



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO JOÃO DEL-REI
Departamento de Tecnologia em Engenharia Civil, Computação e
Humanidades (DTECH)
Coordenadoria do curso de Engenharia Civil

MARCELO DE OLIVEIRA BOTREL
RAPHAEL HENRIQUE COSTA

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO
Estudo de Caso: Sinalização Semafórica da Avenida Telésforo Cândido de
Resende – Conselheiro Lafaiete / MG

OURO BRANCO - MG
DEZEMBRO DE 2014

MARCELO DE OLIVEIRA BOTREL
RAPHAEL HENRIQUE COSTA

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Estudo de Caso: Sinalização Semafórica da Avenida Telésforo Cândido de Resende – Conselheiro Lafaiete / MG

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação do Curso de Engenharia Civil – Ênfase em Estruturas Metálicas, da Universidade Federal de São João Del-Rei, *Campus* Alto Paraopeba, como requisito obrigatório para a conclusão do curso.

Prof. Orientador: Leandro Neves Duarte

Prof. Co-orientador: Tales Moreira de Oliveira

OURO BRANCO-MG
DEZEMBRO DE 2014

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradecemos ao quadro de professores do curso de Engenharia Civil com Ênfase em Estruturas Metálicas da Universidade Federal de São João Del-Rei – Campus Alto Paraopeba, por todo esforço e dedicação na formação de profissionais responsáveis e voltados para os valores éticos da sociedade.

Agradecemos a todos os amigos que nas horas mais difíceis não pouparam esforços e incentivos à realização deste trabalho.

Agradecemos aos pais e familiares por serem a fundação sólida na nossa formação como seres humanos e pelo apoio à conclusão deste projeto.

Finalmente, agradecemos em especial aos Professores Tales Moreira de Oliveira e Leandro Neves Duarte por todo o apoio técnico, ensinamentos e paciência no decorrer dessa caminhada.

RESUMO

Nos dias de hoje, as grandes e pequenas cidades do Brasil têm demonstrado dificuldades em driblar os problemas relacionados à engenharia de tráfego. O aumento da frota veicular, a falta de planejamento urbano e o baixo desenvolvimento da engenharia de tráfego afetam diretamente a qualidade da locomoção nas cidades. O desenvolvimento de técnicas e estudos voltados para a engenharia de tráfego se mostra essencial para enfrentar os desafios do transporte urbano de forma segura e planejada.

Os centros das cidades reúnem um grande leque de atividades que acarretam no aumento do tráfego local, e de forma a regulamentar o tráfego da elevada quantidade de veículos, se faz-se necessária a utilização de dispositivos de controle viário como a sinalização semafórica. A fim de obter o melhor desempenho desses dispositivos, é necessário rever os conceitos sobre sua utilização e sua programação de modo a obter fluxos mais eficientes para pedestres e veículos.

A interseção entre a avenida Telésforo Cândido de Resende e a rua Jacinto Siqueira, na região central da cidade de Conselheiro Lafaiete/MG, apresenta elevado fluxo de veículos. A avenida Telésforo Cândido de Resende, por ser uma das mais importantes avenidas da cidade, ligando bairros à *shoppings*, rodoviária, terminal de integração de transporte urbano, centros de serviços públicos e comércio, enfrenta grandes filas nas sinalizações semafóricas, e o fluxo de veículos não se dá de forma satisfatória, o que causa transtorno aos usuários da via.

Levando em consideração as dificuldades evidenciadas na interseção semafórica mencionada, este estudo de caso tem como objetivo realizar estudos de tráfego para verificar a legitimidade da programação semafórica em uso e justificar possíveis alterações e medidas a serem implantadas no âmbito da programação semafórica. Este estudo tem como propósito otimizar a programação do semáforo em pauta para melhorar o escoamento de veículos na região central deste município.

Palavras-chave: Sinalização Semafórica, Engenharia de Tráfego Urbano, Estudos de Tráfego, Interseções.

ABSTRACT

Nowadays, big and small cities in Brazil have shown some difficulty to resolve the problems related to traffic engineering. The constant growth of vehicle fleet, the lack of urban planning and development of traffic engineering directly affects the urban mobility quality. The development of techniques and studies focused on traffic engineering are essential to face the challenges of urban transport in a planned way.

Town centers bring together a wide range of activities, which leads to the increase of local traffic. In order to control the traffic of the high amount of vehicles, the use of road control devices such as traffic lights is considered necessary. In order to obtain the best performance of these devices, it is necessary to review the concepts of its use and programming in reason to achieve more efficient flows for pedestrians and vehicles.

In the intersection between the Telésforo Cândido de Resende Avenue and the Jacinto Siqueira Street at the central area in the city of Conselheiro Lafaiete, Minas Gerais, there is a high flow of vehicles. The Telésforo Cândido de Resende Avenue is one of the most important avenues of the city, connecting neighborhoods to the shopping malls, bus stations, urban transport integration terminal, public service centers and stores. Consequently, there are long lines at traffic lights and the traffic flow is not satisfactory, which causes inconvenience to the users.

Considering the difficulties, which highlighted in this traffic light intersection, this case study aims to optimize the programming of this traffic light to improve the flow of vehicles in the central region of this city.

Keywords: Traffic Lights, Urban Traffic Engineering, Traffic Studies, Intersections.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Fator de Equivalência de UCP	24
Tabela 2: Tabela de Movimentos Conflitantes da Interseção Estudada	28
Tabela 3: Diagrama de Intervalos da Interseção	31
Tabela 4: Número de veículos referente ao Estágio G1	53
Tabela 5: Número de veículos referente ao Estágio G2	54
Tabela 6 - Fluxo de veículos conforme movimento, referente ao Estágio G2	54

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Diagrama de Movimentos Conflitantes	14
Figura 2: Procedimentos para a implantação e avaliação da sinalização semafórica	17
Figura 3: Ilustração do conceito de grupo de movimentos e grupo semafórico	19
Figura 4: Componentes do Grupo Semafórico	20
Figura 5: Exemplos de Diagrama de Estágios.....	22
Figura 6: Variação da taxa de descarga de uma fila em um período de verde saturado.	25
Figura 7: Cruzamento escolhido para o estudo de caso isolado, localizado no município de Conselheiro Lafaiete, MG.....	27
Figura 8: Diagrama de Conflitos da interseção estudada	28
Figura 9: Diagrama de Estágios.....	29
Figura 10: Av. Telésforo Cândido de Resende (Estágio G1).....	30
Figura 11: Rua Jacinto Siqueira - interseção Av. Telésforo Cândido de Resende (Estágio G2)	30
Figura 12: Av. Telésforo Cândido de Resende (Estágio G2).....	31
Figura 13: Método utilizado para o processamento dos dados	34
Figura 14: Método utilizado para o cálculo do UCP em cada intervalo de tempo	35
Figura 15: Histograma corresponde ao Estágio G1	35
Figura 16: Histograma corresponde ao Estágio G2.....	36
Figura 17: Sinalização semafórica com temporizador	39
Figure 18: Diagrama de Intervalos Projetado	44
Figura 19: Inclinação da Via.....	55

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Fluxo de veículos referente ao Estágio G1	53
Gráfico 2: Fluxo de veículos referente ao Estágio 2	54

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	3
RESUMO	4
ABSTRACT	5
LISTA DE TABELAS	6
LISTA DE FIGURAS	7
LISTA DE GRÁFICOS.....	8
1. INTRODUÇÃO	11
2. OBJETIVOS	12
3. REFERENCIAL TEÓRICO.....	12
3.1 Considerações Iniciais	12
3.2 Estudo dos Movimentos numa Interseção	13
3.2.1 Definições	13
3.2.2 Gerenciamento de Conflitos	15
3.3 Critérios para Implantação de Sinalizações Semafóricas.....	15
3.3.1 Critérios para Estudos em Locais Existentes: Abordagem de Veículos	18
3.4 Conceitos Básicos	18
3.4.1 Sinalização Semafórica	18
3.4.2 Grupo Semafórico	19
3.4.3 Componentes do Grupo Semafórico.....	20
3.4.4 Estágio.....	21
3.4.5 Tempo de Amarelo	21
3.4.6 Tempo de Vermelho de Segurança	21
3.4.7 Tempo de Entreverdes	22
3.4.8 Ciclo.....	22
3.4.9 Diagrama de Estágios	22
3.5 Programação Semafórica.....	23
3.5.1 Considerações Iniciais.....	23
3.5.2 Unidade de Carros de Passeio	23
3.5.3 Fluxo.....	24
3.5.4 Fluxo de Saturação	24
3.5.5 Capacidade	25
3.5.6 Método de <i>Webster</i>	26
3.5.7 Plano Semafórico.....	26
3.5.8 Sistema Isolado e Monoplano.....	26
4. METODOLOGIA E RESULTADOS	27
4.1 Considerações Iniciais	27
4.2 Método de <i>Webster</i>	32
4.3 Escolha do Método de Coleta de Dados.....	32
4.4 Método de Armazenamento e Organização dos Dados	32
4.5 Processamento dos Dados	33
4.6 Cálculo do Fluxo de Saturação	36

4.6.1	Fluxo de Saturação do Estágio G1	36
4.6.2	Fluxo de Saturação do Estágio G2	37
4.7	Cálculo do Tempo Perdido	37
4.7.2	Tempo Perdido no Estágio G1	37
4.7.3	Tempo Perdido no Estágio G2	39
4.8	Cálculo do Tempo de Entreverdes	40
4.8.1	Tempo de Amarelo	40
4.8.2	Tempo de Vermelho Geral	40
4.8.3	Tempos de Entreverdes	41
4.9	Taxa de Ocupação	42
4.10	Tempo Perdido Total	43
4.11	Cálculo do Tempo de Ciclo Ótimo	43
4.12	Cálculo da Capacidade da Interseção	45
4.13	Estágio de Pedestres	45
4.14	Análise Complementar	46
4.14.1	Programação Proposta	46
4.14.2	Programação Existente	47
5.	CONCLUSÕES	48
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	50
	ANEXOS	53
	Anexo: Fluxo de Veículos – Estágio G1	53
	Anexo: Fluxo de Veículos - Estágio G2	54
	Anexo: Inclinação da Via	55

1. INTRODUÇÃO

Segundo estatísticas do DENATRAN do ano de 2014, o Brasil atingiu uma das maiores frotas de veículos do mundo neste mesmo ano. Conforme os dados do instituto, no ano de 1998, a frota nacional era de 24.361.347 de veículos, enquanto em 2014, a frota é de 84.063.191 de veículos. Portanto, a frota se tornou quase 3,5 vezes maior que a de 16 anos antes. Com o crescimento contínuo da frota de veículos do país, faz-se necessária a criação de mecanismos que regule o fluxo veicular urbano com a finalidade de melhorar o escoamento do tráfego e, principalmente, reduzir o índice de acidentes. Neste sentido, diversos dispositivos da engenharia de tráfego estão à disposição. Dentre eles, são comuns os semáforos em interseções de risco que possuam altos volumes de aproximações de veículos e pedestres.

O semáforo foi inventado por John Pake Knight, Engenheiro Ferroviário da linha Londres-Brighton, na Inglaterra, em 1868. Knight propôs o semáforo após as trágicas estatísticas de acidentes rodoviários no ano de 1866 que mataram 1.102 pessoas e deixaram outras 1334 feridas. O semáforo proposto por Knight era uma lanterna funcionada à gás e, mais tarde, em 1910, o semáforo automático seria utilizado pela primeira vez em Chicago, Illinois, nos Estados Unidos da América (Day, Lance; Ian McNeil, 1996).

O semáforo é uma importante ferramenta utilizada na Engenharia de Tráfego Urbano e, muitas vezes, a sua utilização é questionada por, possivelmente, gerar interrupções no escoamento do tráfego. Mesmo que comprovadamente necessária, a programação semaforica deve visar a minimização do número de paradas que, além de gerar desconforto ao usuário, aumenta o consumo de combustível e a emissão de poluentes. Portanto, torna-se necessária a realização de um estudo detalhado para justificar a utilização dos semáforos e para realizar a programação dos mesmos (Manual Brasileiro de Sinalização de Trânsito, Vol. 5).

