

DIEGO FERNANDES NERIS

Melhoria do desempenho do tráfego em rotatórias com o emprego de semáforos próximos na via principal

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, Pós-graduação em Engenharia de Transportes.

Área de concentração: Planejamento e Operação de Sistemas de Transporte.

Orientador: Prof. Titular Antonio Clóvis Pinto Ferraz

SÃO CARLOS

2014

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

N445m Neris, Diego Fernandes
Melhoria do desempenho do tráfego em rotatórias com
o emprego de semáforos próximos na via principal /
Diego Fernandes Neris; orientador Antonio Clóvis Pinto
Ferraz. São Carlos, 2014.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação
em Engenharia de Transportes e Área de Concentração em
Planejamento e Operação de Sistemas de Transporte --
Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de
São Paulo, 2014.

1. Rotatória. 2. Nível de serviço. 3. Atraso. 4.
Semáforo. 5. Gerenciamento de tráfego. 6. Segurança
viária. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **DIEGO FERNANDES NERIS**.

Título da dissertação: "Melhoria do desempenho do tráfego em rotatórias com o emprego de semáforos próximos na via principal".

Data da defesa: 24/02/2014

Comissão Julgadora:

Resultado:

Prof. Titular **Antonio Clóvis Pinto Ferraz (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

APROVADO

Profa. Dra. **Márcia de Andrade Pereira**
(Universidade Federal do Paraná/UFPR)

APROVADO

Profa. Dra. **Bárbara Stole Bezerra**
(Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"/UNESP-Bauru)

APROVADO

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes:
Prof. Associado **Antônio Néelson Rodrigues da Silva**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Titular **Denis Vinicius Coury**

Às quatro gerações de mulheres da minha família:
minha avó, Ângela;
minha mãe, Célia;
minha irmã, Kelly;
e minha sobrinha, Ana Julia.

AGRADECIMENTOS

A Deus pelas oportunidades que tive na minha vida.

Ao meu orientador, Coca Ferraz, pela confiança, motivação, paciência e ensinamentos.

À Márcia de Andrade Pereira, minha professora na Graduação da Engenharia Civil, que me deu os ensinamentos iniciais dessa área fantástica que é a Engenharia de Transportes e que me motivou a ir atrás dos meus sonhos profissionais.

Aos professores do Departamento de Transportes da Escola de Engenharia de São Carlos da USP, que sempre estiveram à disposição para ajudar no que fosse preciso, principalmente aos professores Setti, pela supervisão durante meu estágio pedagógico e pelo apoio no desenvolvimento deste trabalho, e ao professor Antônio Néelson, pela atenção e orientação acadêmica.

À Magaly Romão, pelos ensinamentos acadêmicos, profissionais e pessoais, sempre dando apoio e motivação.

Ao Observatório Nacional de Segurança Viária que disponibilizou recursos para a divulgação internacional deste trabalho.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, CNPq, pelo suporte financeiro para a realização do Programa de Mestrado.

Ao José Elievam Bessa Junior pela ajuda na programação e no uso do simulador.

Aos amigos que fiz em São Carlos, que ajudaram muito na minha adaptação à cidade e que jamais esquecerei: Conrado Vidotte Plaza, Gláucia Maia de Oliveira e Marcela Navarro Pianucci.

À Anabele Lindner, amiga preciosa que foi minha colega na graduação, na pós-graduação e que espero também o seja na vida profissional.

Aos meus companheiros de orientação: Fernando Hirose, Fernando Velázquez, Tiago Bastos, Karla Cristina, Bárbara Bezerra e Magaly Romão, pelas importantes “dicas” na realização deste trabalho e pelos momentos de descontração.

Ao Evandro Tortora e Giovanna Sander, pela companhia em momentos importantes.

Aos meus colegas da Área de Pós-Graduação em Transportes, pelo companheirismo e apoio.

Aos funcionários do Departamento de Transportes, que sempre ajudaram no que foi preciso; em especial, à Heloisa e à Bete.

Aos meus amigos de Curitiba, que estão sempre em contato e me ajudam a renovar as energias; em especial, ao João Otávio que me ajudou até na elaboração de um artigo.

E, para finalizar, à minha família: minha mãe, Célia, que me ensinou a ter forças para lutar na vida; meu pai, Fernando, que se emocionou comigo nos momentos de vitória; minha irmã, Kelly, que sempre me passa a tranquilidade de saber que não estou sozinho na vida; e minha sobrinha, Ana Julia, que enche minha vida de alegria com as risadas que damos juntos.

Agradeço, também, a outros membros da minha família que sempre me recebem bem e ficam felizes com as minhas vitórias: Rosane, Selma, Márcia, Priscila, tia Lana e tio Marcos.

Aquele garoto, que gostava de brincar de carrinho,
hoje se vê trabalhando naquilo que já gostava desde criança
e trabalhará por uma melhoria na qualidade de vida daqueles que hoje brincam.

RESUMO

NERIS, D. F. **Melhoria do desempenho do tráfego em rotatórias com o emprego de semáforos próximos na via principal.** 2014. 98p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

Neste trabalho é avaliado o desempenho operacional de uma nova configuração idealizada para a operação de rotatórias de três pernas (prioridade para os veículos da via principal com semáforos próximos). Nesta avaliação é comparado o novo sistema de operação com outros dois usualmente empregados: (1) prioridade para os veículos que estão circulando na ilha central (rotatória convencional) e (2) prioridade para os veículos da via principal sem o emprego de semáforo, bem como, com base nos resultados das comparações realizadas, são estabelecidas as condições dos fluxos de tráfego em que é indicada uma ou outra configuração. Os valores obtidos nas simulações mostram, de forma inequívoca, o desempenho operacional superior da rotatória com prioridade para a via principal com semáforos próximos, adequadamente programados, no caso de fluxos altos. O emprego de semáforos próximos reduz significativamente o atraso na aproximação crítica e, em consequência, o tamanho da fila, como consequência do aumento expressivo da capacidade de tráfego da rotatória. Os resultados da simulação corroboram o que se pode observar nos sistemas implantados na cidade de Araraquara, onde a colocação de semáforos próximos de rotatórias de três pernas melhorou de forma significativa o desempenho operacional dos dispositivos, reduzindo o atraso crítico e o tamanho da fila crítica e aumentando a capacidade. O acompanhamento da acidentalidade nas rotatórias onde foram colocados semáforos próximos na cidade de Araraquara mostra uma redução dos acidentes graves de aproximadamente 90%. Uma explicação para essa redução pode ser devido ao aumento da paciência dos motoristas em esperar uma brecha maior para entrar na rotatória, pois sabem que, esporadicamente, há uma interrupção do fluxo na via principal.

Palavras chave: Rotatória. Nível de serviço. Atraso. Semáforo. Gerenciamento de tráfego. Segurança viária.

ABSTRACT

NERIS, D. F. **Traffic performance improvement at roundabouts with traffic lights near the main street**. 2014. 98p. Master of science thesis – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

In this study the operational performance is measured of a new idealized configuration for the operation in three-legged traffic circles (priority way for the vehicles from the main street with traffic lights nearby). This measured is compared the new operational system with two others usually systems: (1) priority for the circulating traffic (conventional roundabout) and (2) priority for vehicles from the main street without traffic lights. Also, based on the results from the comparisons, seek to establish what traffic flow conditions are better for a given configuration. The values obtained from the simulations demonstrate, clearly, the superior operational performance of the traffic circle with main road priority combined with properly programmed traffic lights nearby, in the case of high flows. The use of traffic lights reduces significantly the delay from the critical approach, and consequently, the queue length, as a consequence resulting on significant traffic capacity increase at the intersection. Simulation results validate what can be seen in Araraquara, where the installation of traffic lights near from the three-legged traffic circle improved significantly the operating performance of the devices, reducing the critical delay and critical queue size and increasing the effective capacity. Monitoring the accident rate in traffic circles where traffic lights nearby were placed in Araraquara shows a reduction of approximately 90% in serious accidents. An explanation of this reduction may be due to the increased of patience of drivers in wait for a larger gap to enter on the roundabout, because they know there will be an interruption on the main street, sporadically.

Key words: Traffic circle. Level of service. Delay. Traffic light. Traffic management. Road safety.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Primeira rotatória onde o sistema foi implantado.....	25
Figura 2.1 – Relação entre velocidade, densidade e fluxo – Modelo Greenshields.....	31
Figura 2.2 – Relação entre velocidade, densidade e fluxo – Modelo HCM.....	32
Figura 2.3 – Dinâmica da formação de pelotão.....	33
Figura 2.4 – Formação da onda de choque.....	34
Figura 2.5 – Onda de choque.....	35
Figura 2.6 – Partes da onda de choque.....	35
Figura 2.7 – Relação fluxo X densidade calibrada.....	36
Figura 2.8 – Distância de frenagem em função da velocidade.....	38
Figura 2.9 – Direções a serem observadas para a tomada de decisão.....	38
Figura 2.10 – Condições de visibilidade em função do ângulo de observação.....	39
Figura 2.11 – Probabilidade de acidente com vítima fatal em função da velocidade.....	40
Figura 2.12 – Relação do raio de curvatura com a velocidade do veículo.....	41
Figura 2.13 – Diferentes ângulos de colisões.....	41
Figura 2.14 – Sinalização de “pare” e “dê a preferência”.....	44
Figura 2.15 – Sinalização de “parada obrigatória à frente”.....	45
Figura 2.16 – Linha de retenção e de “dê a preferência”.....	46
Figura 3.1 – Elementos físicos de uma rotatória.....	50
Figura 3.2 – Processo para projeto de rotatória.....	53
Figura 3.3 – Sensibilidade quanto à conversão à esquerda.....	54
Figura 3.4 – Pontos de conflito.....	55
Figura 3.5 – Acidentes em rotatórias.....	56
Figura 3.6 – Processo analítico para cálculo de nível de serviço.....	59
Figura 3.7 – Capacidade de entrada na rotatória.....	60
Figura 3.8 – Relação distância de veículos em fila X atraso.....	61
Figura 3.9 – Rotatória com preferência para a via circular.....	65
Figura 3.10 – Rotatória com preferência para a via principal.....	66
Figura 4.1 – Processo interativo entre veículos próximos e no mesmo sentido.....	71
Figura 5.1 – Configuração da rotatória analisada.....	73
Figura 5.2 – Configuração da rotatória analisada.....	74
Figura 5.3 – Operação na rotatória com formação de pelotões.....	76
Figura 5.4 – Atraso crítico x fluxo na via secundária (aproximação 3).....	77
Figura 5.5 – Tamanho da fila crítica x fluxo na via secundária (aproximação 3).....	78
Figura 5.6 – Atraso crítico x fluxo na via secundária (aproximação 3).....	79
Figura 5.7 – Tamanho da fila crítica x fluxo na via secundária (aproximação 3).....	79
Figura 5.8 – Atraso crítico x fluxo na via secundária (aproximação 3).....	80
Figura 5.9 – Tamanho da fila crítica x fluxo na via secundária (aproximação 3).....	81
Figura 5.10 – Variação de atraso para um total de 200 veíc/h nas aproximações 1 e 2.....	82
Figura 5.11 – Variação de atraso para um total de 300 veíc/h nas aproximações 1 e 2.....	82
Figura 5.12 – Variação de atraso para um total de 400 veíc/h nas aproximações 1 e 2.....	83
Figura 5.13 – Variação de atraso para um total de 500 veíc/h nas aproximações 1 e 2.....	83

