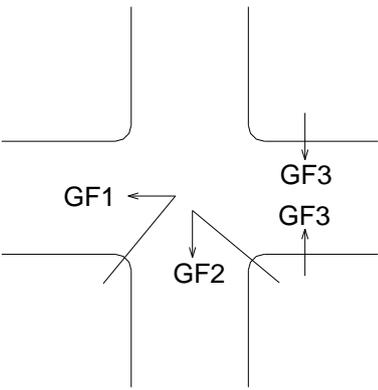
Diagrama de estágios:

Estágio 1	Estágio 2	Estágio 3

Como visto anteriormente há duas alternativas possíveis para essa situação, colocando-se um grupo focal específico para pedestres, o qual teria uma fase própria (alternativa 1), ou simplesmente colocando-se um período de vermelho total (alternativa 2).

Alternativa 1:

Quadro resumo:

Mov	Est.			Grupo focal	Tipo de grupo focal	Semáforos
	1	2	3			
1	X			GF 1	 vermelho amarelo verde	
2	X					
3		X		GF2	 vermelho amarelo verde	
4		X				
p3			X	GF 3	 vermelho verde	

Tendo em vista que a largura da via é de 10m, o tempo necessário para a travessia de pedestres p3 será calculado segundo o mesmo raciocínio visto para o cálculo do verde efetivo mínimo.

$$g_{ef_3}^{(p)} = \frac{10,00}{1,2} + 5 \cong 13seg.$$

Assim, tempo perdido total será:

$$T_p = \sum_{i=1}^2 I_i + \sum_{i=1}^2 (E - t_a)_i = 2 + 2 + 2 = 6seg.$$

E o ciclo será:

$$C = g_{ef_1} + g_{ef_2} + g_{ef_3}^{(p)} + T_p = 17 + 13 + 13 + 6 = 49seg.$$

$$g_{real_1} = g_{ef_1} + I_1 - t_a = 17 + 2 - 3 = 16seg.$$

$$g_{real_2} = g_{ef_2} + I_2 - t_a = 13 + 2 - 3 = 12seg.$$

$$g_{real_3}^{(p)} = g_{ef_3}^{(p)} + I_3^{(p)} = 13 + 2 = 15seg.$$

Observe que para o grupo focal de pedestre não há amarelo, há sim um verde piscante (ou, intermitente) cujo tempo corresponde ao necessário para o pedestre que já se encontra na travessia consiga completá-la, ou desistir (caso esteja no início da travessia) e voltar. Aquele pedestre que chega no momento em que o verde começa a piscar, deve esperar o próximo período de verde para atravessar a via.

- Diagrama de tempos:



Alternativa 2: Tendo em vista que a largura da via é de 10m, o tempo de vermelho total (equação 27) necessário para a travessia de pedestres p3 será calculado segundo o mesmo raciocínio visto para o cálculo do verde efetivo mínimo, mas acrescentando-se o tempo perdido devido ao efeito reação/movimentação do pedestre ($I^{(p)}$).

Quadro resumo:

Mov	Est.		Grupo focal	Tipo de grupo focal	Semáforos
	1	2			
1	X		GF 1	<ul style="list-style-type: none"> vermelho amarelo verde 	
2	X				
3		X	GF 2	<ul style="list-style-type: none"> vermelho amarelo verde 	
4		X			

- Tempo de vermelho total:

$$r_{total}^{(p)} = \frac{L}{Vp} + ts + I^{(p)} \quad (27)$$

$$r_{total}^{(p)} = \frac{10,00}{1,2} + 5 + 2 \cong 15seg.$$

- Tempo perdido total:

$$T_p = \sum_{i=1}^2 I_i + \sum_{i=1}^2 (E - t_a)_i = 2 + 2 + 15 = 19seg.$$

- Tempo de ciclo:

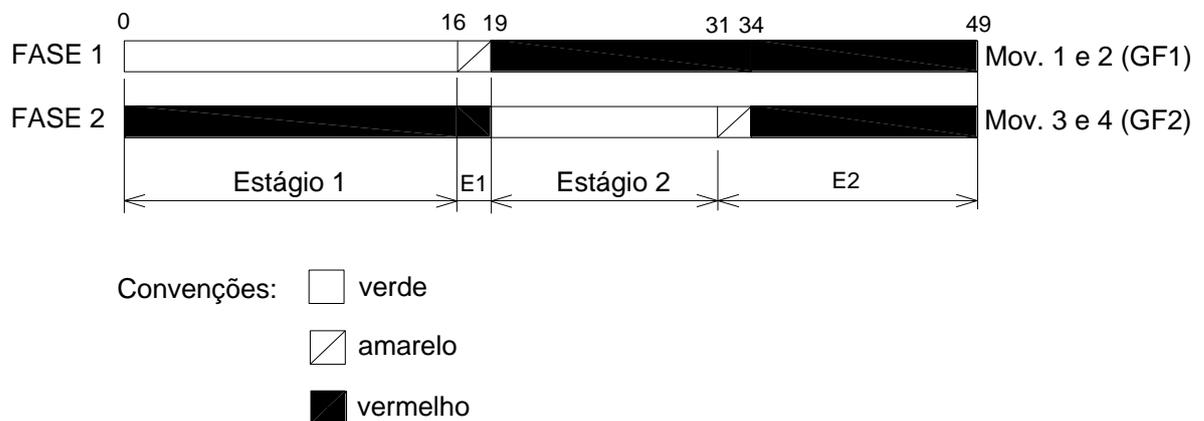
$$C = g_{ef_1} + g_{ef_2} + T_p = 17 + 13 + 19 = 49seg.$$

- Tempos de verde real:

$$g_{real_1} = g_{ef_1} + I_1 - t_a = 17 + 2 - 3 = 16seg.$$

$$g_{real_2} = g_{ef_2} + I_2 - t_a = 13 + 2 - 3 = 12seg.$$

Diagrama de tempos:



CAPÍTULO 04

SINCRONIZAÇÃO DE SEMÁFOROS

4.1 Considerações gerais

O objetivo da sincronização de semáforos é estabelecer uma política de controle do escoamento do fluxo de tráfego como, por exemplo, o movimento progressivo de um pelotão de veículos, minimizando os atrasos nos semáforos e/ou aumentando da capacidade de um determinado corredor de tráfego, usualmente uma via arterial urbana ou suburbana, nos horários de pico.

4.2 Sistemas tradicionais

As metrópoles brasileiras têm se caracterizado por apresentarem uma excessiva concentração de atividades socioeconômicas nas áreas centrais. Esse desequilíbrio espacial faz com que grandes contingentes populacionais residentes na periferia tenham que vencer diariamente extensas distâncias até o trabalho.

As superfícies relativamente grandes de nossos municípios tornam ainda mais grave essa situação. Por exemplo, enquanto a cidade de São Paulo tem uma área de 1493 km², Barcelona (Espanha) não chega aos 100 km², o que representa uma área cerca de quinze vezes maior, com consideráveis repercussões nas distâncias e custos médios de transportes, assumindo uma relação direta entre essas variáveis.

Vários fatores contribuem para esse desequilíbrio no uso do solo urbano, entre os quais se destaca a configuração radial dos sistemas de transportes tipicamente observada em nossas cidades, o que tende a estimular e potencializar o fenômeno de concentração/periferização. Um efeito direto dessa configuração radial é a concentração da demanda de viagens em alguns corredores, classificados como vias arteriais, urbanas ou suburbanas, responsáveis pela ligação entre o centro comercial e os diversos bairros da cidade.

De acordo com o *Highway Capacity Manual* (TRB, 2000) define-se como via arterial, urbana ou suburbana, vias compostas por interseções semaforizadas (com espaçamento máximo de aproximadamente 3,2km), atendendo principalmente a um tráfego de passagem, e cujos movimentos de conversão nas interseções não ultrapassam a 20% do volume de tráfego total.

É, portanto, necessário que se tenha uma atenção especial para com o desempenho desses corredores, tendo em vista os seus fortes impactos sobre a qualidade da operação de toda a malha viária da cidade. Uma das maneiras mais eficazes de se otimizar a operação desses corredores, é por meio da coordenação dos semáforos no sentido de favorecer o escoamento do fluxo de veículos. Há três métodos principais de coordenação de semáforos nas artérias, a saber:

- Sistema Simultâneo – todos os sinais ao longo da via apresentam o mesmo comportamento com relação ao tráfego, abrindo e fechando simultaneamente;
- Sistema Alternado – as indicações luminosas dos semáforos adjacentes são sempre opostas;
- Sistema Progressivo – permite que, em uma velocidade pré-determinada, um pelotão de veículos percorra toda artéria em um movimento contínuo, por meio de um acionamento progressivo do início do tempo de verde do semáforo de cada. Esse sistema é conhecido na prática como “onda verde”.