Este trabalho consiste no estudo de caso de uma interseção de vias com sinalização semaforica da cidade de Conselheiro Lafaiete, Minas Gerais, cujo crescimento demográfico tem apresentado índices expressivos. Tal fato se deve, principalmente, pela expansão da atividade minero-metalúrgica na região, que reflete diretamente no desenvolvimento econômico da cidade, na imigração de mão

de obra e, conseqüentemente, no aumento de veículos e pedestres em circulação, em especial no centro da cidade, onde concentra-se grande parte da atividade comercial. Entretanto, o planejamento do trânsito da cidade não acompanhou o desenvolvimento demográfico e econômico da região, o que resultou em congestionamento de veículos e lentidão em alguns pontos centrais.

Entre os principais problemas encontrados no trânsito da cidade de Conselheiro Lafaiete, pode-se citar a falta de manutenção e sincronia entre as sinalizações semaforicas, dentre outros. Neste trabalho, serão analisados os problemas na Avenida Telésforo Cândido de Resende e, posteriormente, serão apresentadas possíveis soluções. Deste modo, poderão ser elaboradas propostas, através de medidas de caráter imediato, que demandam custos relativamente baixos e que tendem a melhorar parcialmente o trânsito, além de medidas de caráter definitivo, que em caso de execução, demandam um estudo mais aprofundado da região.

2. OBJETIVOS

O presente estudo de caso tem como objetivo avaliar o sistema de sinalização semaforica em uso na interseção entre a Avenida Telésforo Cândido de Resende e Rua Jacinto Siqueira, na região central do município de Conselheiro Lafaiete/MG a fim da elaboração de novo projeto de programação de semáforo baseado em levantamentos de fluxo e fluxo de saturação de veículos *in situ* pelo método de *Webster* com a finalidade de propor melhorias e soluções de caráter técnico para o caso em estudo.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Considerações Iniciais

O referencial teórico utilizado neste trabalho pretende aprofundar os conhecimentos técnicos na Engenharia de Tráfego Urbano no âmbito das Sinalizações Semaforicas, no que se relacionam aos critérios de instalação, fluxo de saturação, tipo de controladores e programação de semáforos a partir do método de *Webster* para a determinação do Tempo de Ciclo Ótimo. Os seguintes referenciais

teóricos e conceitos básicos necessários para o entendimento do tema tomaram como base o Manual de Semáforos do DENATRAN, publicado em 1984, e o Manual Brasileiro de Sinalização de Trânsito, Volume V.

O Manual Brasileiro de Sinalização de Trânsito, Volume V, Capítulo 4, estabelece os principais aspectos da sinalização semafórica, através dos quais, deve-se tomar a decisão quanto à utilização ou não dessa sinalização. Caso seja necessária a implantação, os critérios abordados a seguir devem ser seguidos para que a utilização da sinalização semafórica seja tecnicamente aconselhável, de forma a garantir a segurança de veículos e pedestres, transmitindo também uma maior eficiência aos sistemas de trânsito, conferindo o maior conforto que se pode obter.

3.2 Estudo dos Movimentos numa Interseção

As vias que se interceptam em uma interseção são classificadas em principais e secundárias. As vias principais são aquelas que tem maior volume de tráfego em relação àquelas que a interceptam. As demais vias são denominadas secundárias (Manual Brasileiro de Sinalização de Trânsito - Volume V).

3.2.1 Definições

O primeiro conceito tratado pelo Manual Brasileiro de Sinalização de Trânsito, é o de movimento, que é usado para identificar o fluxo de veículos que têm a mesma origem e mesmo destino, e/ou o fluxo de pedestres que se deslocam na mesma direção, mas não necessariamente no mesmo sentido. O segundo conceito é o de aproximações, que consiste nos trechos de via por onde os veículos chegam à interseção. A seguir, na **Figura 1**, está ilustrado exemplos de aproximações.

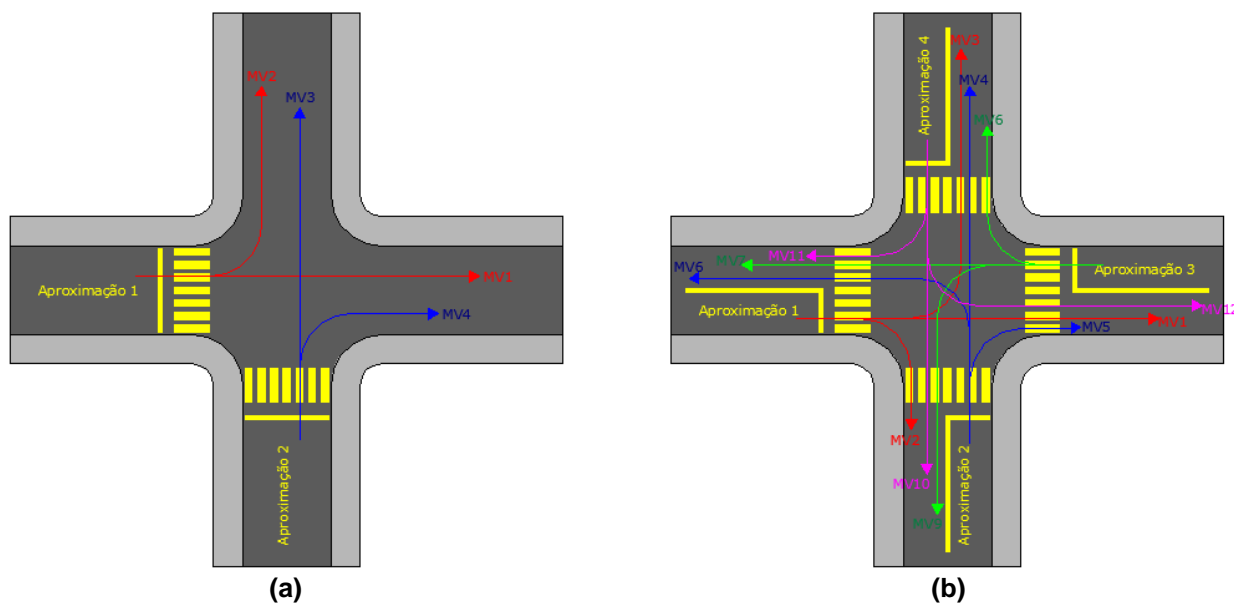


Figura 1: Diagrama de Movimentos Conflitantes

(a) Interseção de vias mão única;
 (b) Interseção de vias de mão dupla;
 Fonte: Manual Brasileiro de Sinalização de Trânsito

Definem-se também conceitos de movimentos em uma interseção, quanto à interação de suas trajetórias, conforme descrito abaixo:

- a) **Convergentes:** têm origem em diferentes aproximações e possuem mesmo destino;
- b) **Divergentes:** têm origem na mesma aproximação e possuem destinos diferentes;
- c) **Interceptantes:** têm origem em aproximações diferentes e que se cruzam em algum ponto da área de conflito;
- d) **Não-interceptantes:** são aqueles cujas trajetórias não se encontram em nenhum ponto da área de conflito.

Já para efeito do controle semafórico, os movimentos podem ser classificados como:

- a) **Conflitantes:** origens diferentes cujas trajetórias se interceptam ou convergem em algum ponto da área de conflito;

b) **Não-conflitantes:** aqueles cujas trajetórias não se interceptam nem convergem em nenhum ponto da área de conflito.

Antes que a implantação de uma sinalização semafórica seja efetuada, devem ser analisados todos os conflitos presentes em uma dada interseção. Para isto, deve ser elaborado um Diagrama de Conflitos, que consiste na representação esquemática da geometria da interseção, com a indicação de suas aproximações. Nesta representação devem ser registrados todos os movimentos veiculares e travessias de pedestres, que ocorrem na área da interseção (Manual Brasileiro de Sinalização de Trânsito, Volume V).

3.2.2 Gerenciamento de Conflitos

Segundo o Manual Brasileiro de Sinalização de Trânsito, Vol. 5, o gerenciamento de conflitos deve ser baseado numa análise dos problemas em questão e, posteriormente, as causas, prováveis soluções e exemplos de medidas que podem ser adotados.

3.3 Critérios para Implantação de Sinalizações Semafóricas

Conforme o Manual Brasileiro de Sinalização de Trânsito, Vol. 5, o uso apropriado da sinalização semafórica gera impactos positivos no controle de veículos. Entretanto, devido ao fato da implantação deste sistema produzir interrupções ao fluxo de veículos, antes devem ser analisadas medidas alternativas para o gerenciamento de conflitos em interseções de vias, tais como as relacionadas a seguir:

- a) definição da preferência de passagem;
- b) remoção de interferências que prejudiquem a visibilidade;
- c) melhoria na iluminação;
- d) adequação das sinalizações horizontal e vertical;
- e) redução das velocidades nas aproximações;
- f) adequação na geometria;

- g) proibição de estacionamento;
- h) implantação de refúgios para pedestres;
- i) alteração de circulação;
- j) inversão da preferência de passagem.

De forma resumida, como consta no Manual Brasileiro de Sinalização de Trânsito, o estudo para definir a necessidade e eficácia da implantação da sinalização semafórica deve ser realizado de acordo com os procedimentos da **Figura 2**.

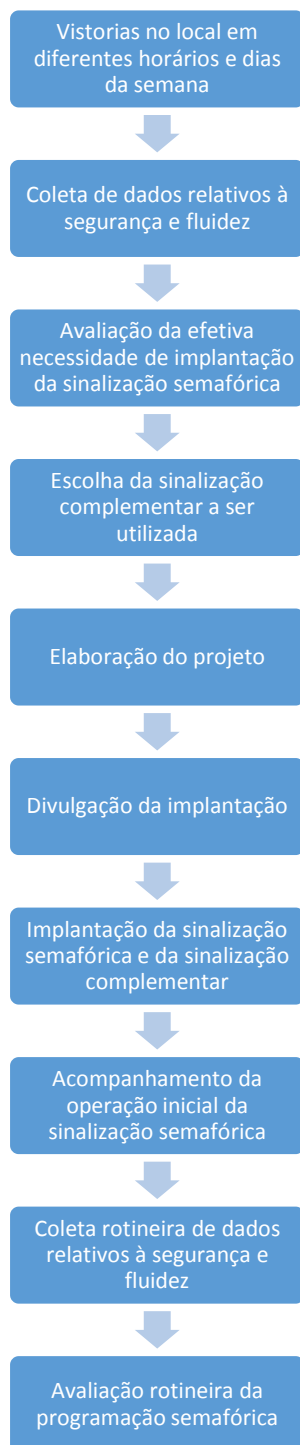


Figura 2: Procedimentos para a implantação e avaliação da sinalização semafórica

Fonte: Adaptado do Manual Brasileiro de Sinalização de Trânsito – Vol. 5

Para que seja feita a implantação da sinalização semafórica, é necessário observar se o local em estudo está em fase de projeto e, posteriormente, a abordagem principal deste, que leva em conta o tipo de usuário que será prioritariamente considerado: veículo ou pedestre (Manual Brasileiro de Sinalização de Trânsito).

3.3.1 Critérios para Estudos em Locais Existentes: Abordagem de Veículos

O Manual Brasileiro de Sinalização de Trânsito, apresenta os critérios a serem considerados para verificação da necessidade da implantação de sinalização semafórica sob a ótica da necessidade dos veículos. Entre estes, citam-se:

- a) Análise do número de colisões com vítima, evitáveis por sinalização semafórica;
- b) Se a condição do local é segura;
- c) Análise de ciclos vazios, que consistem em ciclos sem nenhuma demanda na via secundária;
- e) Analisar os tempos de espera;
- f) E se, na transversal, tempo total de espera indica sinalização semafórica.

3.4 Conceitos Básicos

3.4.1 Sinalização Semafórica

Consiste no subsistema da sinalização viária composto por alertas luminosos que são acionados alternadamente ou intermitentemente através de sistema elétrico e tem como função controlar o fluxo de veículos (Manual de Sinalização Rodoviária DNIT, 2010).

Dentre os tipos de sinalização semafórica, existem dois grupos distintos destinados à usos diferentes, a saber: sinalização semafórica de advertência e sinalização semafórica de regulamentação. A sinalização de advertência sempre utiliza da cor amarela para compor os alertas luminosos que funcionam intermitentemente e tem a função de advertir a existência de obstáculo ou situação perigosa, devendo o condutor reduzir a velocidade e adotar medidas de precaução enquanto trafega. Por outro lado, a sinalização semafórica de regulamentação tem como função controlar o trânsito e alternar o direito de passagem de veículos por interseções. Neste caso, os alertas luminosos utilizados são nas cores vermelho, amarelo e verde como definição abaixo:

- Vermelho: Indica obrigatoriedade de parada antes da interseção.