Figura 5.14 – Variação de atraso para um total de 600 veíc/h nas aproximações 1 e 2.....	84
Figura 5.15 – Variação de atraso para um total de 700 veíc/h nas aproximações 1 e 2.....	84
Figura 5.16 – Variação de atraso para um total de 800 veíc/h nas aproximações 1 e 2.....	85
Figura 5.17 – Variação de atraso para um total de 900 veíc/h nas aproximações 1 e 2.....	85
Figura 5.18 – Variação de atraso para um total de 1000 veíc/h nas aproximações 1 e 2.....	86
Figura 5.19 – Variação de atraso para um total de 1100 veíc/h nas aproximações 1 e 2.....	86
Figura 5.20 – Limites dos fluxos de tráfego para nível de serviço A.....	87
Figura 5.21 – Limites dos fluxos de tráfego para nível de serviço B.....	88
Figura 5.22 – Limites dos fluxos de tráfego para nível de serviço C	88
Figura 5.23 – Limites dos fluxos de tráfego para nível de serviço D	89
Figura 5.24 – Limites dos fluxos de tráfego para nível de serviço E.....	89
Figura 5.25 – Variação do tipo de operação em função do fluxo para nível de serviço até E	91

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Elementos físicos de uma rotatória	50
Tabela 3.2 – Critério para avaliação do nível de serviço em rotatórias.....	62
Tabela 5.1 – Matriz origem-destino do tráfego.....	74
Tabela 5.2 – Valores do tempo de verde que levam ao mínimo atraso crítico.	75
Tabela 5.3 – Valores da capacidade na via secundária para os três tipos de rotatórias e diferença entre eles.....	90

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CONTRAN – Conselho Nacional de Trânsito

DENATRAN – Departamento Nacional de Trânsito

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

STT – Departamento de Transportes

EESC – Escola de Engenharia de São Carlos

USP – Universidade de São Paulo

FHWA – Federal Highway Administration

HCM – Highway Manual Capacity

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

MUTCD – Manual on Uniform Traffic Control Devices

PTV – Planung Transport Verkehr AG

TRB – Transportation Research Board

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	23
1.1. Contextualização.....	23
1.2. Objetivos	25
1.3. Metodologia.....	26
1.4. Estrutura.....	26
2. FUNDAMENTOS DA ENGENHARIA DE TRÁFEGO	29
2.1. Conceituação de Engenharia de Tráfego.....	29
2.2. Características do Fluxo de Tráfego	29
2.2.1. Parâmetros macroscópicos	30
2.2.2. Parâmetros microscópicos.....	32
2.3. Fluxo em pelotão.....	33
2.4. Segurança nas interseções.....	36
2.5. Operação nas interseções	42
2.5.1. Interseção sem sinalização.....	43
2.5.2. Interseção com sinalização.....	43
2.5.3. Interseção semaforizada	47
3. ROTATÓRIAS	49
3.1. Fundamentos	49
3.2. Segurança.....	54
3.3. Capacidade e Nível de serviço.....	57
3.4. Aceitação de gap	63
3.5. Principais tipos de operação em rotatórias	65
3.5.1. Rotatória com prioridade para a via circular.....	65
3.5.2. Rotatória com prioridade para a via principal.....	66
4. SIMULAÇÃO DE TRÁFEGO	67
4.1. Fundamentos	67
4.2. Simulador VISSIM.....	69
5. AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DAS ROTATÓRIAS.....	73
5.1. Considerações iniciais.....	73
5.2. Resultados para rotatória com prioridade para a via circular – Tipo 1	77
5.3. Resultados para a rotatória com prioridade para a via principal – Tipo 2.....	78

5.4. Resultados para a rotatória com prioridade para a via principal com semáforos próximos – Tipo 3.....	80
5.5. Comparação dos desempenhos com base nos valores do atraso crítico	81
5.6. Comparação do desempenho com base nos níveis de serviço	87
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	93
6.1. Sobre o desempenho operacional das rotatórias com semáforos próximos	93
6.2. Sobre a segurança do trânsito nas rotatórias com semáforos próximos.....	93
6.3. Sobre sugestões para trabalhos futuros.....	94
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	95

1. INTRODUÇÃO

1.1. Contextualização

O sistema viário urbano deve ser adequado para conduzir o tráfego de veículos e pedestres com segurança e fluidez. Essas características são muito importantes, principalmente nos cruzamentos, uma vez que esses constituem os gargalos do sistema viário no tocante à capacidade do tráfego e onde é maior o risco de acidentes.

Quando o fluxo de veículos em uma interseção é pequeno, a operação com a via mais movimentada tendo preferência de passagem é a solução normalmente empregada. No entanto, quando o volume de veículos é maior, para permitir que os veículos da via secundária possam cruzar a via principal, outras soluções necessitam ser utilizadas, tais como: semáforo, rotatória ou viaduto (transposição em desnível).

A rotatória (ou rótula) é um dispositivo viário de interseção em nível onde os veículos se movem contornando uma ilha central no sentido anti-horário (no Brasil), apresentando a vantagem de permitir a realização de todos os movimentos possíveis: em frente, conversão à direita, conversão à esquerda e retorno. Em geral, o fluxo que circula tem prioridade (preferência), pois essa é a solução que traz maior segurança (os veículos são obrigados a se aproximar com velocidade baixa, pois podem ter que parar) e, geralmente, maior capacidade, evitando o colapso da rotatória (bloqueio total das correntes de tráfego) em condições de fluxo intenso.

No entanto, quando o movimento é muito maior em uma das vias, pode ser indicada a operação com prioridade para os fluxos dessa via – caso em que os fluxos da via secundária devem parar duas vezes no dispositivo: na entrada e na alça interna.

Qualquer que seja o tipo de operação utilizado em uma rotatória, quando o volume de veículos é muito alto, há formação de filas maiores, aumento do atraso para passar pelo dispositivo e aumenta também o número de acidentes, pois os

condutores, em razão da espera para passar, acabam por aceitar brechas menores que o aceitável entre veículos da via preferencial. Nesse caso, a solução é semaforizar todos os cruzamentos da rotatória utilizando semáforos de quatro fases/estágios (o que reduz a capacidade e leva a grandes demoras), ou impedir as conversões à esquerda e os retornos utilizando semáforos de duas fases/estágios (o que prejudica significativamente a acessibilidade, a mobilidade e pode acarretar problemas no trânsito em outros locais).

Para evitar os problemas citados nas duas soluções usualmente empregadas, uma idéia, presumivelmente inédita, originada no Departamento de Transportes da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo (STT/EESC/USP), é a utilização de semáforos colocados na via principal a certa distância do dispositivo (algo entre 15 e 30 metros), com prioridade de passagem na rotatória para os fluxos da via principal. O agrupamento de veículos, proporcionado pelos dois semáforos na via principal, é suposto melhorar significativamente o desempenho do dispositivo com aumento da capacidade, redução da demora e diminuição do número de acidentes.

Uma característica importante desse novo sistema é a possibilidade de defasar os inícios da fase verde dos semáforos de modo à, quando pertinente, favorecer movimentos de conversão à esquerda evitando que em condições de trânsito intenso a rotatória entre em colapso com o bloqueio do tráfego.

Para testar na prática a proposta idealizada no STT/EESC/USP, o sistema foi implantado em algumas interseções em Araraquara (cidade que se encontra localizado no interior do Estado de São Paulo e conta com uma população de 225 mil habitantes). Inicialmente, o sistema foi implantado em rotatórias de três pernas e, posteriormente, em rotatórias de quatro pernas, com total sucesso. Na Figura 1.1 é mostrada a primeira rotatória onde o sistema foi implantado.



Figura 1.1 – Primeira rotatória onde o sistema foi implantado
Fonte: Google Maps (2014)

O propósito deste trabalho é avaliar o desempenho do novo sistema idealizado para a operação de rotatórias em comparação com os sistemas usualmente empregados (preferência para o tráfego circular e para a via principal), mediante a utilização de técnica de simulação em computador para gerar valores dos principais parâmetros de desempenho do tráfego (tamanho de fila e atrado).

1.2. Objetivos

O objetivo deste trabalho é avaliar o desempenho do novo sistema, tomando como referência o atraso crítico (aproximação cujo valor médio do atraso é maior) e da fila crítica (aproximação cujo tamanho médio de fila é maior), da nova configuração idealizada para a operação de rotatórias de três pernas, com prioridade para os veículos da via principal e com semáforos próximos do dispositivo em comparação com os dois sistemas usualmente empregados: (1) prioridade para os veículos que estão na rotatória e (2) prioridade para os veículos da via principal sem o emprego de semáforo.

Também, com base nos resultados das comparações realizadas, estabelecer através das condições dos fluxos de tráfego a solução mais indicada.

1.3. Metodologia

Os seguintes procedimentos foram utilizados na consecução do trabalho:

- Pesquisa bibliográfica e sistematização dos conceitos básicos de Engenharia de Tráfego importantes no contexto do trabalho.
- Pesquisa bibliográfica e sistematização dos principais aspectos relacionados com os dispositivos viários do tipo rotatória.
- Pesquisa bibliográfica e sistematização dos principais aspectos relacionados com simulação do tráfego, em especial do simulador VISSIM utilizado nas simulações realizadas neste trabalho.
- Definição das hipóteses e geração dos cenários no simulador de tráfego VISSIM, dos três tipos de configuração de rotatórias de três pernas: com prioridade para os veículos que estão na rotatória, com prioridade para os veículos da via principal e com prioridade para os veículos da via principal com semáforos próximos da rotatória.
- Sistematização dos resultados obtidos nas simulações e análise comparativa do desempenho dos três tipos de configuração de rotatórias, tomando como referência o atraso crítico e fila crítica.

1.4. Estrutura

O primeiro capítulo reúne a contextualização, os objetivos, a metodologia e a estrutura do trabalho.

O segundo capítulo contém os conceitos básicos da Engenharia de Tráfego importantes no contexto do trabalho.

No capítulo três são apresentados os principais aspectos relacionados aos dispositivos viários tipo rotatória.

O quarto capítulo reúne os fundamentos sobre simulação do tráfego e uma descrição detalhada do simulador VISSIM utilizado nas simulações realizadas no trabalho.

No capítulo cinco são apresentados as hipóteses e os resultados do atraso crítico e do tamanho da fila crítica obtidos nas simulações dos três tipos de configuração de rotatórias de três pernas: prioridade para os veículos que estão na rotatória, prioridade para os veículos da via principal e este último caso com semáforos de próximos da rotatória. Também a análise comparativa do desempenho dos três tipos de rotatória.

Por último, no sexto capítulo, são colocadas algumas observações relevantes no contexto do trabalho.

2. FUNDAMENTOS DA ENGENHARIA DE TRÁFEGO

2.1. Conceituação de Engenharia de Tráfego

Roess, Prassas e McShane (2004) definem a Engenharia de Tráfego como sendo a parte da Engenharia de Transportes que trabalha com o planejamento, projeto geométrico e operações de tráfego em vias urbanas e rurais, com o objetivos de obter uma via com maior segurança e eficiência.

Para medir a eficiência do tráfego e a segurança, são necessários alguns conhecimentos relativos ao fluxo de veículos e ao comportamento dos motoristas. Essa análise é complexa pois uma variável depende da outra e ambas dependem do cenário envolvido.

2.2. Características do Fluxo de Tráfego

Segundo Khisty e Lall (1998), pode-se classificar o fluxo de veículos em duas categorias:

- Fluxo não interrompido: A operação do fluxo ocorre, em geral, em função do número de veículos e da geometria da via. Essa é característica de *freeways* e trechos de rodovias.
- Fluxo interrompido: A operação da via ocorre por meio de diversas paradas (por sinal de parada obrigatória ou semáforo, por exemplo), característica em vias urbanas.

Os parâmetros analisados na engenharia de tráfego podem ser classificados em macroscópicos: onde a corrente de tráfego é analisada como um todo e os principais parâmetros sendo o volume de veículos, velocidade e densidade; ou em microscópicos: onde é analisado o comportamento de cada veículo individualmente e os principais parâmetros sendo velocidade individual, *headway* e o *gap* (ROESS, PRASSAS e MCSHANE, 2004).