A definição do sistema mais adequado a uma determinada artéria, depende de alguns fatores intervenientes, tais como: as distâncias entre as interseções; a velocidade do tráfego; o tempo de ciclo (deve ser constante em todas as interseções do corredor); a capacidade da via; e, as interferências locais (estacionamento, travessia de pedestres, carga e descarga e movimentos de conversão). Assim, além desses fatores, vai pesar nessa escolha a estratégia de controle de tráfego desejada, mas estudos mostram que o sistema progressivo é o que, de um modo geral, apresenta os melhores resultados.

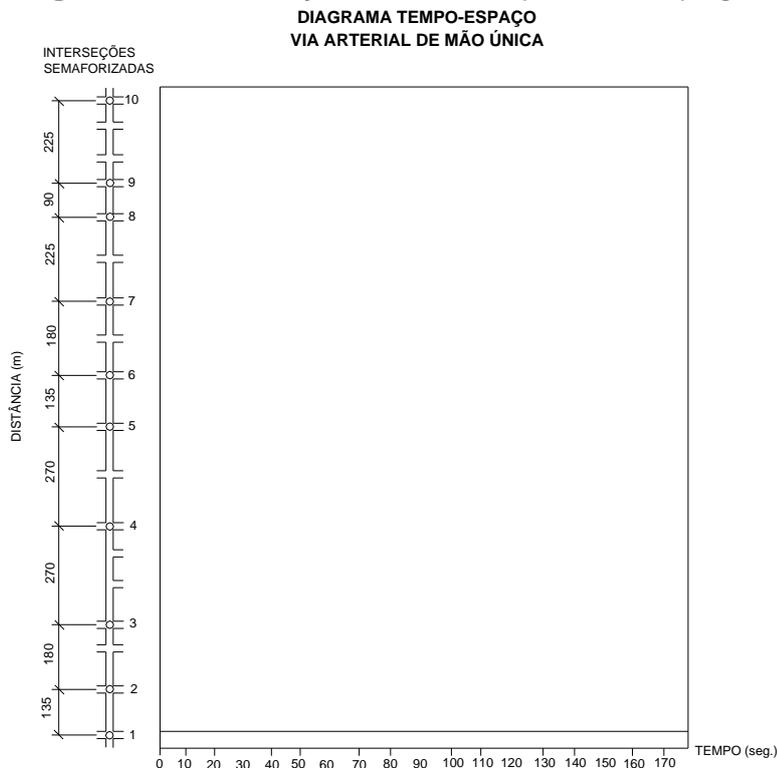
4.3 Sincronização pelo sistema progressivo (método “onda verde”)

4.3.1 Vias de mão única

O procedimento a seguir é usado para o desenvolvimento de planos semaforicos sincronizados em vias arteriais de mão única:

- 1ª Etapa – Cálculo dos tempos de ciclo ótimo dos semáforos de cada interseções do corredor, isoladamente, adotando-se o tempo de ciclo do semáforo crítico, como sendo o tempo de ciclo comum de todas as interseções;
- 2ª Etapa – Determinação da velocidade de progressão desejada;
- 3ª Etapa – Elaboração do diagrama espaço-tempo, representando o corredor com todas as suas interseções semaforizadas, ao longo do eixo vertical (figura 33);

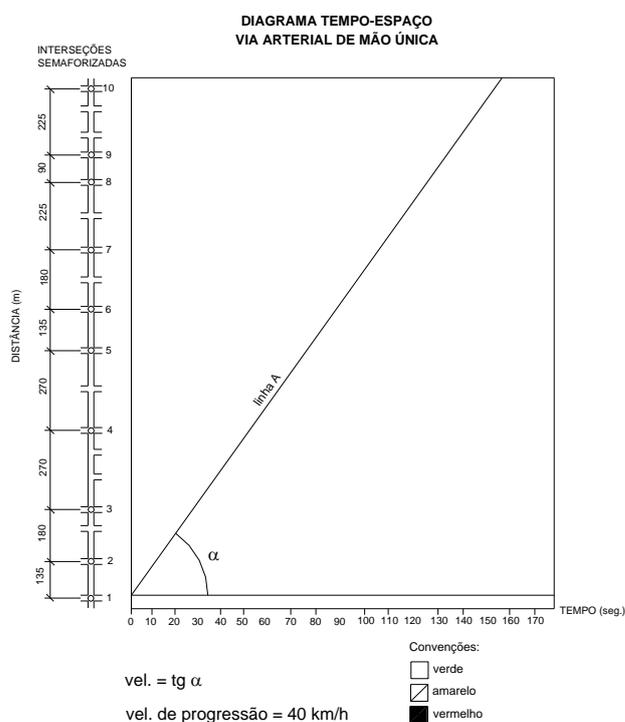
Figura 33 – Sincronização de semáforos pelo sistema progressivo (3ª etapa)



Fonte: Produção do próprio autor.