- Amarelo: Indica “atenção”, devendo o condutor parar o veículo para evitar situações de perigo.

- Verde: Indica permissão de prosseguir pela interseção.

A sinalização semafórica para pedestres é interpretada de forma análoga, com a exceção da luz amarela que é inexistente neste caso (Manual de Sinalização Rodoviária – DNIT, 2010).

3.4.2 Grupo Semafórico

Segundo o Manual Brasileiro de Sinalização de Trânsito (DENATRAN, 2004), grupo semafórico é tido como o conjunto de grupos focais com indicações luminosas idênticas que controlam grupos de movimentos (pedestres ou veículos) que recebam simultaneamente o direito de passagem, conforme ilustrado na **Figura 3**:

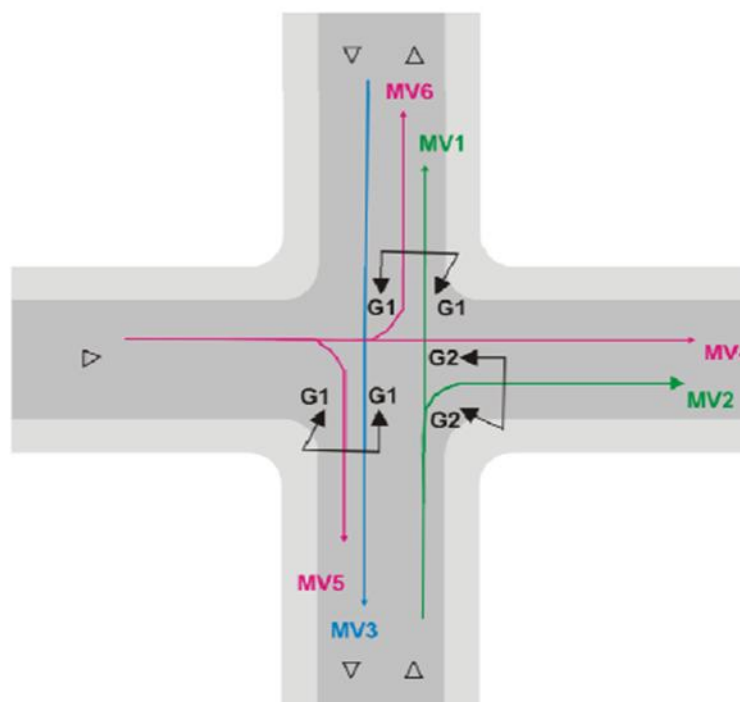


Figura 3: Ilustração do conceito de grupo de movimentos e grupo semafórico

Fonte: Manual de Semáforos do DENATRAN

- Grupo de Movimentos 1: conjunto formado pelos movimentos MV1 e MV2;
- Grupo de Movimentos 2: conjunto formado pelo movimento MV3;
- Grupo de Movimentos 3: formado pelos movimentos MV4, MV5 e MV6;

- Grupo semafórico 1 (G1): conjunto de semáforos que controla os grupos de movimentos 1 e 2;
- Grupo semafórico 2 (G2): conjunto de semáforos que controla o grupo de movimentos 3.

3.4.3 Componentes do Grupo Semafórico

Segundo o anexo II do Código de Trânsito Brasileiro (CTB, 2004):

- Grupo focal: Conjunto formado por dois ou mais focos.
- Foco: Unidade que fornece indicação luminosa.
- Estrutura de suporte: estrutura metálica de alumínio que projeta o semáforo sobre a via.
- Repetidor: Grupo focal que repete a mesma informação em ponto mais baixo para facilitar a visualização da primeira fila de veículos.
- Controlador: Dispositivo eletrônico responsável pelo funcionamento dos grupos focais seguindo a programação efetuada.

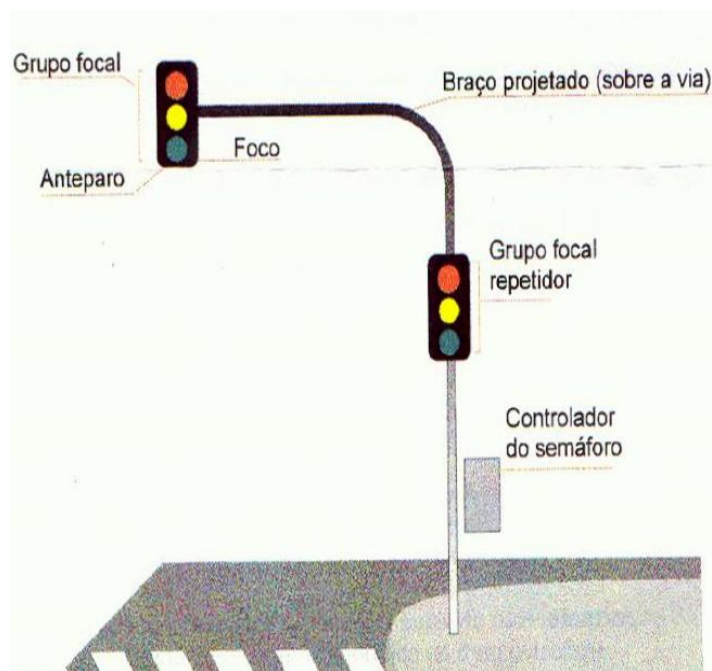


Figura 4: Componentes do Grupo Semafórico

Fonte: Manual de Semáforos do DENATRAN

3.4.4 Estágio

Consiste-se no período de tempo, no qual, um ou mais grupos de movimentos ganham simultaneamente o direito de passagem. Portanto, compreende o tempo de verde e entreverdes (Manual de Semáforos – DENATRAN, 1984).

3.4.5 Tempo de Amarelo

Segundo Vilanova (1985), quando se tem uma transversal muito larga, fica flagrante o perigo a que está exposto o veículo que passa no final do amarelo. O veículo ainda vai estar na área de conflito quando surgir o verde no estágio seguinte (NT 108/85 – Companhia de Engenharia de Tráfego de São Paulo – CET). Se o tempo de amarelo for inferior ao mínimo necessário para que o veículo deixe a região de conflito, acidentes podem ser causados.

O tempo de amarelo é utilizado para alertar o condutor que a permissão de passagem será concedida a outro estágio e, portanto, deve-se reduzir a velocidade do veículo. O tempo de amarelo é calculado de acordo com a velocidade regulamentar da via conforme sua sinalização vertical, ou de acordo com a hierarquia da via, sendo estas: trânsito rápido (não possui semáforo), arterial, coletora e local (Manual de Semáforos – DENATRAN, 1984).

3.4.6 Tempo de Vermelho de Segurança

Em algumas situações, adiciona-se um Tempo de Vermelho de Segurança (“vermelho geral”) após o Amarelo Veicular ou um Tempo de Vermelho Piscante de Pedestres, quando estes não são suficientes para garantir a segurança na transição dos respectivos estágios (EJZENBERG, 1994).

O tempo de vermelho de segurança é o tempo necessário para que o veículo que cruza a interseção ao final da luz amarela possa concluir a travessia sem que ocupe o centro da interseção no momento em que a permissão de passagem é cedida ao próximo estágio. Portanto, o tempo de vermelho de segurança é determinado de acordo com o comprimento do cruzamento, o comprimento do próprio veículo e a velocidade do mesmo (Manual de Semáforos – DENATRAN, 1984).

3.4.7 Tempo de Entreverdes

Período de tempo entre estágios, que se inicia ao final do sinal verde e se finaliza ao início do verde do subsequente. No caso dos semáforos veiculares, a transição é feita por um tempo de sinal amarelo e, em caso de cruzados mais longos, acrescido de um tempo de vermelho geral. Tempos de entreverdes são fundamentais na segurança: são calculados de forma a permitir uma transição segura entre as fases que operam com estágios sucessivos (Pietrantonio, Hugo – Professor Departamento de Engenharia de Transportes da Escola Politécnica da USP).

3.4.8 Ciclo

Ciclo é o tempo necessário para a completa sequência de todos os estágios de uma interseção (NT 174/94 – Companhia de Engenharia de Tráfego de São Paulo).

3.4.9 Diagrama de Estágios

O diagrama de estágios é a representação gráfica dos movimentos que podem ser realizados, sejam estes por veículos ou pedestres, conforme o número de estágios do ciclo (EJZENBERG, 1994). A **Figura 5** mostra um exemplo de diagrama de estágios.

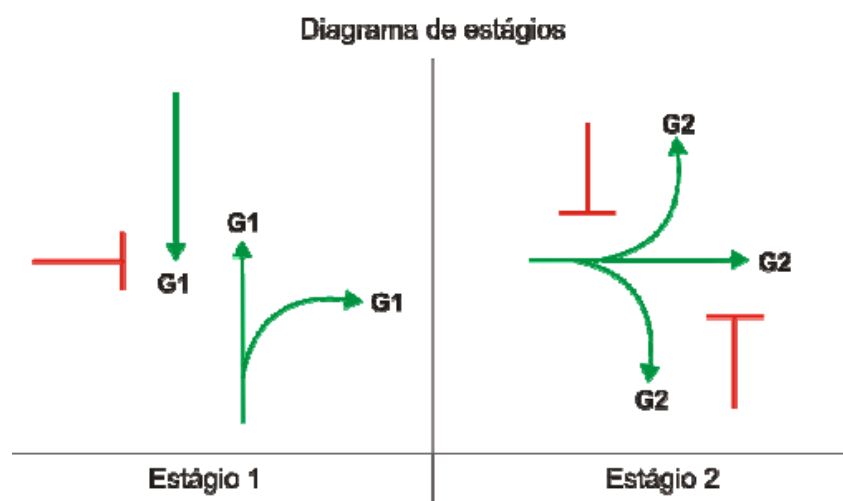


Figura 5: Exemplo de Diagrama de Estágios

Fonte: Manual de Semáforos do DENATRAN

3.5 Programação Semafórica

3.5.1 Considerações Iniciais

O grande desafio do sistema semafórico é a etapa de programação, que consiste na determinação do tempo de luz verde (permitido o fluxo) para cada um dos estágios do semáforo (tempo de luz verde para cada grupo de semáforo) do semáforo. Portanto, para se programar o sistema, é necessário que seja conhecido o Fluxo de Saturação (FS) das aproximações envolvidas. Em outras palavras, é necessário conhecer o máximo fluxo que um grupo semafórico, em determinada via, pode escoar. Além disso, é necessário também que seja conhecido o Fluxo (F) que deseja passar, ou seja, a demanda de veículos (Manual Brasileiro de Sinalização de Trânsito Volume V – Sinalização Semafórica, 2004).

3.5.2 Unidade de Carros de Passeio

Unidades de Carros de Passeio (UCP) é um conceito que concilia as condições de tráfego causadas pelo fluxo de diferentes tipos de veículos tais como: ônibus, caminhões, vans, motocicletas e outros. Os veículos pesados, sendo mais lentos e ocupando maior espaço na pista, interferem na mobilidade dos outros veículos, acarretando uma diminuição da vazão de tráfego das vias. Deste modo, o efeito de um caminhão ou ônibus na corrente de tráfego é equivalente ao efeito de mais de um automóvel (UFSC – Laboratório de Transportes). A presença desses veículos de maior porte se mostra prejudicial, principalmente, no período de verde inicial dos semáforos, onde a arrancada dos veículos será mais lenta.

Além de dificultar o fluxo dos veículos de passeio, os veículos pesados utilizam um espaço físico cerca de três vezes maior do que o utilizado por um veículo comum. Baseado nisso, para que seja feita uma análise mais precisa do tráfego na via, é necessário que seja utilizado um fator de conversão de veículos pesados em UCP (Highway Capacity Manual, 2000).

Nos estudos alemães, o Manual para a Determinação da Capacidade de Rodovias (HBS – Handbuch für die Bemessung von Strassenverkehrsanlagen), contém uma tabela de equivalência de veículos em UCP para a aplicação em estudos de capacidade de interseções (DNIT – Manual de Estudos de Tráfego,

2006). A tabela a seguir, extraída do Manual de Estudos de Tráfego do DNIT, elucida os respectivos fatores para a conversão de veículos em UCP.