2.2.1. Parâmetros macroscópicos

Os parâmetros macroscópicos de tráfego estão relacionados à corrente de tráfego como um todo. Esses parâmetros são a seguir descritos segundo Roess, Prassas e McShane (2004).

- O volume de tráfego é definido como sendo o número de veículos que passam em certo ponto da via (seja por faixa ou direção) durante um intervalo de tempo.
- O fluxo de tráfego corresponde ao volume de tráfego que passa por unidade de tempo em um ponto ou seção de via.
- A velocidade é definida como a relação entre a distância percorrida e o tempo gasto.

O cálculo da velocidade média pode ser feito de duas maneiras distintas, originando a velocidade média no tempo e a velocidade média no espaço (a mais importante delas):

- Velocidade média no tempo (V_{mt}): média da velocidade de todos os veículos que passam em um ponto; o cálculo é feito conforme a indicado na expressão a seguir (onde “d” é a distância percorrida, “t_i” o tempo que o veículo “i” levou para percorrer e “n” o número de veículos observados):

$$V_{mt} = \frac{\sum_i \frac{d}{t_i}}{n} \quad (1)$$

- Velocidade média no espaço (V_{ms}): média da velocidade dos veículos que estão em um trecho de via; o cálculo é feito conforme a expressão a seguir (onde “d” é a distância percorrida, “t_i” o tempo que o veículo “i” levou para percorrer e “n” o número de veículos observados):

$$V_{ms} = \frac{d}{\frac{\sum_i t_i}{n}} = \frac{nd}{\sum_i t_i} \quad (2)$$

A densidade (concentração) corresponde ao número de veículos por unidade de distância de uma via.

As variáveis fluxo (q), velocidade média no espaço (u) e densidade (k) configuram a equação fundamental do fluxo de tráfego:

$$q = u \times k \quad (3)$$

Segundo Andrade (2012), há vários modelos teóricos ou empíricos que estabelecem a relação entre fluxo, velocidade e concentração.

O modelo empírico de Greenshields é o mais simples deles, pois estabelece como linear a relação velocidade x densidade e, em consequência, as relações velocidade x fluxo e fluxo x densidade resultam como parábolas. Os gráficos correspondentes a essas relações são mostradas na Figura 2.1

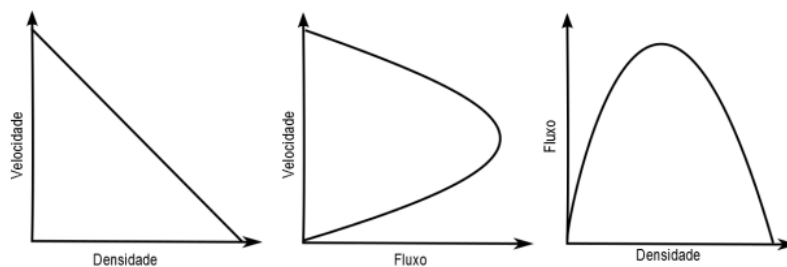


Figura 2.1 – Relação entre velocidade, densidade e fluxo – Modelo Greenshields
Fonte: Andrade (2012)

Na Figura 2.2 são mostrados os gráficos adotados pelo *Highway Capacity Manual* baseado em pesquisas de campo realizadas nos Estados Unidos.

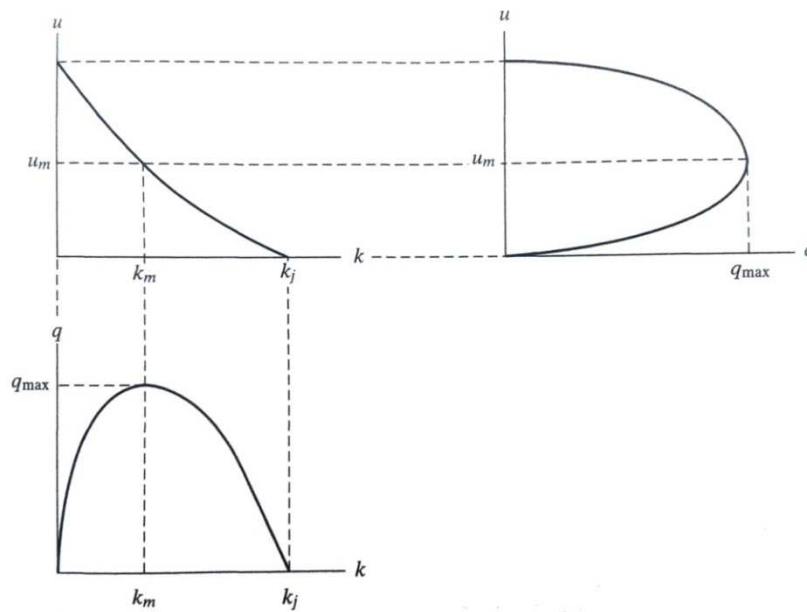


Figura 2.2 – Relação entre velocidade, densidade e fluxo – Modelo HCM
 Fonte: Papacostas e Pevedouros (2001)

2.2.2. Parâmetros microscópicos

Os parâmetros microscópicos estão relacionados à interação entre veículos, ou seja, cada veículo é analisado individualmente e são muito influenciados pelo comportamento humano. A seguir são descritos dois deles, espaçamento e *headway*, de acordo com Roess, Prassas e McShane (2004).

O espaçamento, é definido como a distância entre dois veículos sucessivos na corrente de tráfego. O espaçamento médio corresponde ao inverso da concentração, como indicado na expressão que segue (onde “k” é a densidade em veículos por quilômetro por faixa e “s” o espaçamento em metros):

$$k = \frac{1000}{s} \quad (4)$$

O *headway* é definido como o intervalo de tempo entre a passagem de dois veículos sucessivos por um ponto da via. O *headway* médio corresponde ao inverso

do fluxo de tráfego, como indicado na expressão que segue (onde “q” é o fluxo de veículos em veículos por hora por faixa e “h” o *headway* em segundos).

$$q = \frac{3600}{h} \quad (5)$$

2.3. Fluxo em pelotão

A formação de pelotões de veículos é causada por uma interrupção no tráfego que altere as condições normais de fluxo. Essa interrupção pode ser causada, por exemplo, devido a um veículo mais lento à frente, a um acidente ou a um semáforo.

Um exemplo de formação de pelotão é mostrado na conforme a Figura 2.3, que apresenta quatro situações em um mesmo trecho de via, mas em diferentes momentos, onde o veículo em destaque viaja a uma velocidade inferior aos outros veículos.

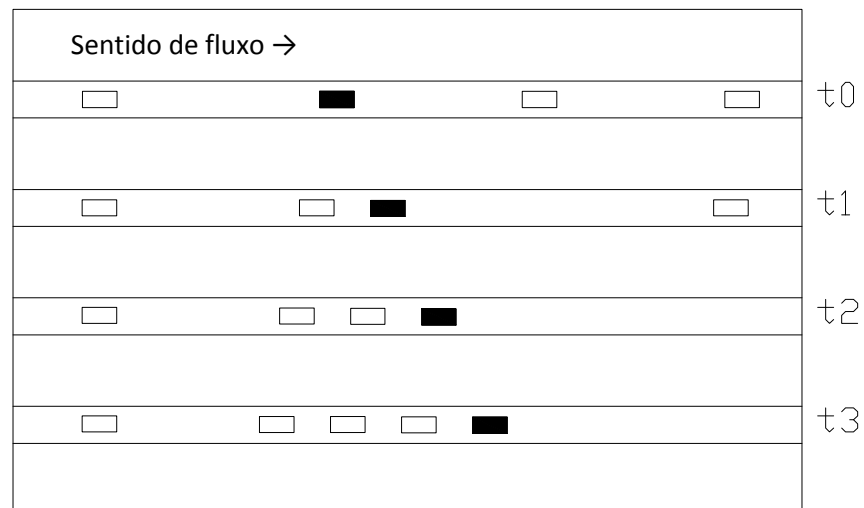


Figura 2.3 – Dinâmica da formação de pelotão

Para um estudo mais detalhado sobre a formação de pelotões, pode ser verificada a velocidade de onda de choque, conforme a Figura 2.4 que destaca a magnitude do pelotão no momento t1 e t3 no mesmo trecho de via.

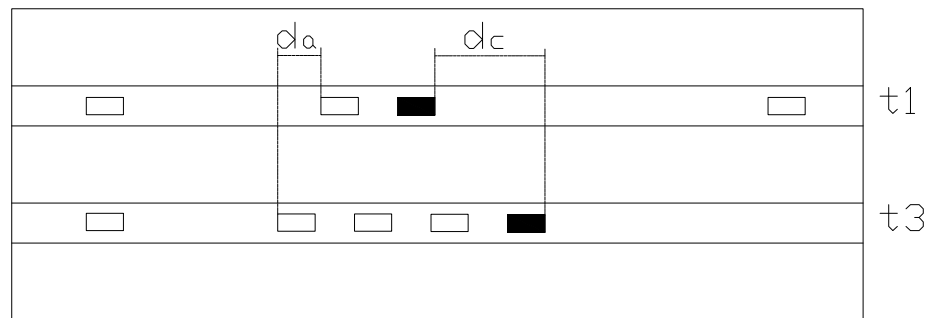


Figura 2.4 – Formação da onda de choque

Neste caso, a velocidade de onda de choque à frente do pelotão é um valor positivo (na mesma direção do fluxo) e está relacionada com a distância “ d_c ” dentro de um intervalo de tempo ($t_3 - t_1$). Já a onda de choque na parte de trás do pelotão tem um valor negativo (contra o fluxo) e está relacionada com a distância “ d_a ”, no mesmo intervalo de tempo.

Uma forma de representação da onda de choque é através do diagrama distância X tempo. Nesse diagrama é analisada a condição de cada veículo que trafega na via apresentando a distância percorrida e o tempo, formando assim uma reta média cuja inclinação determina a velocidade. Com isso, pode-se verificar o ponto em que há a formação de pelotão de veículos e a velocidade de onda de choque, conforme a Figura 2.5, sendo a reta “A” relativa ao último veículo antes do início da formação de pelotão, a reta “B” representando o veículo que lidera o pelotão (veículo que passa a ser lento no tempo t_0), a reta X indica a parte de trás do pelotão e a reta “Y”, no trecho entre as retas “B” e “X”, o tamanho do pelotão no tempo t_3 . A partir da inclinação das retas “B” e “X”, podem ser obtidas as velocidades de onda de choque à frente e atrás do pelotão, respectivamente.

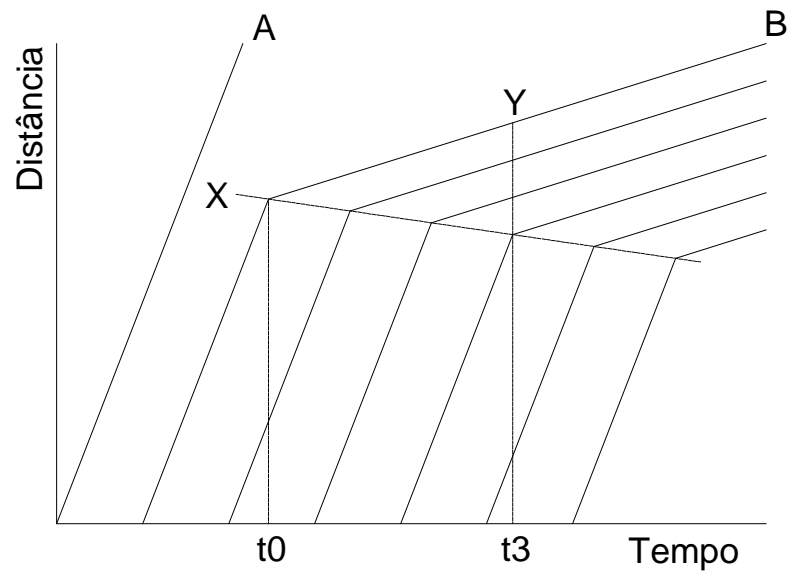


Figura 2.5 – Onda de choque

Papacostas e Prevedouros (2001) apresentam outra forma de cálculo de velocidade de onda de choque (u_{sw}) através da equação fundamental do fluxo de tráfego, envolvendo o fluxo (q) e a concentração (k) de veículos nas situações à frente, atrás e no pelotão, conforme a Figura 2.6, onde o índice “a” das variáveis representa a situação do tráfego atrás do pelotão, o índice “b” a situação no pelotão e o índice “c” à frente do pelotão.