4ª Etapa – Desenho da linha de construção A, em diagonal no diagrama, cuja inclinação representa a velocidade de progressão desejada, e indica o limite inicial da banda de passagem (figura 34);

Figura 34 – Sincronização de semáforos pelo sistema progressivo (4ª etapa)



Fonte: Produção do próprio autor.

5ª Etapa – Construção das fases dos ciclos em cada interseção, de maneira tal que o início do período de verde seja colocado na linha de construção A, em cada interseção;

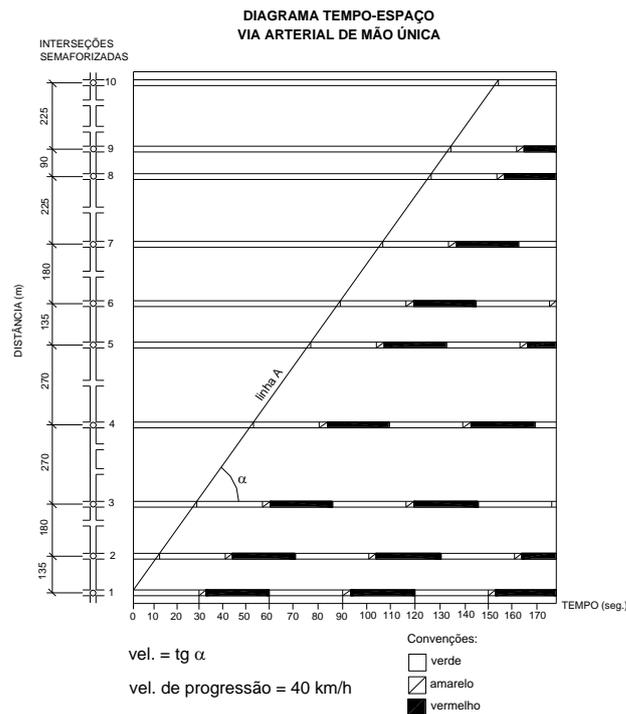
6ª Etapa – Desenho da linha de construção B, paralela à linha A, indicando o limite final da banda de passagem. Caso todos os semáforos possuam tempos de verde iguais, a largura da banda de passagem é igual a um período de verde mais o tempo de amarelo da fase. Caso os tempos de verde sejam diferentes entre os semáforos, a largura da banda de passagem é dada pelo menor período de verde mais o tempo de amarelo;

7ª Etapa – Determinação das defasagens, medindo-se os deslocamentos do início dos períodos de verde das interseções individuais em relação ao início do período de verde do semáforo base.

Exemplo 17: A partir do dimensionamento dos semáforos da via arterial dada na figura 33, identificou-se o semáforo crítico, o qual apresenta um tempo de ciclo de 60 segundos e um tempo de verde + amarelo de 30 segundos. Considerando-se que se deseja uma velocidade de progressão de 40 km/h (sentido de progressão do semáforo da interseção nº 1 para o semáforo da interseção nº 10), desenvolver o plano de sincronização dos semáforos desse corredor pelo sistema progressivo.

- Construção da linha A com inclinação de 40 km/h (figura 34);
- Construção das fases dos semáforos, em cada interseção, com o início do período verde na linha A (figura 35);

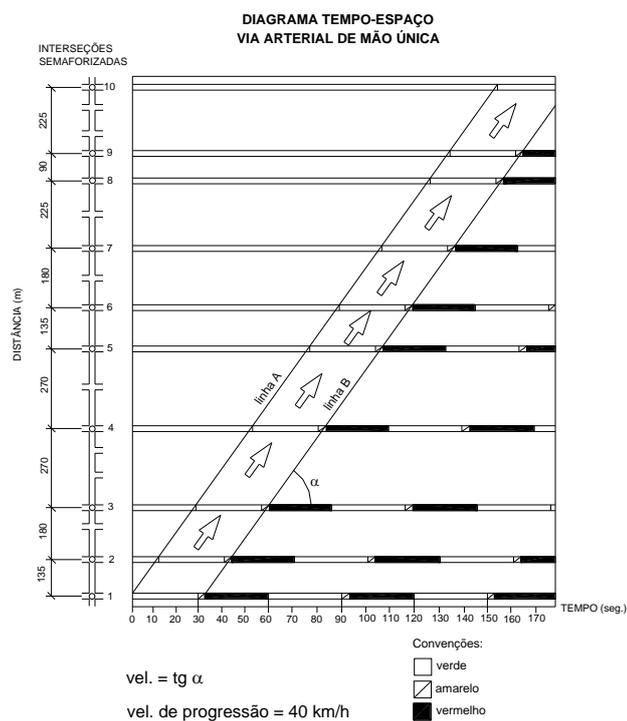
Figura 35 – Sincronização de semáforos pelo sistema progressivo (5ª etapa)



Fonte: Produção do próprio autor.