Tabela 1: Fator de Equivalência de UCP

Tipo de Veículo	VP	CO	SR/RE	M	B
Fator de Equivalência	1,0	1,5	2,0	1,0	0,5

Fonte: Adaptado do Manual de Estudo de Tráfego (DNIT, 2006).

onde:

- VP – Veículo de Passeio;
- CO – Ônibus e Caminhões Convencionais;
- SR/RE – Ônibus e Caminhões Articulados;
- M – Motocicletas; e
- B – Bicicletas.

3.5.3 Fluxo

Fluxo é definido como o volume de veículos que trafegam pela mesma direção de uma via durante um determinado tempo (WEBSTER e COBBE, 1966). Para a determinação do Fluxo (F), é realizado a medição em campo da maior demanda de veículos se aproximando da interseção em um intervalo de tempo no horário de pico (Manual de Semáforos – DENATRAN, 1984).

3.5.4 Fluxo de Saturação

Ao início do tempo de verde, os veículos levam um tempo para a partida e até atingir uma velocidade normal, mas após algum tempo o fluxo de veículos se torna constante. A partir disso, define-se Fluxo de Saturação (FS) como o fluxo que poderia ser obtido se ocorresse a chegada contínua de veículos à interseção durante 100% de tempo de verde sem considerar o fluxo reduzido na etapa de partida (WEBSTER e COBBE, 1966).

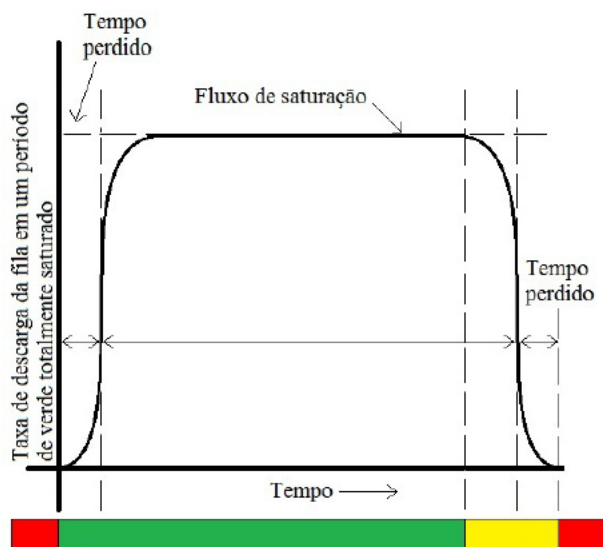


Figura 6: Variação da taxa de descarga de uma fila em um período de verde saturado.

Fonte: *Webster*, 1957.

Existem vários métodos para a determinação do Fluxo de Saturação, sendo um deles é o método tabular do Manual de Semáforos do DENATRAN (1984) que toma como parâmetros a topografia e o traçado da via, o estado de conservação do pavimento, a composição do tráfego, entre outras.

Em contrapartida, o DENATRAN, em seu Manual de Semáforos (DENATRAN, 1984), propõe identificar o Fluxo de Saturação através da utilização de Histogramas de Tráfego. O Histograma de Tráfego pode ser obtido a partir da contagem do número de veículos que cruzam a faixa de contenção do semáforo a cada 5 segundos ao início do tempo de verde. Pioneiramente adotado por *Webster*, o Histograma tem por fim obter o Fluxo de Saturação através da reprodução do gráfico fluxo x tempo onde o Fluxo de Saturação máximo será obtido através do valor médio dos fluxos de veículos (Dissertação de Mestrado – Sobre o Fluxo de Saturação, Luna, Marcelo, 2003).

3.5.5 Capacidade

Capacidade é a quantidade máxima de veículos que pode passar por um trecho de uma via durante um determinado período de tempo levando em consideração as condições reais de tráfego. Segundo a CET (Companhia de Engenharia de Tráfego - São Paulo), a capacidade depende da proporção do tempo

de verde em relação ao ciclo e do máximo fluxo de veículos (número de veículos por unidade de tempo) que pode passar pela linha de retenção supondo 100% de tempo verde (NT-208). Sua otimização depende diretamente de fatores como geometria, tráfego, condições climáticas, estado de conservação do pavimento, desnível de pista e outros (HCM, 2000).

3.5.6 Método de Webster

Uma vez munido dessas informações, é possível determinar o tempo de ciclo ótimo de um semáforo segundo método matemático desenvolvido por *Webster* que é encontrado no Manual Brasileiro de Sinalização de Trânsito, Volume V, 2004. O método de *Webster* utiliza como parâmetros o tempo perdido em cada ciclo (tempo em que nenhum estágio possa se mover) e a taxa de ocupação (y_i), onde taxa de ocupação é a razão entre o Fluxo e o Fluxo de Saturação.

3.5.7 Plano Semafórico

Conjunto de elementos que define a programação da sinalização semafórica, conforme período do dia (Manual Brasileiro de Sinalização de Trânsito Volume V – Sinalização Semafórica, 2004).

3.5.8 Sistema Isolado e Monoplano

Semáforos isolados que possuem apenas um plano de tempos fixos, constante durante todo o dia, não sendo possível um ajuste dos tempos de verde aos volumes de tráfego observados nas horas de pico, sendo normalmente proposta uma programação baseada nos volumes. Ou seja, o semáforo possui uma única programação que é executada o dia inteiro, todos os dias, não acompanhando assim as variações da demanda veicular (Freitas, 2009).

4. METODOLOGIA E RESULTADOS

4.1 Considerações Iniciais

A interseção em análise será estudada de modo que se estime o volume de veículos que se aproximam da interseção em situações de pico para a obtenção do Fluxo e Fluxo de Saturação de projeto. Além disso é necessário que se conheça as características geométricas da interseção para que sejam estabelecidos parâmetros de segurança como luz amarela e tempo de segurança da luz vermelha.

Para a obtenção do Fluxo e do Fluxo de Saturação, será realizado um levantamento *in situ* nos horários mais críticos de dias específicos da semana, de modo que seja representada a pior situação. Em posse dos dados relevantes, será realizado o projeto de programação do ciclo ótimo do semáforo a partir do método de *Webster*. A partir do resultado do projeto será comparado ao ciclo que se encontra em utilização no semáforo para identificar a possibilidade ou não de melhorias a partir do resultado obtido.

Conforme consta na Introdução deste trabalho, o mesmo é destinado ao estudo de caso da interseção semaforizada entre a Avenida Telésforo Cândido de Resende e a Rua Jacinto Siqueira, localizadas no município de Conselheiro Lafaiete, Minas Gerais. A **Figura 7** indica a localização da interseção.



Figura 7: Cruzamento escolhido para o estudo de caso isolado, localizado no município de Conselheiro Lafaiete, MG.

Fonte: Google Maps

Para compreender o comportamento da interseção de forma mais detalhada, foi feito um estudo dos movimentos regulamentados e gerado o Diagrama de Conflitos, conforme a **Figura 8** e a **Tabela 2**. A interseção em pauta apresenta elevado fluxo de veículos e movimentos conflitantes. Portanto a utilização de sinalização semafórica é justificada.

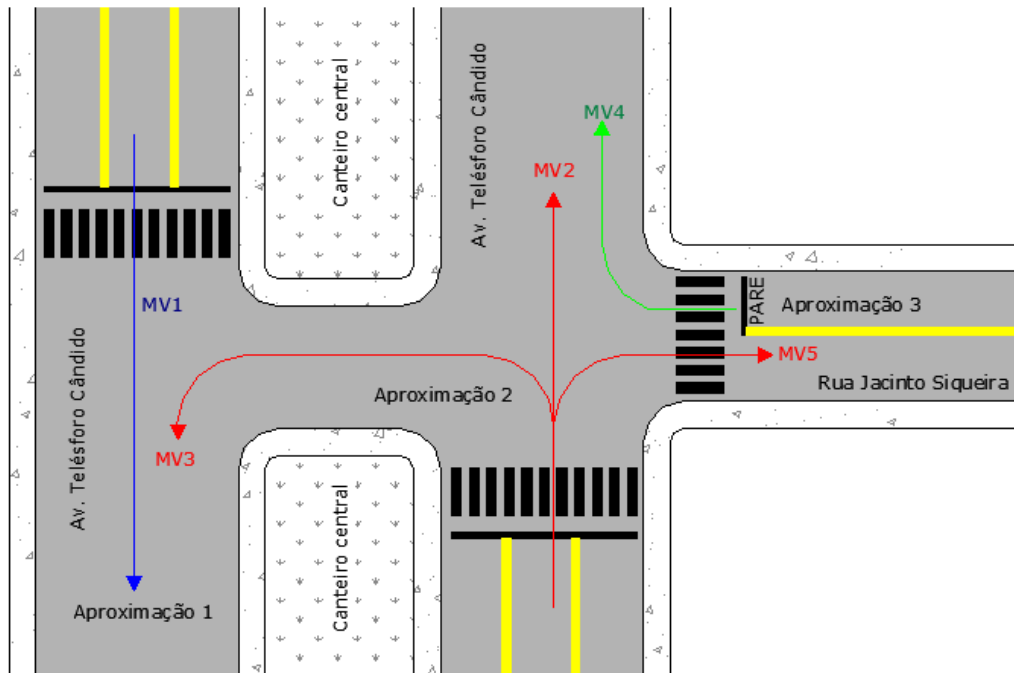


Figura 8: Diagrama de Conflitos da interseção estudada.

Fonte: Manual de Sinalização Semafórica, Vol. 5

Tabela 2: Tabela de Movimentos Conflitantes da Interseção Estudada

MOV.	1	2	3	4	5
1			x		
2				x	
3	x				
4		x			
5					

Com o intuito de realizar o estudo da sinalização semafórica da interseção em pauta, se fez necessária a obtenção de alguns dados e parâmetros.

Inicialmente foi verificada a sinalização semafórica já existente na interseção para a geração do seu respectivo diagrama de estágios semafóricos. No caso desta interseção, a sinalização semafórica é dotada de dois estágios G1 e G2, sendo que a travessia de pedestres é permitida sempre que seu correspondente estágio para veículos esteja fechado (luz vermelha), conforme **Figura 9**.

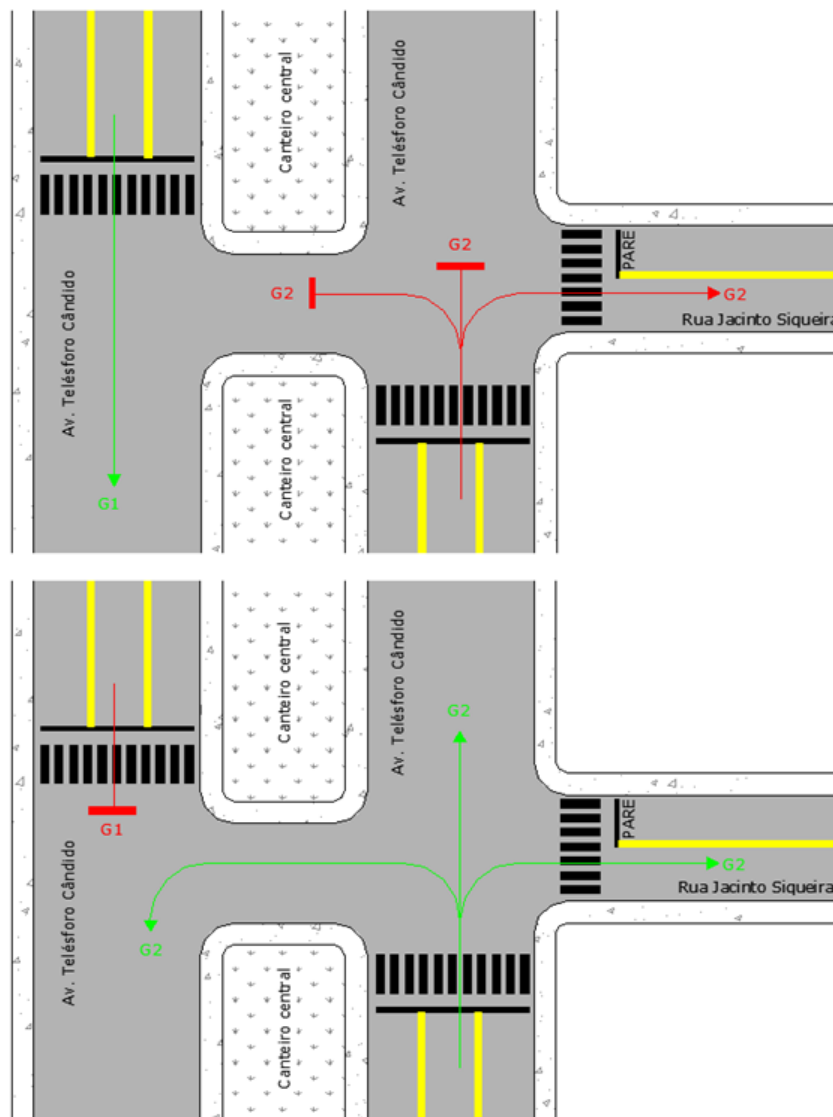


Figura 9: Diagrama de Estágios

As imagens a seguir foram obtidas no local de modo a elucidar as características da interseção em pauta.