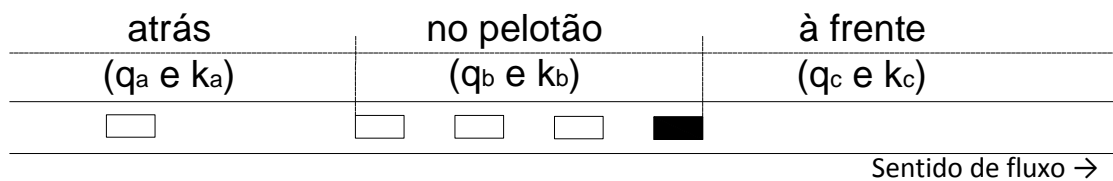


Figura 2.6 – Partes da onda de choque

À frente do pelotão:

$$u_{sw} = \frac{q_c - q_b}{k_c - k_b} \quad (6)$$

Atrás do pelotão:

$$u_{sw} = \frac{q_b - q_a}{k_b - k_a} \quad (7)$$

Papacostas e Prevedouros (2001) ainda citam que, caso não tenha as informações relativas ao fluxo de veículos e à concentração, esses dados podem ser obtidos através do gráfico calibrado da relação entre as duas variáveis, conforme a Figura 2.7 que indica o ponto “A”, relacionado ao fluxo atrás do pelotão, ponto “B”, relacionado ao fluxo no pelotão e ponto “C” relacionado ao fluxo à frente do veículo que lidera o pelotão. Para obter as informações é necessário saber a velocidade dos veículos viajando com e sem pelotão (V_1 e V_2 , respectivamente).

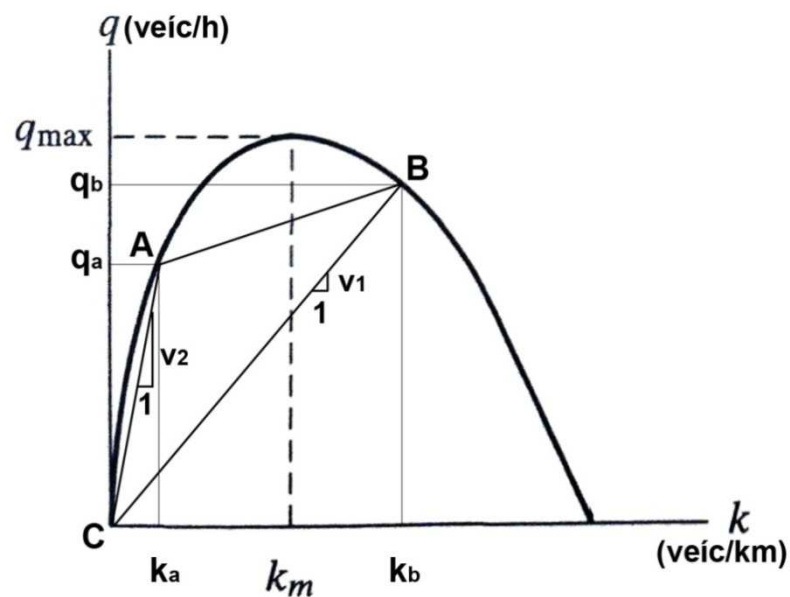


Figura 2.7 – Relação fluxo X densidade calibrada

2.4. Segurança nas interseções

Segundo o *Highway Capacity Manual* - HCM (2010), o fluxo interrompido é a forma de tráfego mais comum nas vias urbanas em razão da presença de semáforos, cruzamentos com vias preferenciais, parada de veículos à frente para fazer manobras de estacionamento ou entrar em garagens, etc.

As interseções são pontos críticos onde há o conflito entre veículos em sentidos e movimentos diferentes, ou seja, são locais mais prováveis de ocorrência de colisões em meios urbanos (AKISHINO, 1995).

Cunto (2008) cita duas situações de ocorrência de acidentes em interseções: a primeira quando há dois veículos em uma mesma faixa e o primeiro veículo trafega

em velocidade inferior ou está parando em razão de cruzamento semaforizado ou com sinal de parada obrigatória, ou para fazer conversão, e o segundo veículo deve lidar com essas ações a fim de evitar o choque. A segunda situação é no próprio cruzamento onde um veículo pode fazer um movimento indevido (por desrespeito às sinalizações ou ao erro de percepção de tempo para travessia) e o veículo que tem a preferência deve procurar evitar que o acidente ocorra.

Fortes *et al.* (2003) fazem algumas considerações com relação à segurança em interseções, como o fato da acidentalidade viária estar preponderantemente relacionada às falhas humanas e que, para isso, deve ser construída interseções que sejam fáceis de serem entendidas, facilitando a tomada de decisão de todos os envolvidos a fim de diminuir a probabilidade de acontecer erros, além de, quando possível, projetar interseções procurando evitar acidentes graves (tomando cuidado, por exemplo, com obstáculos que possam intensificar o choque no caso da perda de controle do veículo).

Segundo Fortes *et al.* (2003), existem fatores que influenciam a complexidade das tarefas nas tomadas de decisão, são eles:

- Velocidade de transposição: Para efetuar uma travessia, o motorista da via secundária se sente mais inseguro quanto maior for a velocidade dos veículos na via principal. Isso ocorre, pois o motorista sabe que a gravidade de acidente está relacionada com a velocidade. Além de o choque ser maior em velocidades elevadas, a distância de frenagem também aumenta consideravelmente devido ao tempo de percepção do motorista e ao atrito dos pneus com a via, conforme mostrado no gráfico da Figura 2.8, onde em azul tem-se a distância de frenagem em função da velocidade para pavimento seco e, em vermelho, para pavimento molhado.

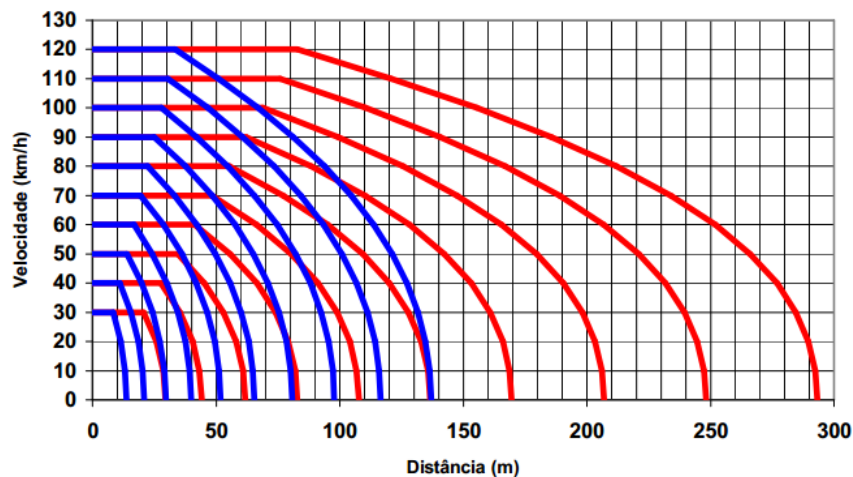


Figura 2.8 – Distância de frenagem em função da velocidade
Fonte: Fortes *et al.* (2003)

- Número de direções a serem observadas: O ângulo a ser observado pelo motorista da via secundária influencia muito na segurança e na fluidez do tráfego. Ao cruzar uma via principal com dois sentidos, o motorista deve visualizar um deles e, quando presta atenção no outro, só tem armazenado na memória a situação do primeiro sentido no ultimo momento que visualizou. Esse exercício é rápido e de memória, o que é difícil para alguns motoristas, principalmente em condições de fluxos intensos.

Um exemplo de diferença no ângulo de visão em duas interseções diferentes é apresentado na Figura 2.9, onde na situação “a” apresenta a necessidade de olhar para várias direções, quase formando um ângulo de 180° e, na situação “b”, o número de direções de observação reduzidas, com um ângulo de observações ligeiramente menor.

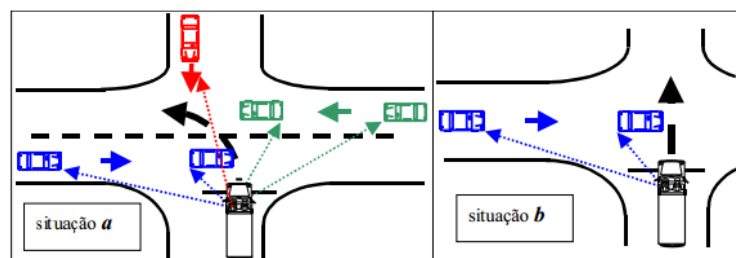


Figura 2.9 – Direções a serem observadas para a tomada de decisão
Fonte: Fortes *et al.* (2003)

- Ângulo de observação para tomada de decisão: Existem ângulos que podem ser favoráveis ou inaceitáveis (também chamados de “ponto cego”) para os motoristas e que, em uma interseção, pode ter um efeito significativo caso seja necessária a utilização dos conceitos de direção defensiva. Esse problema tende a ser maior para motoristas de veículos grandes, como ônibus e caminhão.

A Figura 2.10 apresenta, para um caso de motorista de caminhão, os ângulos ideais (nenhum ou quase nenhum movimento deve ser feito com a cabeça para visualizar), ângulos favoráveis (necessitam pequenos movimentos), ângulos desfavoráveis (que necessitam deslocamento do motorista) e, por último, ângulos inaceitáveis (“ponto cego”).

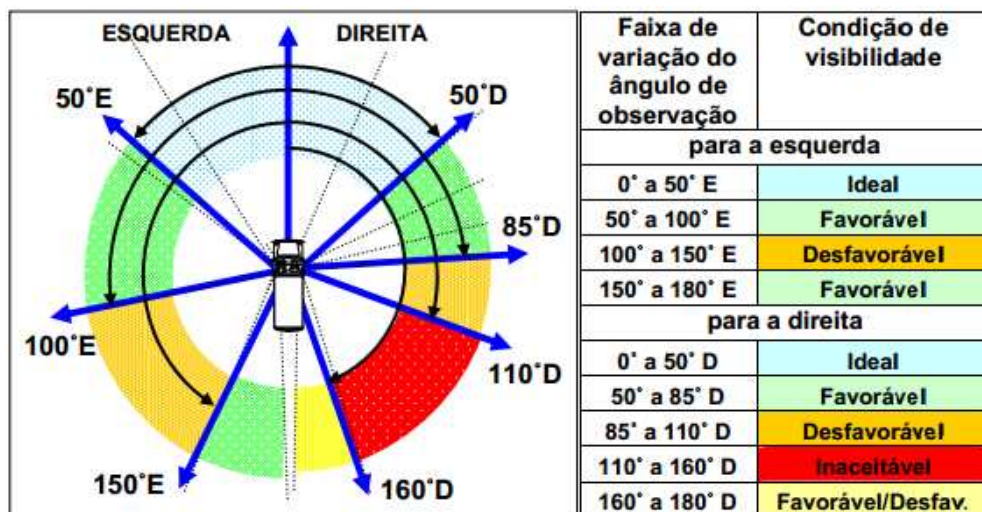


Figura 2.10 – Condições de visibilidade em função do ângulo de observação

Fonte: Fortes *et al.* (2003)

- Legibilidade da interseção: Uma boa interseção é aquela que induz o usuário a agir de forma natural com segurança e fluidez. Para isso, o cruzamento deve ser fácil de ser compreendida, tanto na sua aproximação quanto no interior dela, independente da sinalização, que é instalada como um reforço na orientação.