- Traçado da linha B da banda de passagem. Considerando-se que todos os períodos de verde mais amarelo sejam iguais, a largura da banda seria de 30 segundos, tempo de verde mais amarelo (figura 36);

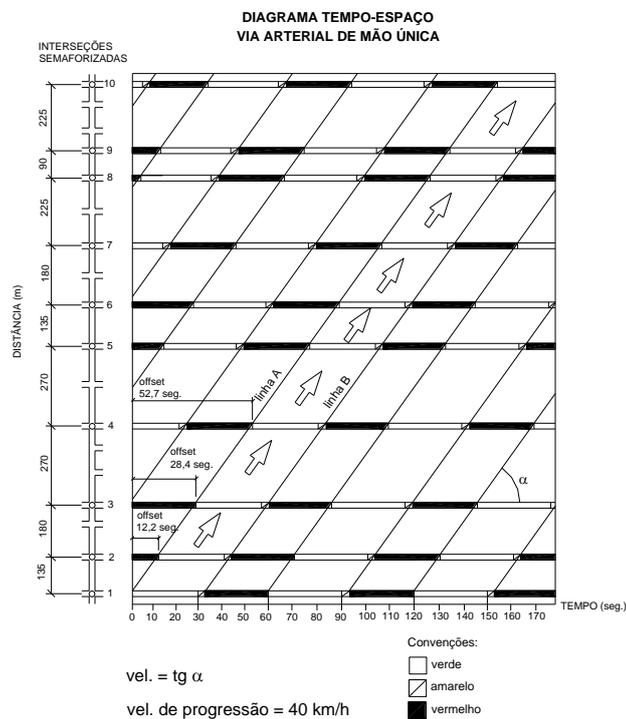
Figura 36 – Sincronização de semáforos pelo sistema progressivo (6ª etapa)



Fonte: Produção do próprio autor.

- Considerando-se o semáforo nº 1 como a referência de controle (defasagem igual a zero), as demais linhas de construção são desenhadas indicando as defasagens (figura 37)

Figura 37 – Sincronização de semáforos pelo sistema progressivo (7ª etapa)



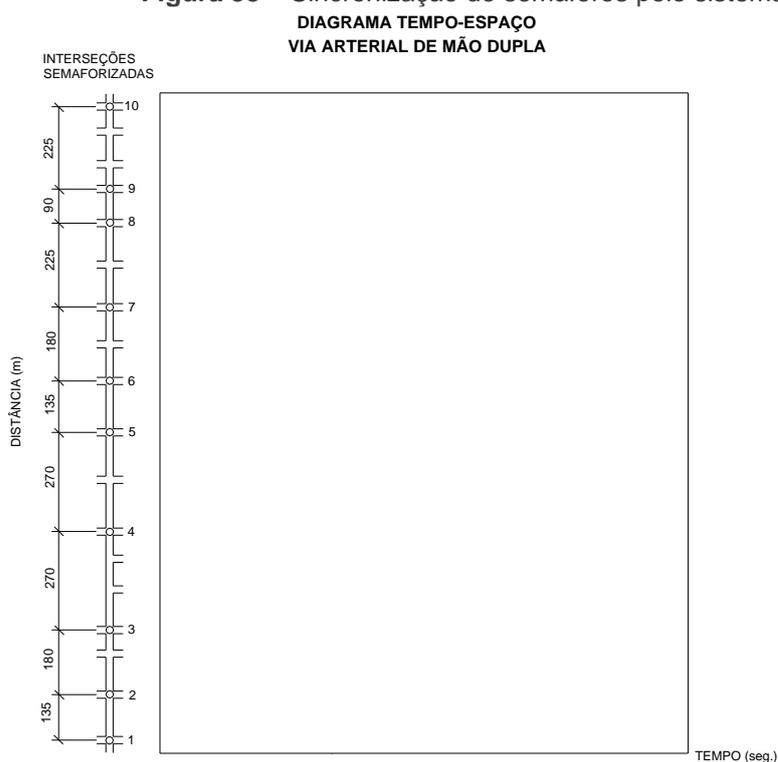
Fonte: Produção do próprio autor.