Figura 10: Av. Telésforo Cândido de Resende (Estágio G1)



Figura 11: Rua Jacinto Siqueira - interseção Av. Telésforo Cândido de Resende (Estágio G2)



Figura 12: Av. Telésforo Cândido de Resende (Estágio G2)

Além do diagrama de estágios, para entender melhor o comportamento de uma sinalização semafórica, é necessário que se conheça o ciclo semafórico bem como a duração de cada um de seus estágios. E para isso, baseado na cronometragem do funcionamento do semáforo, foi gerado o Diagrama de Intervalos, conforme a **Tabela 3**.

Tabela 3: Diagrama de Intervalos da Interseção

DIAGRAMA DE INTERVALOS LUMINOSOS						
INSTANTE (S)	25		61			
	0	23	26	59	62	
G1	[Green]		[Yellow]	[Red]		
G2	[Red]		[Green]		[Yellow]	[Red]
INTERVALOS	1	2	3	4	5	6
DURAÇÃO (S)	23	2	1	33	2	1
% CICLO	37	3	2	53	3	2
ESTÁGIOS	1			2		

4.2 Método de Webster

Conforme anteriormente descrito pelo método de *Webster* para programação semafórica (item 3.4.5 do Referencial Teórico), para se realizar o cálculo do ciclo ótimo de uma sinalização semafórica se faz necessário fazer o levantamento do fluxo de veículos in situ para sua posterior utilização como dados de entrada no cálculo do ciclo ótimo para o semáforo da interseção.

Em virtude da obtenção dos dados supracitados, foi necessário realizar a contagem veicular para a composição do fluxo de tráfego existente no local em questão.

4.3 Escolha do Método de Coleta de Dados

Considerando que o objetivo deste trabalho é o estudo de caso de uma interseção viária, é razoável que sejam encontradas algumas dificuldades na contagem manual da demanda veicular. Com o intuito de driblar a falta de recursos humanos para realizar a contagem de veículos, o registro da demanda de veículos foi feito através de filmagens, permitindo maior sensibilidade e precisão na obtenção dos dados.

A partir do material registrado, foi realizada a contagem manual das aproximações veiculares de cada movimento regulamentado na interseção. Desta forma, foi possível compreender o fluxo veicular e revisar o material quantas vezes se fizesse necessário, possibilitando a avaliação do fluxo a cada segundo.

4.4 Método de Armazenamento e Organização dos Dados

Conforme Manual Brasileiro de Sinalização Semafórica, para fins de definição de fluxo veicular, é necessário que seja feito um acompanhamento da variação do fluxo durante o ano todo. Entretanto, para fins de planejamento viário, é justificável que seja feita a análise de fluxo apenas nos horários de pico. Portanto, no presente trabalho foram analisados os fluxos veiculares nos períodos de pico matutino e na hora do almoço, de 7:00h às 9:00h e de 10:00h às 12:00h, respectivamente.

Para armazenamento dos dados obtidos em campo foi utilizado o software *Microsoft Excel*, no qual os dados coletados foram organizados da melhor maneira possível. Em campo, foram observados e anotados os seguintes dados:

- Tempo de ciclo, tempo de verde, tempo de amarelo e tempo de vermelho do semáforo existente;
- Volume total de veículos e volume discriminado por tipo de veículo;
- Fluxo de veículos a cada intervalo de três e cinco segundos; e
- Taxa de veículos passando nas luzes amarela e vermelha;

4.5 Processamento dos Dados

O processamento dos dados consistiu em somar-se os veículos passados em cada conversão, gerando um subtotal para cada intervalo de tempo. Nesta pesquisa, optou-se por um intervalo de tempo de fluxo de 3 (três) segundos na etapa de verde inicial, e, como sugere o Manual de Sinalização Semafórica do DENATRAN (2007), optou-se por um intervalo de 5 (cinco) segundos em sequência até que finalizasse o estágio verde para o estágio analisado. Os dados foram coletados e organizado em planilhas como as apresentadas a seguir. De forma a obter dados mais completos para a análise, a contagem foi feita de forma que se discriminasse a contagem por tipo de veículo.

A **Figura 13** apresenta como foi feito o processamento dos dados. De modo a facilitar a análise, a planilha foi organizada em ciclos e seus respectivos fluxos de veículos.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1	Ciclo	Descida	Intervalo	Carro	Onibus	Van	Moto	Caminhão	Total	Total Eq. Webster	Total Eq. DNIT		
2	1	Início Verde	23-20	3			1		4	3,33	4		
3			20-15	4					4	4	4		
4			15-10	6	1				7	8,25	7,5		
5			10-5	6					6	6	6		
6			5-0	4					4	4	4		
7		Amarelo	2-0	1					1	1	1		
8		Vermelho	33-30						0	0	0		
9			30-25						0	0	0		
10			25-20						0	0	0		
11			20-15						0	0	0		
12			15-10						0	0	0		
13			10-5						0	0	0		
14			5-0						0	0	0		
15		Segundo Perdido							0	0	0		
16	2	Início Verde	23-20	4			3		7	4,99	7		
17			20-15	2	1				3	4,25	3,5		
18			15-10	3					3	3	3		
19			10-5	3			1		4	3,33	4		
20			5-0	2			1		3	2,33	3		
21		Amarelo	2-0	1					1	1	1		
22		Vermelho	33-30	1					1	1	1		
23			30-25						0	0	0		
24			25-20						0	0	0		
25			20-15						0	0	0		

Figura 13: Método utilizado para o processamento dos dados

Além da contagem parcial dos veículos por ciclo, a planilha supra apresentada contabiliza o valor total equivalente de Unidades de Carros de Passeio (UCP) segundo métodos do DNIT conforme descrito no item 3.4.1. Para efeito comparativo, também foi contabilizado o total equivalente de UCP de acordo com *Webster*.

A partir da planilha da contagem de veículos por ciclo, foi possível criar uma nova planilha de forma a gerar o histograma de fluxo de veículos para cada sentido de tráfego. A **Figura 14** mostra a quantidade equivalente de UCP que cruza a interseção em cada intervalo de tempo de cada um dos 60 ciclos observados.

Planilha - Quantitativo de veículos - Excel

ARQUIVO PÁGINA INICIAL INSERIR LAYOUT DA PÁGINA FÓRMULAS DADOS REVISÃO EXIBIÇÃO SUPLEMENTOS TEAM

Calibri - 11 - A A - Quebrar Texto Automaticamente

Área de Transferência - Colar - Fonte - Alinhamento - Número - Formatação Condicional - Estilo - Formatar como Estilos de Tabela - Célula - Inserir Excluir Formatar - Células - Classificar Localizar e Filtrar - Selecionar - Edição

B24

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
1		Intervalo/Ciclo (total)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
2		23-20	4	7	2	5	5	5	5	3	5	4	0	4	5	5	4
3		20-15	4	3	3	5	3	5	4	3	6	6	4	2	7	5	7
4		15-10	7	3	0	4	2	2	3	4	2	1	5	2	3	2	3
5		10-5	6	4	1	4	3	3	1	1	5	0	4	2	3	4	3
6		5-0	4	3	1	3	1	2	2	3	4	0	5	0	4	2	1
7		Amarelo	1	1	1	0	0	1	0	2	0	2	1	0	0	1	0
8		Vermelho	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
9																	
10																	
11																	
12		DNIT															
13		Intervalo/Ciclo (total)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
14		23-20	4	7	2	5	5,5	5	5	3,5	5	4	0	4	5	5	4
15		20-15	4	3,5	3,5	5,5	3	5,5	4	3	6	6,5	4,5	2	7	5	7
16		15-10	7,5	3	0	4,5	2	2	3	4	2	1	5,5	2	3,5	2,5	3
17		10-5	6	4	1	4,5	3	3	1	1	5,5	0	4	2	3	4,5	3
18		5-0	4	3	1	3	1	2,5	2	3	4	0	5	0	4	2,5	1
19		Amarelo	1	1	1	0	0	1	0	2	0	3	1	0	0	1	0
20		Vermelho	0	1	1,5	0	0	0	0	0	0	1,5	0	0	0	0	0
21																	
22																	
23																	
24																	

PRONTO

Figura 14: Método utilizado para o cálculo do UCP em cada intervalo de tempo

Através do fluxo de cada ciclo, foi possível obter o histograma médio da interseção semaforica em pauta e, desta forma, torna-se possível a estimativa do fluxo máximo de veículos, conforme as Figuras 15 e 16.