Ainda sob o ponto de vista de Fortes *et al.* (2003), existem fatores que influenciam na gravidade das possíveis colisões:

- Probabilidade de acidente com vítima fatal em função da velocidade e do tipo de choque: O grau de severidade de um envolvido em colisão varia com a(s) velocidade(s) do(s) veículo(s) e, obviamente, com o nível de proteção. Um choque frontal fornece uma maior massa a ser absorvida no caso de um impacto se comparado com um choque lateral, este que tem menos severidade que em caso de atropelamento de pedestre. Um estudo feito pelo *Lund Institute of Technology*, na Suécia, mostra a probabilidade de acidentes com vítimas fatais em função da velocidade, para cada um dos casos, conforme a Figura 2.11.

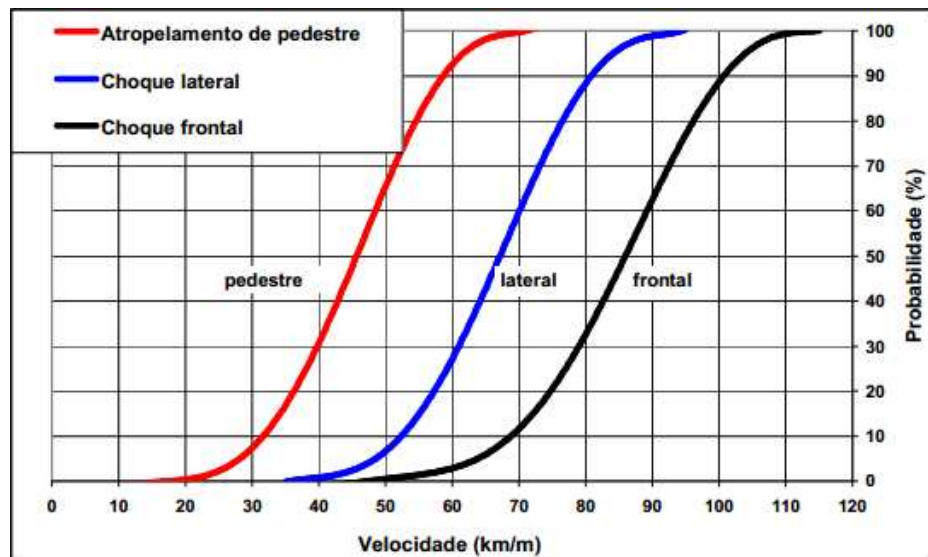


Figura 2.11 – Probabilidade de acidente com vítima fatal em função da velocidade
Fonte: Fortes *et al.* (2003)

- Relação do raio de curvatura com a velocidade: Existe uma relação entre o raio de curvatura e a velocidade do veículo em uma conversão ou rotatória, indicando a velocidade máxima do veículo sem haver perigo de derrapagem que pode ocasionar algum acidente. Essa relação é apresentada na Figura 2.12 com as padronizações determinadas pela AASHTO, em função da declividade da via, e com testes empíricos realizados por um veículo do tipo Golf e uma caminhonete D-20 no município de Araraquara.

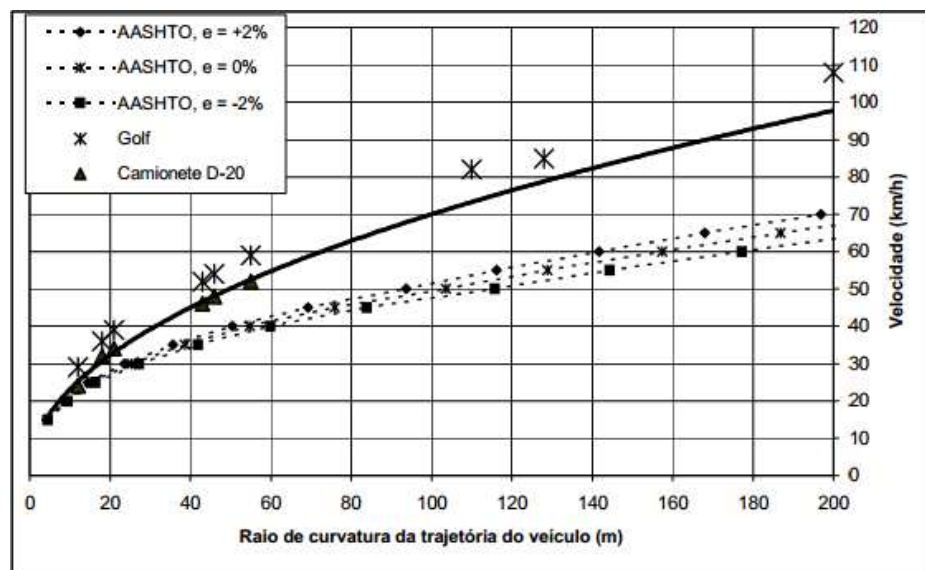


Figura 2.12 – Relação do raio de curvatura com a velocidade do veículo
Fonte: Fortes *et al.* (2003)

- Velocidade relativa de impacto em função do ângulo de colisão: Com relação à dissipação de energia, o ângulo formado entre dois veículos em colisão determinam a gravidade da mesma. Por exemplo, em uma colisão lateral (onde o vetor velocidade dos veículos forma um ângulo reto), quase 100% da energia cinética de um veículo é dissipada sobre o outro veículo.

No caso de uma colisão cujos vetores velocidade formam um ângulo menor, parte da energia é dissipada em forma de desvio da trajetória e a velocidade relativa se reduz.

Para exemplificar, a Figura 2.13 apresenta as duas situações, sendo a segunda, a velocidade relativa que o veículo 1 atingirá o 2 é de $V1\text{sen}\lambda$, ou seja, com uma velocidade reduzida em relação à velocidade que trafegava antes do acidente.

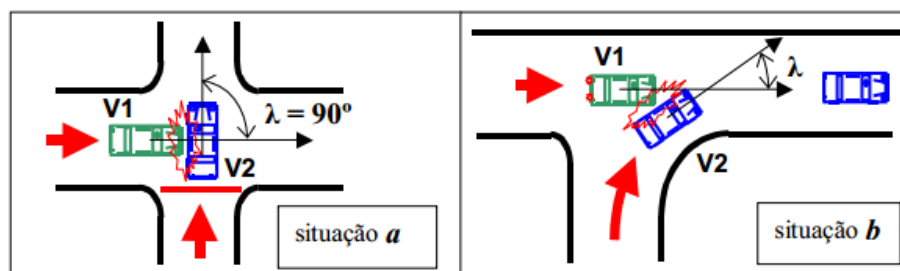


Figura 2.13 – Diferentes ângulos de colisões
Fonte: Fortes *et al.* (2003)

2.5. Operação nas interseções

As interseções podem ser: sem sinalização, quando há baixo fluxo de veículos; com sinalização, quando em uma das vias há maior fluxo de veículos ou quando o cruzamento é de vias de diferentes hierarquias; ou com semáforos, quando há um fluxo consideravelmente grande em ambas as vias ou quando há risco de ocorrer acidentes.

Uma forma de avaliar a interseção, de acordo com o HCM (2010), é analisando os parâmetros de desempenho microcospicos. No estudo do tráfego em cruzamentos não semaforizados, esses parâmetros são:

- Brecha crítica (*gap crítico*): mínimo intervalo entre a passagem de dois veículos sucessivos na via principal em que o condutor de veículos que estão da via secundária aceita para entrar no cruzamento.
- Tempo de posicionamento (*follow-up time*): intervalo de tempo entre a partida do primeiro veículo e a partida do segundo veículo, em condição de fila, utilizando a mesma brecha.
- Atraso: Tempo médio perdido pelos veículos quando parados esperando para passar pelo cruzamento.

No caso do estudo dos cruzamentos semaforizados, os parâmetros microcospicos importantes são:

- Intervalo (*headway*) entre a passagem de veículos consecutivos na mesma faixa quando o sinal está verde (liberado para passagem).
- Tempo perdido no início da luz verde para a fila de veículos iniciar o movimento.
- Tempo perdido no final do entreverdes (amarelo mais vermelho total) por razões de segurança.

Independentemente do controle da operação ser realizado por semáforos ou por sinalizações verticais e horizontais, segundo o *Manual on Uniform Traffic Control Devices – MUTCD* (2009), essas formas de controle devem seguir cinco requisitos básicos:

- Satisfazer a necessidade do local;
- Chamar atenção dos usuários;
- Transmitir um significado claro e simples;
- Ser respeitado pelos usuários; e
- Permitir um tempo suficiente para uma resposta adequada do usuário.

2.5.1. Interseção sem sinalização

Segundo artigo 29 parágrafo III do Código de Trânsito Brasileiro (2008), caso a interseção não seja sinalizada e não seja cruzamento com alguma rodovia, a preferência é do veículo que chega pela direita do condutor, com exceção da rotatória, onde a preferência é do veículo que está circulando.

Esse tipo de cruzamento deve ser evitado, pois a chance de ocorrer acidentes é alta e o custo de implantação de sinalização é relativamente baixo, portanto é injustificado manter um cruzamento como este (ORTOLANI, 2003).

Locais sem semáforo e com faixa de travessia para pedestres, o artigo 70 do Código de trânsito Brasileiro (2008) cita que os veículos devem ceder à preferência aos pedestres.

2.5.2. Interseção com sinalização

Numa interseção entre vias de diferentes hierarquias geralmente têm sinalizações verticais e horizontais.

O Manual Brasileiro de Sinalização de Trânsito (2012) dispõe alguns princípios para sinalização de trânsito que, em geral, são:

- Legalidade: Estar de acordo com as legislações;
- Suficiência: Para facilitar a percepção do que realmente é importante;
- Padronização: Deve seguir um padrão legalmente estabelecido;
- Clareza: Transmitir informações de fácil compreensão e que não entre em conflito com outras informações;

- Precisão e confiabilidade: Deve estar em local que realmente seja necessário correspondente à situação existente para trazer maior credibilidade aos usuários;
- Visibilidade e legibilidade: Estar localizada em local em que possa ser visto a uma distância suficiente para que o motorista tenha um tempo hábil para a tomada de decisão; e
- Manutenção e conservação: Deve sempre estar visível, bem conservada e, quando necessária, deve ser trocada acompanhando a dinâmica de alterações na operação da via.

As sinalizações verticais são classificadas em três categorias:

- Regulamentação: grupo de sinais com mensagens imperativas informando as obrigações, limitações, proibições ou restrições da via;
- Advertência: Advertir os condutores sobre condições e potenciais riscos na via e nas proximidades; e
- Indicação: Mensagens de localização ou educativas.

As principais sinalizações verticais que podem ser aplicadas em uma interseção para o controle da operação do cruzamento são os sinais de “Pare” e de “Dê a preferência” (Figura 2.14), classificadas como sinalizações de regulamentação.



Figura 2.14 – Sinalização de “pare” e “dê a preferência”
Fonte: Manual de Sinalização de Trânsito (2007)

Segundo o Manual Brasileiro de Sinalização de Trânsito (2007), a sinalização de “Pare” e “Dê a preferência” são instaladas em diferentes condições. O sinal de

“Pare” é recomendado para reforçar ou alterar a regra geral de direito de passagem (como citado no tópico “interseção sem sinalização”) e deve ser usada quando a parada do veículo é realmente necessária, sendo a simples redução de velocidade não suficiente para garantir a segurança, e também nos casos listados a seguir:

- Onde há potencial risco de acidentes;
- Onde não há necessidade de semáforo, porém está localizado em uma região com grande número de interseções semaforizadas;
- Em passagens em nível não semaforizadas;
- Na interseção com uma via preferencial devido ao alto volume de veículos, condições geométricas e/ou continuidade física; e
- Interseções cuja via secundária tem visibilidade restrita.