4.3.2 Vias de mão dupla

Os procedimentos para elaboração de um diagrama de onda verde para vias de mão dupla, seguem o mesmo raciocínio visto para as vias de mão única, e devido às restrições construtivas da metodologia, os dois sentidos de tráfego recebem o mesmo tratamento, sendo que o sentido mais crítico é tratado com prioridade. Para facilitar a compreensão das suas etapas, um projeto exemplo será desenvolvido paralelamente na medida em que cada etapa for sendo descrita.

1a Etapa – Desenho do esquema básico do diagrama espaço-tempo (figura 38);

Figura 38 – Sincronização de semáforos pelo sistema progressivo (1ª etapa)



Fonte: Produção do próprio autor.

2ª Etapa – Desenho de uma linha vertical (“linha de trabalho”) traçada mais ou menos no centro da folha do diagrama (figura 39);

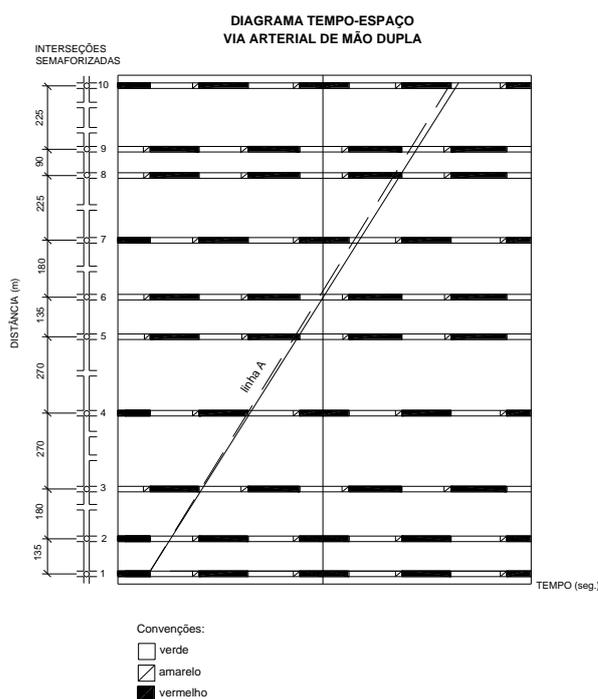
3ª Etapa – Estabelecimento de um tempo de ciclo (normalmente arbitrário e sem valor numérico). Somente ao final do desenho do diagrama espaço-tempo é que o ciclo real é determinado, sendo que o comprimento de um ciclo deverá corresponder a aproximadamente 1/4 do eixo do tempo, eixo horizontal;

4ª Etapa – Cálculo (em valores percentuais) da divisão do ciclo entre os períodos de vermelho e de verde mais amarelo, para as aproximações de cada interseção. Mas, para efeito de simplificação da construção do diagrama espaço-tempo, pode-se trabalhar com uma divisão média do ciclo (50% para vermelho e 50% para verde mais amarelo), ajustando-se posteriormente cada divisão;

5ª Etapa – Desenho das fases do semáforo na linha horizontal da interseção 1, de maneira tal que o ponto médio do período de verde mais amarelo ou do período de vermelho fique exatamente sobre a “linha de trabalho”. Esse procedimento serve para assegurar que o diagrama fique simétrico proporcionando a ambos os sentidos de tráfego a mesma preferência (figura 39);

6ª Etapa – Traçado de uma linha temporária de construção, partindo do início do primeiro período de verde da primeira interseção, com uma declividade tal que faça com que ela termine um pouco à esquerda do canto superior direito do gráfico (linha A tracejada, figura 39). Neste exemplo, uma linha com uma declividade igual a meio ciclo por 300 m;

Figura 39 – Sincronização de semáforos pelo sistema progressivo (2ª à 8ª etapa)



Fonte: Produção do próprio autor.

7ª Etapa – Construção das fases dos semáforos das demais interseções sinalizadas, centrando um período de verde mais amarelo, ou um período de vermelho, na linha de trabalho de modo a colocar o início de um período de verde o mais próximo possível da linha A tracejada.