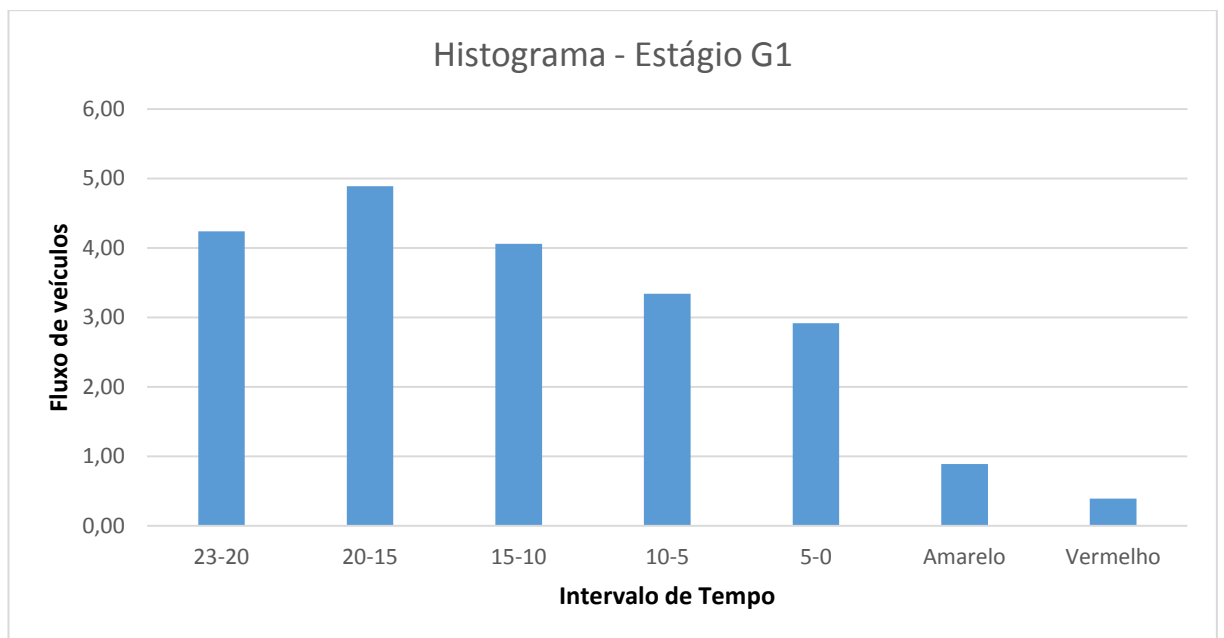


Figura 15: Histograma corresponde ao Estágio G1

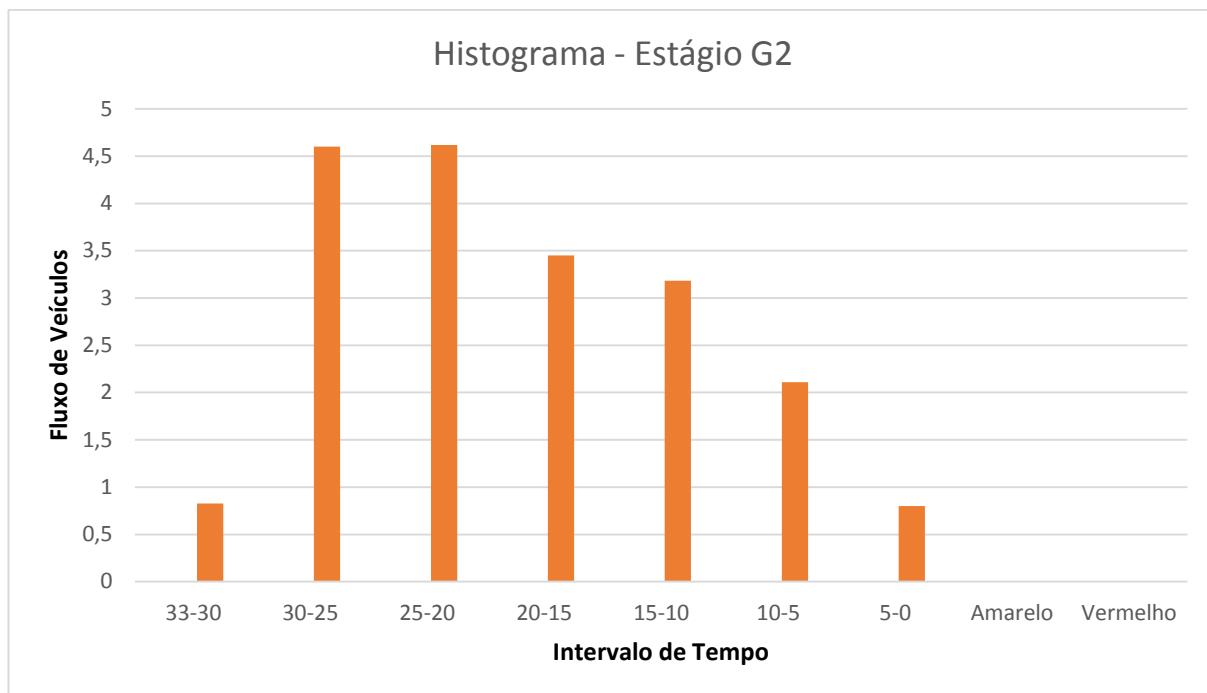


Figura 16: Histograma corresponde ao Estágio G2

Através dos dados apresentados, foi possível obter diferentes variáveis a partir dos dados analisados no estudo em questão, principalmente no que se refere à obtenção do Fluxo de Saturação, que é demonstrado a seguir.

4.6 Cálculo do Fluxo de Saturação

O cálculo do Fluxo de Saturação demonstrado a seguir foi executado conforme o método de *Webster* demonstrado no capítulo 7 do Manual Brasileiro de Sinalização de Trânsito – Vol. 5.

4.6.1 Fluxo de Saturação do Estágio G1

Segundo o método de *Webster*, a obtenção do fluxo de saturação se dá pela equação a seguir:

$$b = g_{ef} \cdot FS$$

onde, g_{ef} : verde efetivo (segundos);

b : fluxo de veículos descarregados (UCP); e

FS : fluxo de saturação (UCP/segundo de verde efetivo).

Como o fluxo de saturação (FS) é dado em veículos por segundo de verde efetivo, de modo a obter fluxo de saturação de veículos por hora de verde (vhv), multiplica-se o fluxo de saturação por 3600 segundos. O valor do fluxo de veículos descarregados (b) é obtido através da soma das colunas mais saturadas do histograma conforme a **Figura 15**. A soma das colunas mais saturadas se deu entre os intervalos 23-20, 20-15 e 15-10 totalizando uma média de 13,19 veículos/13 segundos. Assim o fluxo de saturação é obtido da seguinte maneira:

$$FS = \left(\frac{13,19}{13} \right) \cdot 3600 = 3653,07 \text{ } vhv$$

4.6.2 Fluxo de Saturação do Estágio G2

De forma análoga, a partir da **Figura 16**, obtém-se o FS para o estágio G2. A soma das colunas mais saturadas se deu entre os intervalos 30-25, 25-20 e 20-15 totalizando uma média de 12,23 veículos/15 segundos. Deste modo, tem-se:

$$FS = \left(\frac{12,67}{15} \right) \cdot 3600 = 3040,00 \text{ } vhv$$

4.7 Cálculo do Tempo Perdido

4.7.1 Considerações Iniciais

Quando a sinalização semafórica permite a passagem de veículos, demanda-se um tempo para que os mesmos passem pela faixa de contenção, caracterizando um tempo em que a luz verde não é utilizada em sua capacidade máxima de escoamento. O mesmo ocorre quando o tempo de verde se encerra e o fluxo é interrompido. De modo a contabilizar a redução de veículos que cruzam a interseção nesses intervalos, são feitos os seguintes cálculos demonstrados nos itens seguintes.

4.7.2 Tempo Perdido no Estágio G1

De acordo com o Apêndice 6 do Manual Brasileiro de Sinalização de Trânsito – Vol. 5, o cálculo do tempo perdido deve ser dividido em duas etapas: inicial e final. Cada uma das suas etapas são obtidas a partir das equações a seguir:

$$t_{pin} = 5 - \frac{NVI1}{FS}$$

$$t_{pfn} = DIEV - \frac{NVIEV}{FS}$$

onde, t_{pin} : Tempo perdido inicial (s);

NVI_1 : Número de veículos no intervalo 1;

FS : Fluxo de Saturação;

t_{pfn} : Tempo perdido final (s);

$DIEV$: soma das durações dos intervalos que contenham parte do entreverdes (s);

$NVIEV$: soma do número de veículos dos intervalos que contenham parte do entreverdes.

O primeiro intervalo do ciclo de verde tem duração de 3 segundos, e foi observado um fluxo de 4,24 veículos, conforme **Figura 15**.

$$t_{pin} = 3,00 - \frac{4,24}{1,01} = -1,19s$$

Portanto, se o regime inicial de escoamento representasse o fluxo de saturação, seria necessário um tempo extra para que este fosse atingido. O valor negativo é justificado pelo fluxo inicial e isso se dá pelo seu valor ser muito próximo ao do fluxo de saturação. Em outras palavras, não é necessário tempo adicional e não há tempo perdido.

O intervalo final do ciclo de verde tem duração de 5 segundos, e no período de entreverdes (intervalo final, amarelo e vermelho) foi contabilizado um fluxo de 4,22 veículos, conforme **Figura 16** - Histograma G2.

$$t_{pfn} = 5,00 - \frac{4,22}{1,01} = 0,82s$$

Portanto, o tempo perdido total é igual à soma dos tempos perdidos inicial e final. Neste caso, a obtenção de um valor negativo para o tempo perdido inicial pode ser justificada pela elevada passagem de veículos, mesmo que no período inicial onde comumente a passagem de veículos é mais reduzida. Este fato se explica pela presença do temporizador semaforico, que anuncia quando o mesmo irá permitir a

passagem de veículos, e pelo desnível da via em forma de declive, conforme ilustrado na **Figura 17**.

Finalmente o tempo perdido total levará em consideração apenas a perda final, sendo assim:

$$t_{pG1} = 0,82s$$



Figura 17: Sinalização semafórica com temporizador

4.7.3 Tempo Perdido no Estágio G2

De forma análoga, o procedimento executado para o estágio G2 obteve 0,83 veículos cruzando a interseção no intervalo inicial, conforme histograma.

$$t_{pin} = 3,00 - \frac{0,83}{0,84} = 2,01s$$

Já no intervalo final foi observado a passagem de 0,80 veículos conforme histograma.

$$t_{pfn} = 5,00 - \frac{0,80}{0,84} = 4,04s$$

Desta forma, o tempo perdido no Estágio G2 é a soma entre os intervalos inicial e final.

$$t_{pG2} = 2,01 + 4,0 = 6,05s$$

4.8 Cálculo do Tempo de Entreverdes

4.8.1 Tempo de Amarelo

Para a obtenção do tempo de amarelo, devem ser considerados alguns parâmetros que influenciam diretamente na sua contabilização. Estes parâmetros são: tempo de percepção (t_{pr}), velocidade regulamentar da via (v), máxima taxa de frenagem admissível em via plana (a_{ad}), inclinação da via (i) e aceleração da gravidade (g). A equação para a obtenção do tempo de amarelo que leva em conta esses fatores é apresentada a seguir.

$$t_{am} = t_{pr} + \frac{v}{2 \cdot (a_{ad} \pm ig)}$$

No caso em questão foram utilizados os seguintes valores:

$t_{pr} = 1,0$ (s) – tempo de percepção;

$v = 11,1$ m/s (40km/h) – velocidade regulamentar da via coletora;

$a_{ad} = 3,0$ m/s² – frenagem admissível;

$i = 7,5\%$ - inclinação da via (**Figura 19**);

$g = 9,8$ m/s² – aceleração da gravidade.

$$t_{am} = 1,0 + \frac{11,1}{2 \cdot (3,0 - 0,075 \cdot 9,8)} = 3,45s$$

Cabe salientar que foi utilizado um valor negativo para a inclinação da via de modo a utilizar a pior situação possível, a de declive. Neste exemplo o tempo de amarelo para todos os estágios é o mesmo, pois ambas as vias têm as mesmas características de velocidade e declividade.

4.8.2 Tempo de Vermelho Geral

O Tempo de Vermelho Geral é o tempo em que nenhum dos estágios tem direito de passagem de modo a evitar que os veículos permaneçam na zona de conflito no momento em que se permite a passagem do estágio seguinte. Sua determinação leva em consideração o comprimento da interseção, o comprimento do veículo e velocidade de tráfego.

$$t_{vg} = \frac{d_{2i} + c}{v}$$

onde:

d_{2i} : distância entre a linha de contenção e o prolongamento da via transversal após o cruzamento (m);

c : comprimento médio do veículo fixado em 5,0m;

v : velocidade (m/s).

- Estágio G1

$$d_{21} = 9,0 \text{ m} + 7,0 \text{ m} = 16,0 \text{ m}$$

$$t_{vg} = \frac{16,0 + 5,0}{11,1} = 1,89s$$

- Estágio G2

$$d_{22} = 11,0 \text{ m} + 7,0 \text{ m} = 18,0 \text{ m}$$

$$t_{vg} = \frac{18 + 5}{11,1} = 2,07s$$

4.8.3 Tempos de Entreverdes

O tempo de entreverdes é dado pela soma do tempo de amarelo (t_{am}) e do tempo de vermelho geral (t_{vg}), conforme explicitado a seguir:

$$t_{ent,i} = t_{am} + t_{vg}$$

Desta forma:

$$t_{ent,1} = 3,45 + 1,89 = 5,34s$$

$$t_{ent,2} = 3,45 + 2,07 = 5,52s$$

Como a sinalização semafórica só trabalha com números inteiros, deve ser feito o arredondamento dos valores. Portanto, tem-se:

$$t_{ent,1} = 5,0s$$

$$t_{ent,2} = 6,0s$$

Logo, o tempo de entreverdes utilizado para ambos os casos será de 6,0 segundos, sendo:

$$t_{am} = 4,0s$$

$$t_{vg} = 2,0s$$

4.9 Taxa de Ocupação

Conforme descrito no item 3.4.5, a taxa de ocupação é a razão entre o fluxo de veículos e o fluxo de saturação do estágio analisado. Para o futuro desenvolvimento do cálculo do ciclo ótimo a taxa de ocupação foi calculada abaixo:

$$y_i = \frac{F}{FS}$$

- Estágio G1

De acordo com a planilha, para o movimento 1 tem-se:

$$F_1 = 1245,50 \text{ veíc/h}$$

$$FS_1 = 3653,07 \text{ vhv}$$

Logo,

$$y_1 = \frac{1245,50}{3653,07} = 0,34$$

- Estágio G2

De acordo com a planilha, para o movimento 2, tem-se:

$$F_2 = 808 \text{ veíc/h}$$

$$FS_2 = 3040 \text{ vhv}$$

Logo,

$$y_2 = \frac{808}{3040} = 0,26$$

Para o movimento 3, tem-se:

$$F_3 = 288 \text{ veíc/h}$$

$$FS_2 = 3040 \text{ vhv}$$

Logo,

$$y_3 = \frac{288}{3040} = 0,09$$

Para o movimento 5, tem-se:

$$F_5 = 58 \text{ veíc/h}$$

$$FS_2 = 3040 \text{ vhv}$$

Logo,

$$y_5 = \frac{58}{3040} = 0,02$$

Finalmente, para a utilização da taxa de ocupação, é necessário fazer uma análise do grupo de movimento crítico. Como no estágio G2 os 3 movimentos – y_2 , y_3 e y_5 , recebem o verde simultaneamente, deve-se considerar apenas a maior taxa de ocupação dentre os 3 movimentos. Neste caso, será a taxa de ocupação do movimento 2 (MV2) conforme indicado na **Figura 8**.

$$\sum y_i = y_1 + y_2 = 0,34 + 0,26 = 0,60$$

4.10 Tempo Perdido Total

O tempo perdido total (T_p) é a soma dos entreverdes dos dois estágios. Portanto, tem-se:

$$T_p = t_{ent,1} + t_{ent,2} = 5,0 + 6,0 = 11,0s$$

4.11 Cálculo do Tempo de Ciclo Ótimo

O cálculo a seguir é baseado no item 6.2.9 do Manual Brasileiro de Sinalização de Trânsito – Vol.5. Para a determinação do tempo ótimo de ciclo é utilizada a equação a seguir com base nos dados obtidos anteriormente.

$$t_{c,ot} = \frac{((1,5 \cdot T_p) + 5)}{(1 - \sum y_i)}$$

Munido dos dados obtidos anteriormente tem-se:

$$t_{c,ot} = \frac{((1,5 \cdot 11,0) + 5)}{(1 - 0,60)} = 53,75s$$

Como mencionado anteriormente, devido ao fato dos semáforos trabalharem apenas com números inteiros, foi feito o arredondamento do tempo de ciclo. Portanto o tempo de ciclo (t_c) será de 54,0 segundos.