Uma sinalização complementar à sinalização de “Pare” é a “Parada obrigatória à frente”, utilizada quando não é garantida a distância de visibilidade da primeira (seja por obstruções ou velocidade), conforme o exemplo na Figura 2.15, podendo ainda indicar a quantos metros de distância se encontra a parada.

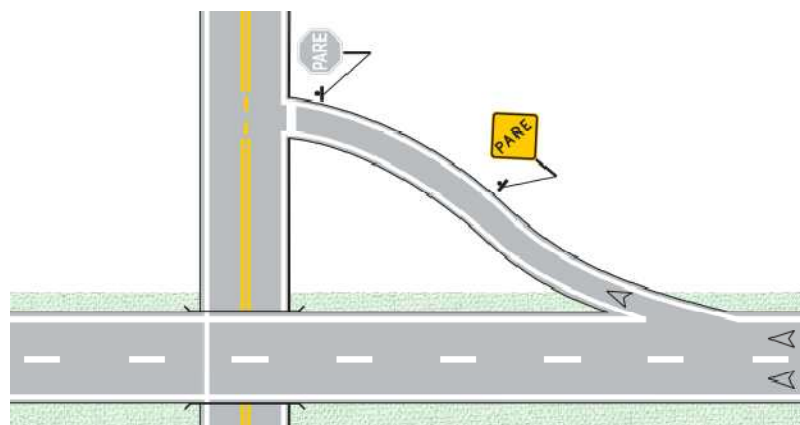


Figura 2.15 – Sinalização de “parada obrigatória à frente”
Fonte: Manual de Sinalização de Trânsito (2007)

Já a sinalização de “Dê a preferência” indica ao motorista que ele deve parar ou, ao menos, reduzir a velocidade. É usada quando tem uma boa intervisibilidade entre os veículos e quando ocorrer uma ou mais situações descritas a seguir.

- Quando o sinal de parada obrigatória for demasiadamente restritivo;

- Para alterar a regra de direito de passagem (citado no item “interseção sem sinalização”); e
- Nos acessos onde existem vias preferenciais, afim de não atrapalhar o fluxo contínuo de veículos.

Outras placas, de regulamentação, advertência e indicação, são comumente instaladas em uma interseção, tais como as proibições e indicações de sentido de fluxo, principalmente em região com muitas vias de sentido único ou quando há uma rotatória.

As sinalizações horizontais a serem aplicadas para o controle de veículos em um cruzamento basicamente são a linha de retenção, que serve para limitar onde o veículo deve parar, no caso de uma parada obrigatória, e a linha de “Dê a preferência”, onde indica o local em que o veículo deve parar, caso seja necessário (Figura 2.16).

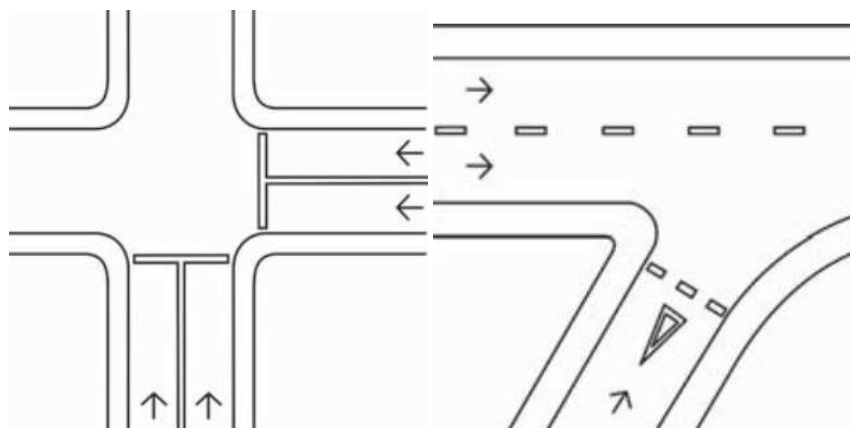


Figura 2.16 – Linha de retenção e de “dê a preferência”
Fonte: Código de Trânsito Brasileiro (2008)

Outras formas de sinalização horizontal podem ser aplicadas em cruzamentos como forma de controle de veículos tais como alerta de proibição de bloqueio de cruzamento, linha de canalização, faixa de travessia de pedestres, etc.

2.5.3. Interseção semaforizada

O semáforo tem como objetivo informar ao usuário o direito de passagem dentro de um tempo e espaço definido em locais com movimentos conflitantes ou para advertir o usuário sobre situações que possam comprometer a segurança viária. Eventualmente podem ser utilizados semáforos exclusivos para veículos com conversões em movimentos conflitantes, como a conversão à esquerda em uma via de sentido duplo (MANUAL BRASILEIRO DE SINALIZAÇÃO DE TRÂNSITO, 2012).

Existem critérios definidos pelo Manual Brasileiro de Sinalização de Trânsito a serem seguidos para a implantação de semáforo em uma interseção, de acordo com a abordagem (veículos ou pedestres) e também se o projeto é a adaptação de um local existente ou é um projeto viário novo.

Segundo o Manual Brasileiro de Sinalização de Trânsito (2012), após a instalação de um semáforo, há consequências que, para ser justificada a implantação, deve ser positivas, cujas principais são:

- Aumento na segurança viária;
- Melhoria na fluidez do trânsito na medida em que promove a distribuição adequada dos tempos destinados a cada movimento;
- Controle do direito de passagem dos movimentos de veículos e pedestres com a consequente redução de conflitos;
- Redução de atrasos; e
- Credibilidade em relação ao usuário em relação à sinalização.

3. ROTATÓRIAS

3.1. Fundamentos

Segundo Khisty e Lall (1998), o objetivo de um projeto de interseção é a redução da severidade de potenciais conflitos (envolvendo veículos, pedestres ou outros modos) ao mesmo tempo em que oferece uma boa fluidez no trânsito. Para isso, são dispostas quatro características que devem ser analisadas para definir qual tipo de interseção em nível a ser instalada:

- Fator humano (como hábitos e tempos de decisão e reação);
- Características de tráfego (como capacidades, conversões, velocidades, distribuição de veículos);
- Elementos físicos (como estacionamentos, distâncias de visibilidade e características geométricas); e
- Fatores econômicos (como custo/benefício e consumo de energia).

As interseções operadas por rotatórias têm sido utilizadas em grande escala desde 1966, quando no Reino Unido adotaram o sistema de preferência para a via que circula, chamando esta de moderna rotatória devido à melhoria no fluxo e na segurança (FHWA, 2000).

“Rotatórias trazem a simplicidade de uma interseção em “T” para interseções com mais de três ramos” (*FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION - FHWA, 2000*), além disso, Al Omari, Al Masaeid e Al Shawabkah (2004) citam: “A rotatória é um dispositivo que trabalha muito bem com fluxos baixos e médios.”

Desde então é crescente o uso de rotatórias em diversos países, onde há campanhas de educação no trânsito voltado para o uso deste dispositivo, principalmente para casos de vias de múltiplas faixas.

A Figura 3.1 apresenta os elementos físicos que podem conter em uma rotatória e, a Tabela 3.1, a descrição desses elementos segundo Coelho (2012).

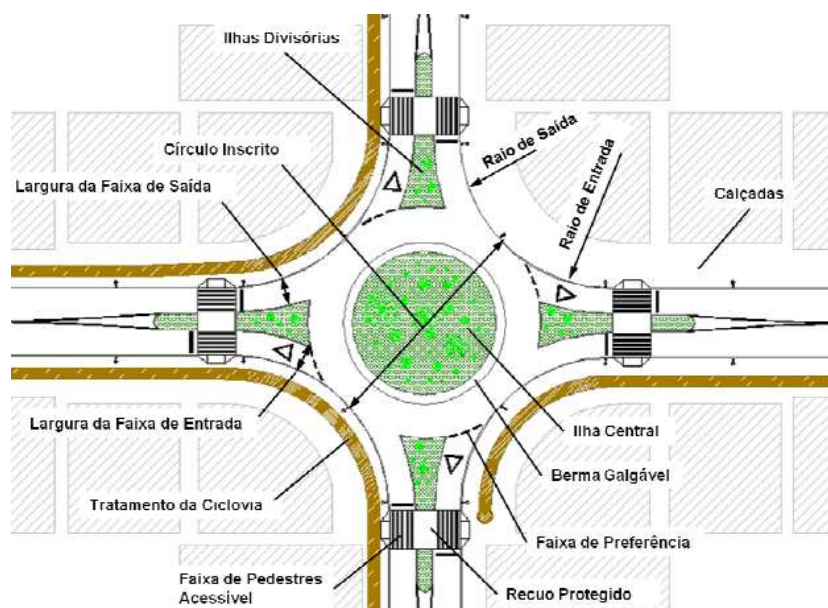


Figura 3.1 – Elementos físicos de uma rotatória
Fonte: Coelho (2012)

Tabela 3.1 – Elementos físicos de uma rotatória
Fonte: Coelho (2012)

ELEMENTO	CARACTERÍSTICA E FUNÇÃO
Ilha Central	Área elevada no centro de uma rótula em torno da qual o tráfego circula. Deve ser dimensionada de modo a causar a deflexão do tráfego, impedindo que os veículos cruzem direto pela interseção.
Ilhas Divisórias / Canalizadoras	Divisor físico para separar os fluxos de entrada e saída da rótula, podendo ser elevada ou pintada. O objetivo é canalizar e desviar o tráfego proporcionando a redução da velocidade, além de proporcionar espaço de armazenamento para os pedestres que atravessam.
Berma Galgável	Área rebaixada junto à ilha central que permite o galgamento se necessário por veículos grandes durante o giro, sem maiores restrições ou complicações operacionais. Utilizada em rótulas menores de uma faixa.
Círculo Inscrito	O diâmetro do círculo inscrito é o parâmetro de base utilizado para definir o tamanho de uma rótula. Ele é medido entre as bordas exteriores da pista circulatória.
Largura da Faixa de Entrada	A largura da faixa de entrada contribui para redução da velocidade de acesso à rótula. Trata-se de um dos fatores determinantes da capacidade e condições operacionais das rótulas modernas.
Largura da Faixa de Giro	Largura da pista giratória em torno da ilha central. Esta largura não inclui a berma galgável e está diretamente ligada ao tipo de veículo previsto na rótula.
Largura da Faixa de Saída	A largura da faixa de saída contribui para fluxo constante dos veículos na rótula. Trata-se também de um dos fatores determinantes da capacidade e condições operacionais das rótulas modernas.

Raio de Entrada	Raio mínimo da curvatura do bordo de cada pista de acesso. Tem a função de garantir que os movimentos de giro sejam realizados com facilidade por todos os tipos de veículos.
Raio de Saída	Raio mínimo da curvatura do bordo de cada pista de saída da rótula. Sua função também é garantir que os movimentos de giro sejam realizados com facilidade por todos os tipos de veículos.
Faixa de Pedestres Acessível	Faixas para as travessias de pedestres acessíveis em todas as vias de acesso á rótula. O local da travessia deve ser afastado da “faixa de preferência”, com rampas de acessibilidade nas calçadas para a passagem de pedestres, cadeiras de rodas, carrinhos e bicicletas.
Faixa de Preferência	Faixa interrompida de “Dê a Preferência”, situada nas pistas de acesso a rótula, indicando que a preferência é do movimento circulatório.
Recuo Protegido	Recuo rebaixado nas ilhas divisórias/canalizados para espera e acúmulo de pedestres, cadeirantes, carrinhos e bicicletas, para completarem a travessia em duas etapas com segurança.
Calçada	Espaço existente entre as pistas da rótula e as edificações do entorno, que devem estar livres e desimpedidas para a circulação de pedestres, e melhoria da visibilidade da interseção.
Tratamento da Ciclovia	Vias de aproximação com ciclo faixas e ciclovias deverão ter um tratamento especial para a condução do ciclista para as travessias previstas. Ressaltando que, os ciclistas também podem percorrer a rotatória pelas pistas, se posicionando a direita, e sinalizando seus movimentos aos demais veículos, conforme previsto no CTB.