8ª Etapa – Ajuste da inclinação da linha de construção A, de modo que essa linha fique dentro do período de verde mais amarelo de todas as fases. A posição final da linha A está representada na figura 39 com um traço contínuo, e representa o início da banda de passagem;

9ª Etapa – Determinação do tempo de ciclo, caso não tenha sido determinado previamente, tal que proporcione a velocidade de progressão desejada. A inclinação da última linha de construção (A contínua) indica a velocidade de progressão da via,

portanto, basta graduar o eixo horizontal do tempo de modo que essa velocidade seja obtida (figura 40);

Procedimento para a determinação do tempo de ciclo:

- i. A inclinação da linha A ajustada indica a velocidade de progressão da via. Neste exemplo, a distância entre o primeiro e o último semáforo é de 1.710 m. Pelo gráfico, o tempo para percorrer essa distância é de 183,6 s (3,06 ciclos de 60 s). De acordo com o manual de semáforos do DENATRAN (1984), a velocidade de progressão pode ser estimada pela equação 28.

$$v = \frac{dist. \times 3,6}{n^{\circ} \text{ de Ciclos}} \quad (28)$$

- ii. Assim, podem ser realizadas simulações no sentido de se identificarem as velocidades de progressão para vários tempos de ciclo e, assim, selecionar o ideal para as condições de fluxo da via e estratégias de progressão (tabela 8).

Tabela 8 – Velocidades de progressão por tempo de ciclo

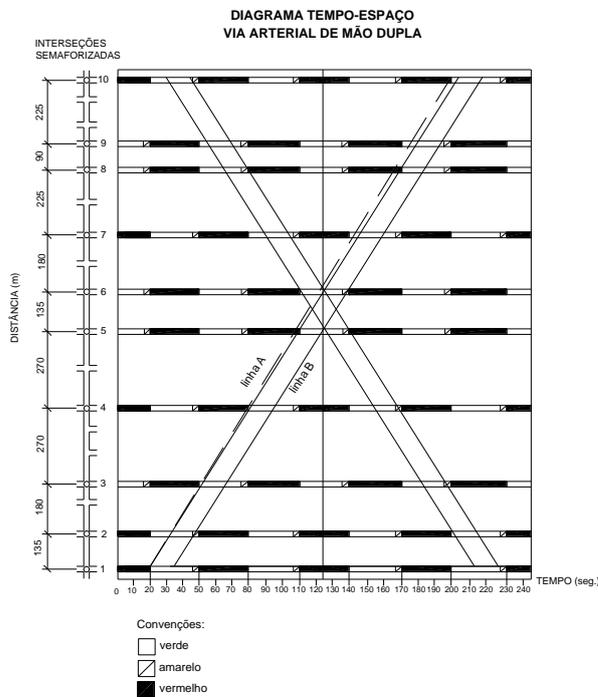
Tempo de Ciclo (s)	Velocidade de Progressão (km/h)
40	50,3
45	44,7
50	40,2
55	36,6
60	33,5

Fonte: DENATRAN (1984).

- iii. Caso o limite de velocidade desejado seja de aproximadamente 40 km/h, esse valor poderá ser adotado se

o dimensionamento isolado, das interseções, tiver indicado ciclos abaixo de 50 s.

Figura 40 – Sincronização de semáforos pelo sistema progressivo (9ª e 10ª etapas)