Para o cálculo dos tempos de verde efetivo, foi utilizada a equação abaixo, obtida no Manual Brasileiro de Sinalização de Trânsito – Vol.5.

$$t_{v,ef,i} = (t_c - T_p) \times \frac{y_i}{\sum y_i}$$

Para o estágio G1, tem-se:

$$t_{v,ef,1} = (54 - 11) \times \frac{0,34}{0,60} = 24,36s$$

Para o estágio G2, tem-se:

$$t_{v,ef,2} = (54 - 11) \times \frac{0,26}{0,60} = 18,63s$$

Finalmente tem-se os tempos de verde efetivo para cada estágio. Conforme orientação, deve ser feito o arredondamento dos tempos de ciclo para que se trabalhe com números inteiros. Portanto, feito o arredondamento foram obtidos os seguintes tempos de verde efetivo:

$$t_{v,ef,1} = 24s$$

$$t_{v,ef,2} = 19s$$

Com a finalidade de conferir o tempo total de ciclo, foi feito a soma das parcelas de verde efetivo e perda de tempo total.

$$t_c = t_{v,ef,1} + t_{v,ef,2} + T_p$$

$$t_c = 24 + 19 + 11 = 54s$$

Portanto, foi verificado que os tempos estão adequados ao tempo total de ciclo. A **Figura 18** abaixo mostra de forma detalhada o diagrama de intervalos luminosos obtido.

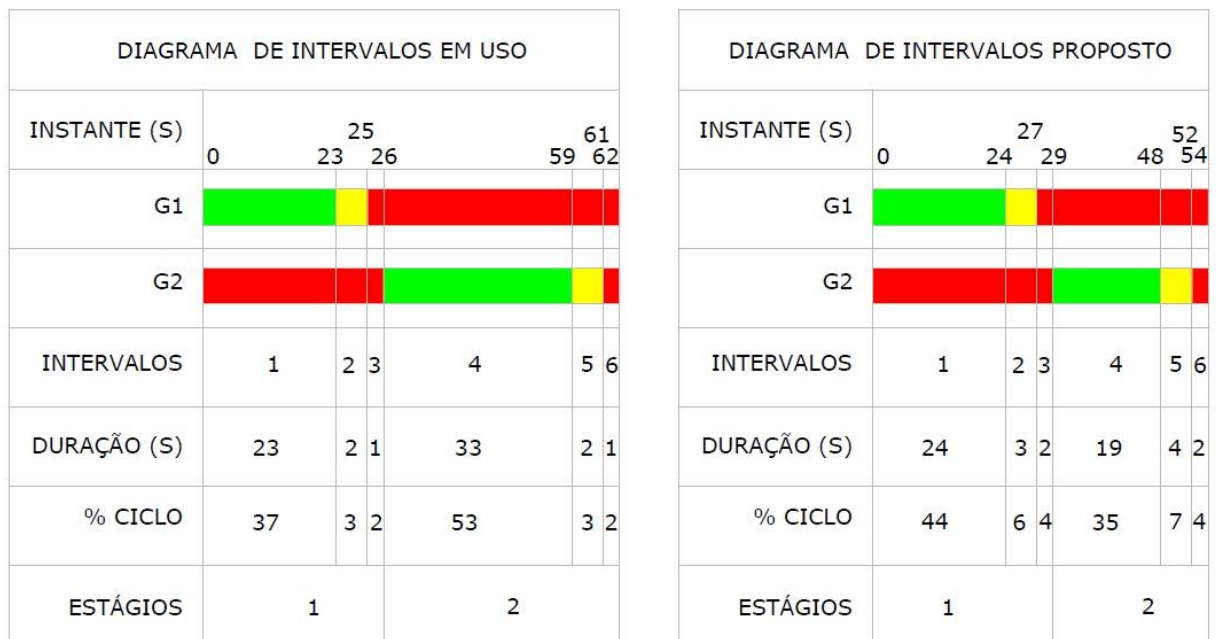


Figure 18: Diagrama de Intervalos Projetado x Diagrama de Intervalos em Uso

4.12 Cálculo da Capacidade da Interseção

O cálculo da capacidade da interseção semafórica, dado em veículos por hora é obtido através da expressão a seguir:

$$capacidade = \frac{t_{v,ef} \cdot FS}{t_c}$$

Uma vez que a capacidade é diferente para cada um dos sentidos da interseção tem-se para a nova proposta de programação as seguintes capacidades:

- Capacidade Estágio G1 para **nova programação**

$$capacidade_{G1} = \frac{t_{v,ef,1} \cdot FS}{t_c} = \frac{24 \cdot 3653,07}{54} = 1623,58 \text{ veí/h}$$

- Capacidade Estágio G2 para **nova programação**

$$capacidade_{G2} = \frac{t_{v,ef,2} \cdot FS}{t_c} = \frac{19 \cdot 3040,00}{54} = 1069,63 \text{ veí/h}$$

Já para o semáforo em uso, foram obtidas as capacidades a seguir:

- Capacidade Estágio G1 para **programação em uso**

$$capacidade_{G1} = \frac{t_{v,ef,1} \cdot FS}{t_c} = \frac{23 \cdot 3653,07}{62} = 1355,17 \text{ veí/h}$$

- Capacidade Estágio G2 para **programação em uso**

$$capacidade_{G2} = \frac{t_{v,ef,2} \cdot FS}{t_c} = \frac{33 \cdot 3040,00}{62} = 1618,06 \text{ veí/h}$$

Em conclusão, a programação semafórica proposta tem maior capacidade para o estágio G1 e menor capacidade para o estágio G2. Porém, como o estágio G1 demonstrou maior demanda, é mais vantajoso que sua capacidade seja aumentada.

4.13 Estágio de Pedestres

Baseado no levantamento do fluxo de veículos e pedestres feito em campo, foi contabilizada uma demanda muito pequena de pedestres cruzando a interseção e portanto a criação de um estágio exclusivo para a travessia de pedestres foi descartada. Deste modo a travessia de pedestres é autorizada e indicada pelo grupo

semafórico de pedestres quando o respectivo estágio semafórico veicular se encontrar na luz vermelha.

Apesar de desconsiderar um estágio exclusivo para a travessia de pedestres, na determinação dos tempos de verde efetivo para os veículos foram adotadas medidas de segurança de modo a garantir o tempo mínimo necessário para a que a travessia de pedestres se dê de forma segura. Para isso, baseado na geometria e largura da via foi calculado um tempo mínimo necessário de 12 segundos para a segurança na travessia de pedestres. Uma vez que nenhum estágio veicular apresentou tempo de verde efetivo inferior a 12 segundos, a segurança é garantida.

4.14 Análise Complementar

Com o intuito de justificar o uso da sinalização semafórica, no cálculo da capacidade dos estágios semafóricos, foi evidenciada uma capacidade de escoamento de veículos inferior ao fluxo de saturação. Portanto, a utilização do semáforo foi justificada.

Para avaliar a coerência da programação obtida, foram calculados os graus de saturação associados aos tempos resultantes de aplicação do método de *Webster* tanto para a programação proposta quanto para a programação existente.

4.14.1 Programação Proposta

- Cálculo das porcentagens de verde (p_i)

$$p_1 = \frac{t_{v,ef,1}}{t_c} = \frac{24}{54} = 0,44$$

$$p_2 = \frac{t_{v,ef,2}}{t_c} = \frac{19}{54} = 0,35$$

- Cálculo dos graus de saturação (x_i)

$$x_1 = \frac{y_1}{p_1} = \frac{0,34}{0,44} = 0,77$$

$$x_2 = \frac{y_2}{p_2} = \frac{0,26}{0,35} = 0,75$$

De acordo com *Webster*, tempos de ciclo na faixa de 0,75 a 1,5 do tempo de ciclo ótimo produzem atrasos médios por veículos no máximo 20% superiores ao valor do atraso obtido com o tempo de ciclo ótimo. O grau de saturação obtido respeita os limites de acordo com *Webster*.

4.14.2 Programação Existente

- Cálculo das porcentagens de verde (p_i)

$$p_1 = \frac{t_{v,ef,1}}{t_c} = \frac{23}{61} = 0,37$$

$$p_2 = \frac{t_{v,ef,2}}{t_c} = \frac{19}{54} = 0,54$$

- Cálculo dos graus de saturação (x_i)

$$x_1 = \frac{y_1}{p_1} = \frac{0,34}{0,37} = 0,92$$

$$x_2 = \frac{y_2}{p_2} = \frac{0,26}{0,54} = 0,48$$

O grau de saturação obtido para o estágio G1 respeita os limites de *Webster*. Por outro lado o estágio G2 apresenta um grau de saturação fora do intervalo adequado. Portanto, isso justifica a sua reprogramação.

5. CONCLUSÕES

Os estudos de tráfego de uma cidade são extremamente importantes para os trabalhos relacionados à engenharia de tráfego. Neste estudo de caso, os dados obtidos a partir do estudo realizado *in loco* demonstraram uma elevada concentração de veículos na região central da cidade. Considerando a importância desse levantamento, infere-se que esses estudos devem ser feitos com maior frequência de modo a produzir engenharia de tráfego baseada em dados atualizados que englobem a existente variação da demanda de veículos e pedestres. A constante atualização desses estudos irá influenciar positivamente nos resultados das medidas de engenharia adotadas.

Em primeira análise, coube justificar a utilização da sinalização semafórica na interseção, pois, segundo o DNIT, o semáforo deve ser utilizado como última opção de controle viário sem que haja a intervenção física na interseção. Partindo de tal justificativa, no contexto de interseções dotadas de sinalização semafórica, esse estudo de caso propôs analisar a programação do semáforo existente e realizar um novo projeto de programação baseado nos dados obtidos em campo e em características geométricas da interseção. Devido a presença de filas semafóricas e trânsito saturado nos horários de pico, o projeto de programação semafórica elaborado tem como intuito melhorar a qualidade de escoamento da interseção, aumentando o conforto dos usuários.

Levando em conta a composição do tráfego e as características geométricas da interseção, foi realizada a nova programação do semáforo e o resultado atendeu aos parâmetros básicos contidos nos manuais de semáforos contemplados. Além disso, foi evidenciado coerência na programação obtida quando comparada com a programação já existente, sendo que o tempo de verde disponibilizado para o estágio G1 correspondeu ao já em uso. Por outro lado, o tempo de verde calculado para o estágio G2 foi cerca de 30% mais curto quando considerado seu movimento crítico. Portanto, com a nova programação haveria redução no tempo total do ciclo e redução do tempo de espera.

Complementarmente, no que diz respeito à capacidade da interseção em escoar o tráfego, foi feita a análise das capacidades dos estágios G1 e G2 para a programação em uso e para a programação proposta. A programação proposta

aumenta a capacidade do estágio G1, o que é vantajoso por G1 ser o estágio com a maior demanda.

É importante ressaltar que a programação semafórica realizada no estudo não leva em consideração a projeção de crescimento de tráfego. Cabe exclusivamente ao órgão responsável do Município optar pela utilização desse estudo, e arcar com os possíveis impactos gerados pela mudança e adotar medidas de controle de tráfego durante um determinado tempo de adaptação.