A classificação das interseções do tipo rotatória são, segundo Coelho (2012):

- Movimentos rotatórios: Geralmente uma quadra que intercepta várias vias e, no seu entorno, os veículos circulam em um mesmo sentido.
- Rotatórias convencionais: Modelo de rotatória em qual o veículo que circula não tem preferência.
- Mini rotatórias modernas: A preferência é dos veículos que circulam, porém o diâmetro do dispositivo varia de 2 a 16 metros, podendo ser em forma de pintura ou o uso de um dispositivo físico.
- Rotatórias modernas compactas: O diâmetro central varia de 16 a 30 metros e, geralmente, possui galgamento na ilha central para conversões de veículos grandes.
- Rotatórias modernas normais: O diâmetro da ilha central pode variar de 30 a 150 metros (em meio urbano usualmente se limita a 50 metros).

- Rotatórias modernas em dois níveis: Quando a passagem de uma via com alto fluxo de veículos se dá em um nível acima ou abaixo da rotatória.
- Rotatórias “Furadas” e rotatórias semaforizadas: Não seguem o padrão de rotatórias comum, pois não dão a preferência para via circular, variando a operação de acordo com as características específicas do fluxo de veículos e pedestres.
- Rotatórias duplas: São compostas por duas rotatórias pequenas interligadas entre si.
- Rotatórias dispostas em anel: São várias pequenas rotatórias conectando as vias e algumas o fluxo é no sentido horário e outras no sentido anti-horário.

O processo para o projeto de uma rotatória é mais complexo que em uma interseção comum e, geralmente, acaba ocorrendo um processo iterativo, já que é raro conseguir um projeto eficiente na primeira tentativa (FHWA, 2000). Esse processo é apresentado na Figura 3.2.

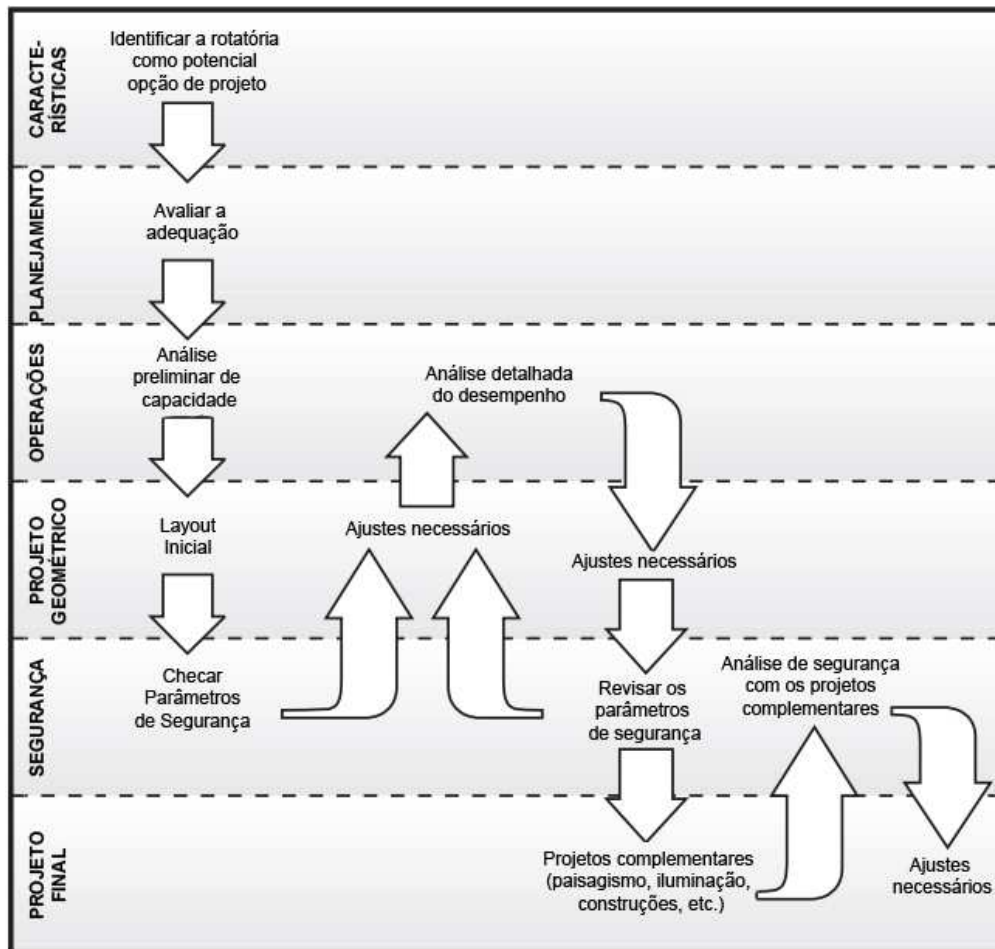


Figura 3.2 – Processo para projeto de rotatória
Fonte: FHWA (2000)

De acordo com FHWA (2000), um projeto deve ser justificado de acordo com a relação custo/benefício sendo que os benefícios de um projeto de interseção consistem em: segurança, operação e impacto no meio ambiente.

A rotatória é um dispositivo que, se bem projetado, traz maior segurança no tráfego devido à diminuição de pontos de conflitos e aos tipos de acidentes em que os veículos estão sujeitos a se envolver (FHWA, 2000).

Além da segurança, a rotatória pode melhorar a fluidez do tráfego, diminuindo o congestionamento e, conseqüentemente, o atraso, devido ao aumento de capacidade que esse dispositivo pode oferecer (TRUEBLOOD E DALE, 2003).

Porém, esse dispositivo é muito sensível na variação do número de veículos que fazem conversão à esquerda, conforme apresenta a Figura 3.3 que relaciona o atraso e o fluxo em uma via principal, por faixa, fazendo um comparativo entre o uso

da rotatória e o de uma interseção semaforizada, com 10 e 50% de conversão à esquerda.

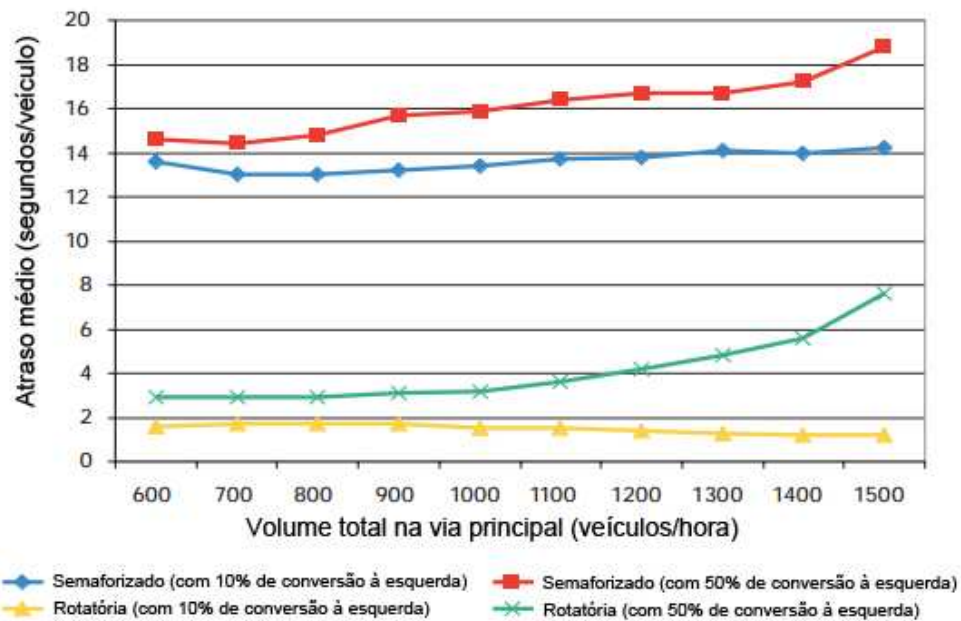


Figura 3.3 – Sensibilidade quanto à conversão à esquerda
Fonte: FHWA (2000)

Como pode ser observado, mesmo com 50% de conversão à esquerda, o atraso médio em rotatórias é menor do que em interseções com semáforo, mesmo que este último apresente apenas 10% de conversão à esquerda.

O terceiro benefício da rotatória é a redução de poluentes devido à queda de necessidade de parada e aceleração de veículos, consumindo menos energia se comparar com uma interseção comum semaforizada (FHWA, 2000).

3.2. Segurança

Ao comparar os dispositivos de interseção em função da segurança, a rotatória oferece uma redução de até 47% de acidentes com vítimas em relação a uma interseção com aviso de via preferencial ou de até 27% ao comparar com interseção semaforizada (FERRAZ *et al.*, 2012).

Em um estudo realizado em 11 novas rotatórias dos Estados Unidos, resultou em uma queda de 37% no índice de acidentes totais em comparação com a situação

anterior, sendo uma queda de 29% no índice de acidentes em rotatórias de múltiplas faixas e de 51% em rotatórias de faixa simples (FHWA, 2000).

Os pontos de conflitos, em comparação com uma interseção comum, possuem um número quatro vezes menor, conforme apresentado na Figura 3.4.

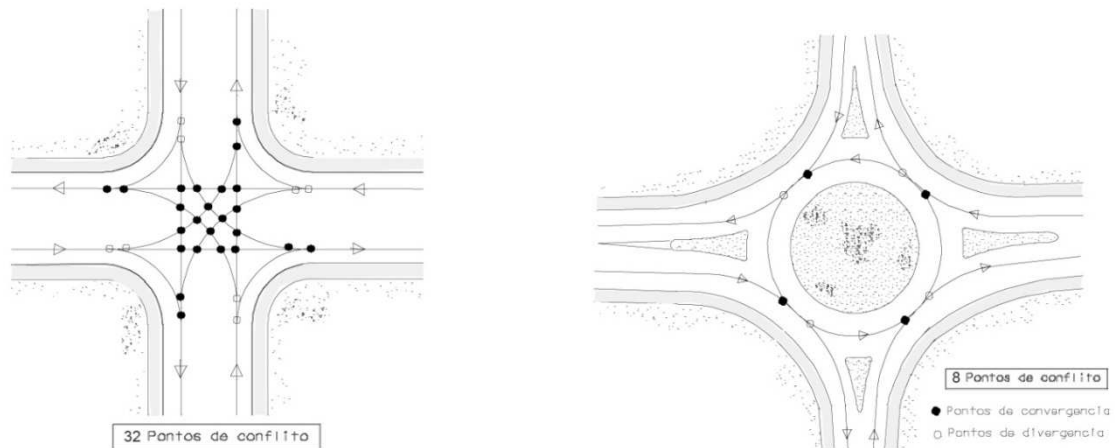


Figura 3.4 – Pontos de conflito
Fonte: Universidade de Coimbra (2004)

Dentre os pontos de conflitos citados anteriormente, existem diversas formas de choques sendo mais comum na entrada da rotatória com outro veículo que está na via circular. Esse tipo de choque, colisão lateral no mesmo sentido, representa a maioria dos acidentes no Reino Unido (71%). A Figura 3.5 apresenta os acidentes possíveis envolvendo rotatórias.