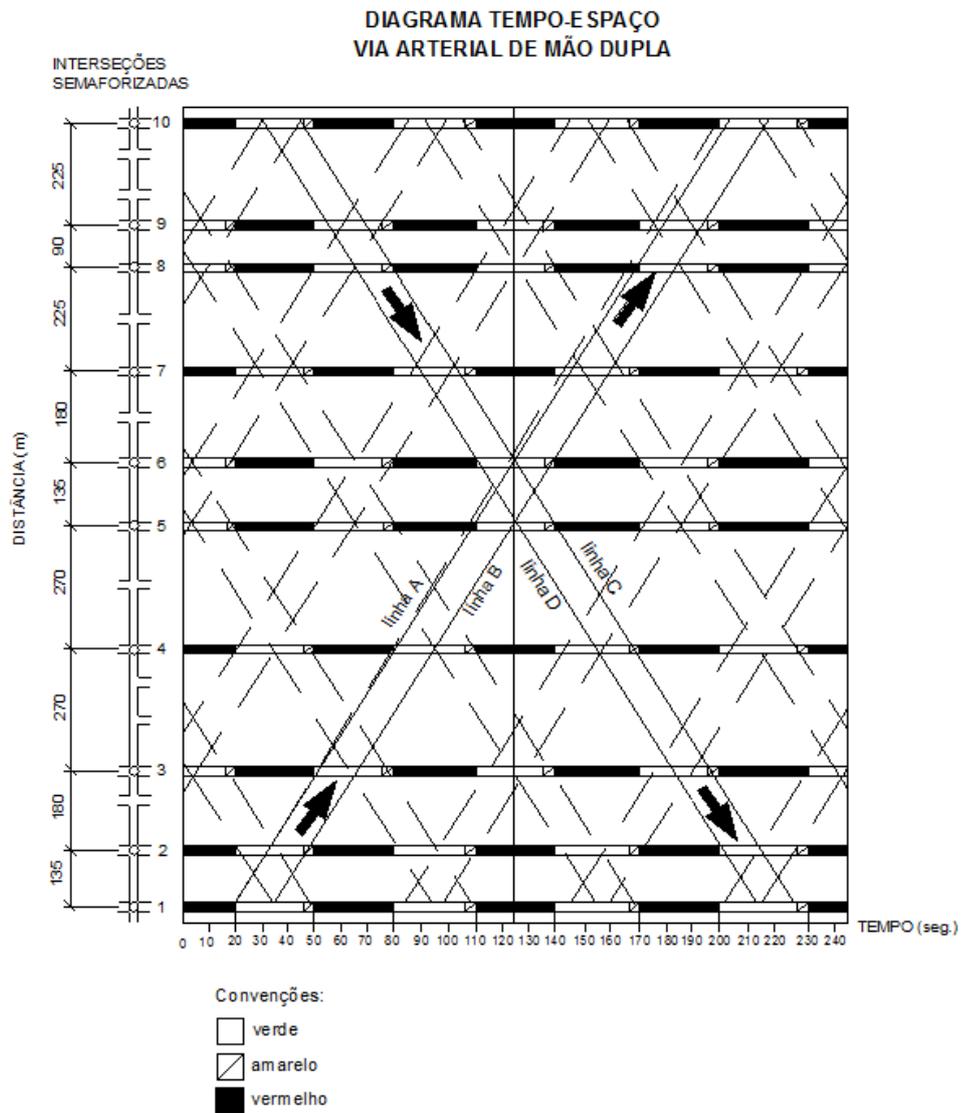
Fonte: Produção do próprio autor.

10ª Etapa – Construção da linha final da banda de passagem (linha B), traçando-se uma paralela à última linha auxiliar de construção (A contínua), de modo que esta linha intercepte todas as fases dos semáforos em períodos de verde mais amarelo do tempo de ciclo (figura 40).

11ª Etapa – Construção da banda de passagem para o sentido oposto, representada pelas linhas C e D, sendo que, em virtude de restrições construtivas, essa faixa é aproximadamente igual em largura e inclinação à anterior (figura 41);

12ª Etapa – Elaboração do diagrama espaço-tempo completo mostrando todas as bandas de passagem (figura 41).

Figura 41 – Sincronização de semáforos pelo sistema progressivo (11ª e 12ª etapas)



Fonte: Produção do próprio autor.

REFERÊNCIAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. Norma Brasileira ABNT NBR 7995:2013. Sinalização semafórica — Grupo focal semafórico em alumínio. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. *Norma Brasileira ABNT NBR 15889:2019*. Sinalização semafórica – Foco semafórico com base em diodos emissores de luz (LED). Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

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

CET-SP - Companhia de Engenharia de Tráfego de São Paulo. Dimensionamento do entreverdes. Notas Técnicas (NT 212), 2010.

CET-SP - Companhia de Engenharia de Tráfego de São Paulo. Conceituação de entreverdes. Notas Técnicas (NT 258), 2019.

DENATRAN – Departamento Nacional de Trânsito. *Manual de Semáforos*. 2ª Edição. Ministério da Justiça, Brasília, 1984.

DENATRAN. *Código de Trânsito Brasileiro*: instituído pela Lei no 9.503, de 23-09-97 – 1ª Edição. Brasília, 2008.

DENATRAN – Departamento Nacional de Trânsito. *Manual Brasileiro de Sinalização de Trânsito. Volume V - Sinalização Semafórica*. Ministério das Cidades Justiça, Brasília, 2014.

DENATRAN – Departamento Nacional de Trânsito. *Frota de veículos*. Ministério das Cidades, Brasília, 2015. Disponível em: < <http://www.denatran.gov.br/frota.htm>>. Acesso em: 03/08/2015.

DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. *Manual de Estudos de Tráfego*. Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Rio de Janeiro, 2006.

TRB - Transportation Research Board. *Highway Capacity Manual. Special Report 209*. National Research Council. Washington, D.C., U.S.A., 2000.

Webster, F.B. e B.M. Cobbe. Traffic Signals. *Road Research Technical Paper*, nº 56, London, Inglaterra, 1966.

Agência Brasileira ISBN
ISBN: 978-65-81028-19-0.