No âmbito da programação semafórica, o estudo executado se mostrou eficiente considerando o embasamento técnico para justificar a utilização do estudo como projeto de sinalização semafórica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

COMPANHIA DE ENGENHARIA DE TRAFEGO DE SÃO PAULO – CET. Nota Técnica - NT 174/94. **Reprogramação de Semáforos: Método baseado em observações de campo.** CET, São Paulo, 1994. Disponível em: <<http://www.cetsp.com.br/media/20683/nt174.pdf>>

COMPANHIA DE ENGENHARIA DE TRAFEGO DE SÃO PAULO – CET. Nota Técnica - NT 108/85. **Dimensionamento do Tempo de Amarelo.** CET, São Paulo, 1994. Disponível em: <<http://www.cetsp.com.br/media/20515/nt108.pdf>>.

DAY, Lance; MCNEIL, Ian. **Biographical Dictionary of the History of Technology.** Reprinted. Taylor & Francis, 2003.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. **Manual de Estudo de Tráfego.** 3. ed. Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisas Rodoviárias. 2006.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. **Manual de Sinalização Rodoviária.** 3. ed. Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisas Rodoviárias. 412p. 2010.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE TRÂNSITO. **Código de Trânsito Brasileiro.** Instituído pela Lei nº 9.503 de 23-9-97 – 3. ed. Brasília: DENATRAN, 2008. Disponível em: <http://www.denatran.gov.br/publicacoes/download/ctb_e_legislacao_complementar.pdf>

DEPARTAMENTO NACIONAL DE TRÂNSITO – DENATRAN. Estatística - Frota veículos, 1998. Disponível em: <<http://www.denatran.gov.br/download/frota/Anos%20anteriores.zip>>

DEPARTAMENTO NACIONAL DE TRÂNSITO – DENATRAN. Estatística - Frota veículos, 2014. Disponível em: <<http://www.denatran.gov.br/frota2014.htm>>

DEPARTAMENTO NACIONAL DE TRÂNSITO – DENATRAN. **Manual Brasileiro de Sinalização de Trânsito: Volume V – Sinalização Semafórica.** CONTRAN, 2004.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. **Manual de Projeto de Interseções.** 2. ed. Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisas Rodoviárias. 528p. 2005.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE TRÂNSITO. **Manual de Semáforos.** 2. ed. Brasília, DENATRAN, 1984.

EJZENBERG, Sérgio. **Reprogramação de semáforos: Método baseado em observação em campo.** Nota Técnica 174. Companhia de Engenharia de Tráfego. São Paulo, 1994.

FREITAS, Jurislene. **PROPOSIÇÃO DE UM MÉTODO PARA ESCOLHA DE INTERSEÇÕES SEMAFORIZADAS CANDIDATAS A ATUALIZAÇÃO DA TECNOLOGIA DE CONTROLE.** 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Universidade Federal do Ceará, 1994.

Google Earth, 2014, *Imagem de Satélite*, imagem retirada da interseção entre a Avenida Telésforo Cândido de Resende e a Rua Jacinto Siqueira acessada em 20 de novembro de 2014.

Handbuch für die Bemessung von Strassenverkehrsanlagen – HBS.
German Federal Ministry of Transport, Building and Urban Affairs. 2001.

LUNA, MARCELO DOS SANTOS DE. **Sobre o Fluxo de Saturação: Conceituação, Aplicação, Determinação e Variação.** Fortaleza, 2003. XIII, 132 fl., Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará. Fortaleza 2003.

PIETRANTONIO, Hugo. ESCOLA POLITECNICA – UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO. Departamento de Engenharia de Transportes. **Engenharia de Trafego: Controle de trafego em Fluxo Descontínuo.**

TRB, ***Highway Capacity Manual*** – HCM. Washington D. C, *Transportation Research Board*, 2000.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA – UFSC. **Determinação da Composição de Tráfego para o ano de 2006.** Laboratório de Transportes. Núcleo de Estudos de Tráfego – NET. 2006.

WEBSTER, F. V., 1957, ***Traffic Signal Settings - Road Research Technical Paper No. 39.*** Department of Scientific and Industrial Research Road Research Laboratory, Londres, Inglaterra, Her Majesty's Stationary Office.

WEBSTER, F. V, COBBE, B. M., 1966, **Traffic Signals – Road Research Technical Paper No. 56.** Department of Scientific and Industrial Research Road Research Laboratory, Ministry of Transport, Londres, Inglaterra, Her Majesty's Stationary Office.

ANEXOS

Anexo: Fluxo de Veículos – Estágio G1

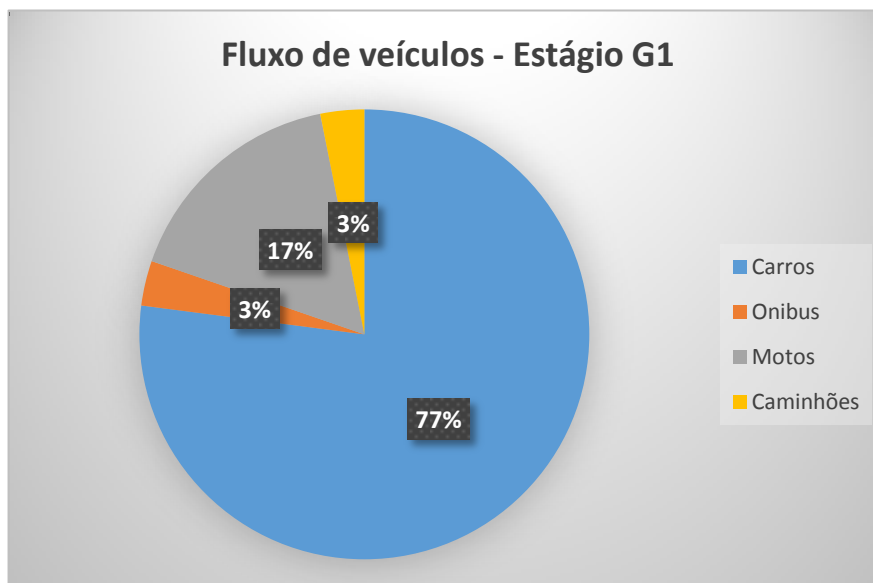


Gráfico 1: Fluxo de veículos referente ao Estágio G1

Tabela 4: Número de veículos referente ao Estágio G1

Intervalo	Carro	Onibus	Moto	Caminhão	Total	Total Eq. Webster	Total Eq. DNIT
Somatório Total	930	39	200	38	1207	1150	1245

Anexo: Fluxo de Veículos - Estágio G2

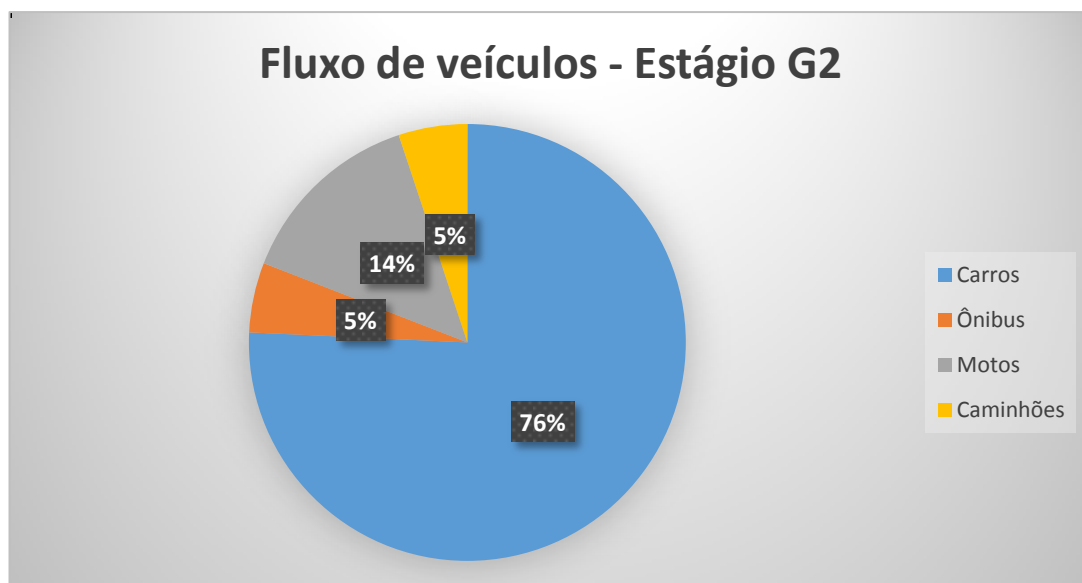


Gráfico 2: Fluxo de veículos referente ao Estágio 2

Tabela 5: Número de veículos referente ao Estágio G2

Intervalo	Carro	Onibus	Moto	Caminhão	Total	Total Eq. Webster	Total Eq. DNIT
Somatório Total	849	58	157	57	1121	1131	1154

Tabela 6 - Fluxo de veículos conforme movimento, referente ao Estágio G2

808	Reto (MV2)
288	Retorno (MV3)
58	Direita (MV5)

Anexo: Inclinação da Via

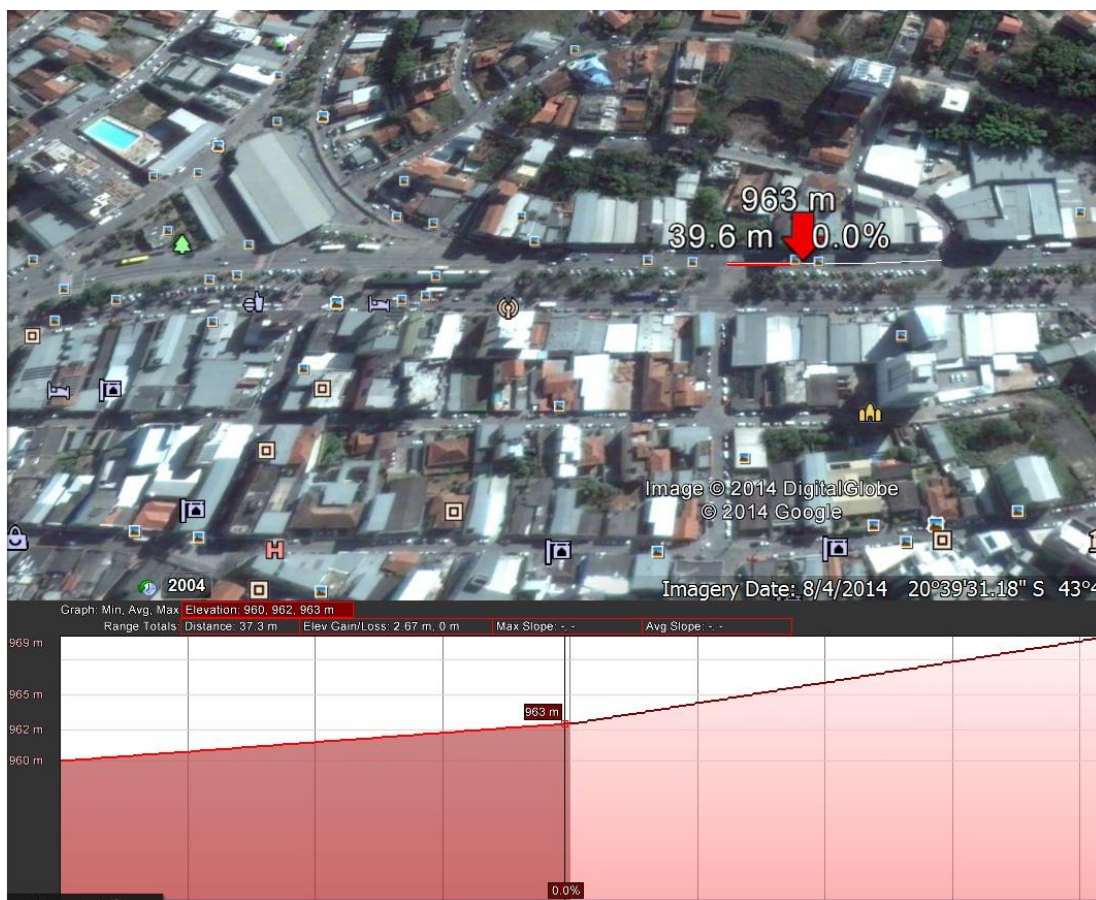


Figura 19: Inclinação da Via

Fonte: *Google Earth*