Figura 3.5 – Acidentes em rotatórias
Fonte: FHWA (2000)

A colisão lateral no mesmo sentido, o mais comum em rotatórias, tem gravidade menor ao se comparar com colisão transversal ou lateral em sentido contrário (com maior velocidade relativa) que são características de acidentes em interseções comuns. Neste contexto, além da rotatória ser eficiente a ponto de reduzir pontos de prováveis acidentes, reduz também a gravidade (FHWA, 2000).

Outro fator que justifica a implantação da rotatória é o ângulo de visão necessário para o motorista realizar o cruzamento. Enquanto na interseção comum deve-se observar nos dois sentidos da via (formando um ângulo de 180°), em uma rotatória esse valor se reduz (dependendo das características geométricas), pois há apenas um sentido a ser observado (Fortes *et al.*, 2003).

A limitação de velocidade de operação dos veículos também melhora na segurança viária, conforme analisado no capítulo anterior. O FHWA, 2000 lista os benefícios devido a essa redução de velocidade:

- Redução de danos em casos de atropelamentos de pedestres e ciclistas;
- Providencia mais tempo para os motoristas que irão entrar na rotatória, julgarem, ajustarem a velocidade e entrarem em uma brecha;
- Permite movimentos mais seguros entre veículos que circulam na rotatória;
- Providencia mais tempo de ação e reação dos motoristas devido aos próprios erros ou os erros dos outros;
- Há menos colisões e com menor gravidade; e
- Fornece um cruzamento mais seguro para os novos motoristas.

3.3. Capacidade e Nível de serviço

Existem métodos para estimar a capacidade em interseções com via principal. Um deles é o método de Blunden que estima a taxa de fluxo de veículos a cruzar ou entrar na via principal, conforme a equação seguinte.

$$q_{max} = \frac{V \times e^{-\frac{V \times T}{3600}}}{1 - e^{-\frac{V \times t}{3600}}} \quad (8)$$

Sendo “ q_{max} ” a taxa máxima de fluxo de veículos oriundos da via secundária, “ V ” o volume total de veículos na via principal, “ T ” o *gap* mínimo aceitável pelo primeiro motorista da via secundária e “ t ” o tempo adicional referente ao segundo veículo que segue o primeiro dentro de um mesmo *gap*.

Porém, segundo Khisty e Lall (1998), existem algumas implicações quanto ao uso desse método, tais como:

- Os veículos da via secundária devem esperar até a ocorrência de um *gap* aceitável na via principal;

- É ineficiente quando há veículos subsequentes ao segundo veículo dentro do mesmo gap, pois esses veículos terão um tempo ainda menor de entre eles em comparação ao “t”;
- Diferenças entre tipos de veículos podem ocorrer e não é previsto na equação (como caminhões e ônibus);
- Quando, no cruzamento, não há extrema necessidade de parada do veículo, devido à existência de gap logo na chegada da aproximação e à inexistência de sinalização de parada obrigatória, a equação torna-se ineficiente;
- Deve-se levar em consideração a largura da via principal para a definição das variáveis “t” e “T”; e
- Os valores de T variam de 5 a 10 segundos e valores de “t” podem variar de 3 a 5 segundos, representando diferenças significativas na taxa de fluxo.

Já o HCM (2010) indica o processo analítico para a definição da capacidade e do nível de serviço em cada faixa de chegada à rotatória, conforme a Figura 3.6.

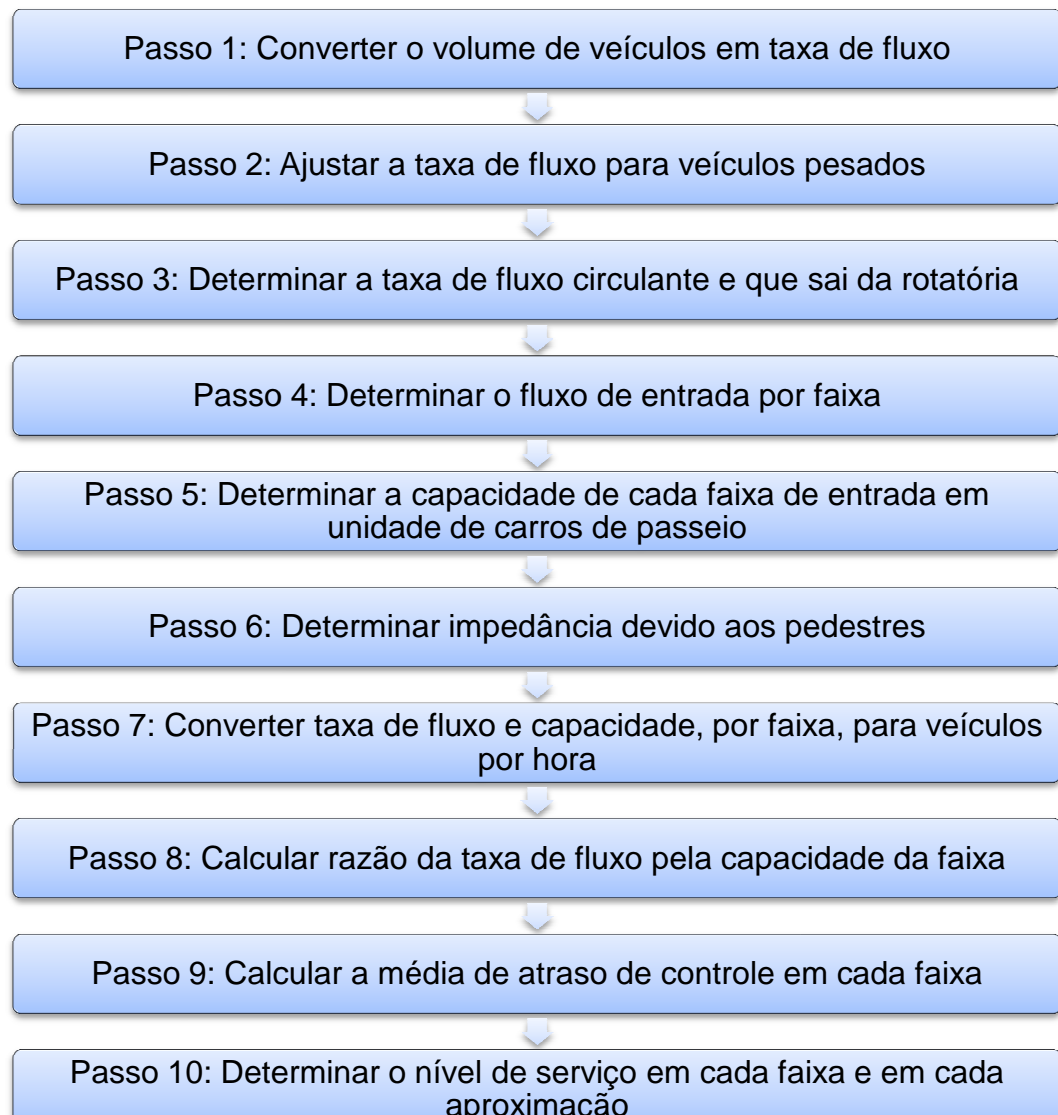


Figura 3.6 – Processo analítico para cálculo de nível de serviço
Fonte: HCM (2010)

A capacidade na entrada da rotatória é calculada de acordo com o número de faixas no sistema. Para o caso de uma via de uma faixa que chega à rotatória também de faixa simples, o cálculo é feito da seguinte maneira:

$$C_{e,pce} = 1130 \times e^{[(-10^{-3}) \times (v_{c,pce})]} \quad (9)$$

Sendo “ $C_{e,pce}$ ” a capacidade de entrada na rotatória equivalente em veículos de passeio e “ $V_{c,pce}$ ” é o volume equivalente a veículos de passeio que estão na rotatória que cruzam com a entrada em consideração.

Para esse modelo de rotatória (faixa simples na entrada e na rotatória) e outros, o HCM (2010) apresenta a Figura 3.7 com as funções plotadas para a verificação da capacidade de entrada.

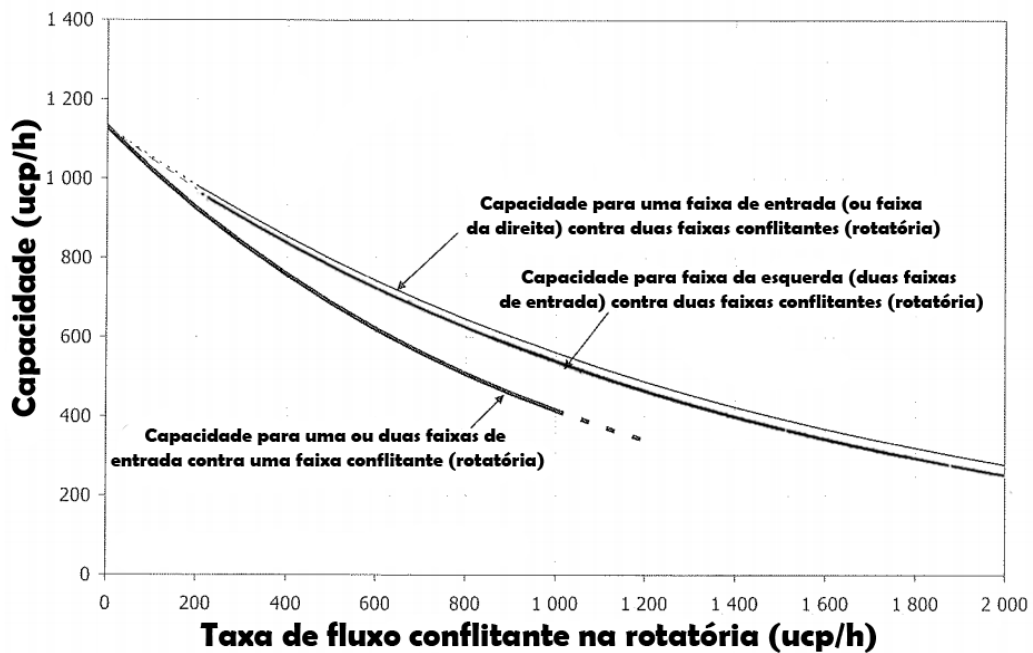


Figura 3.7 – Capacidade de entrada na rotatória
Fonte: HCM (2010)

O cálculo de atraso de controle é realizado mediante a aplicação da expressão a seguir:

$$d = \frac{3600}{c} + 900T \left[x - 1 + \sqrt{(x - 1)^2 + \frac{\left(\frac{3600}{c}\right)x}{450T}} \right] + 5 \times \min[x, 1] \quad (10)$$

Sendo “d” o valor do atraso, “c” a capacidade da via de aproximação, “T” o período de tempo de análise em horas e “x” a razão entre volume e a capacidade.

Pode-se, ainda, calcular o tamanho de fila de veículos nas vias que chegam à rotatória. Esse cálculo é relacionado aos 95º percentil.

$$Q_{95} = 900T \left[x - 1 + \sqrt{(1 - x)^2 + \frac{\left(\frac{3600}{c}\right)x}{150T}} \right] \left(\frac{c}{3600}\right) \quad (11)$$

Sendo “Q95” o tamanho da fila, em número de veículos, “x” a razão entre o volume e a capacidade, “c” a capacidade e “T” e período de tempo de análise em horas.

Lin *et al.* (2008) verificaram que para fluxos mais baixos e para um mesmo tamanho de fila de veículos, a rotatória tem menores valores de atrasos se comparado com uma interseção sinalizada. No estudo de caso de Lin *et al.* (2008) em um semáforo de 110 segundos de ciclo na cidade de Nanchang, China, o limite para que ocorra essa relação entre atrasos é de 86 metros de fila, após esse valor, a interseção semaforizada tem valores de atrasos menores, conforme a Figura 3.8.

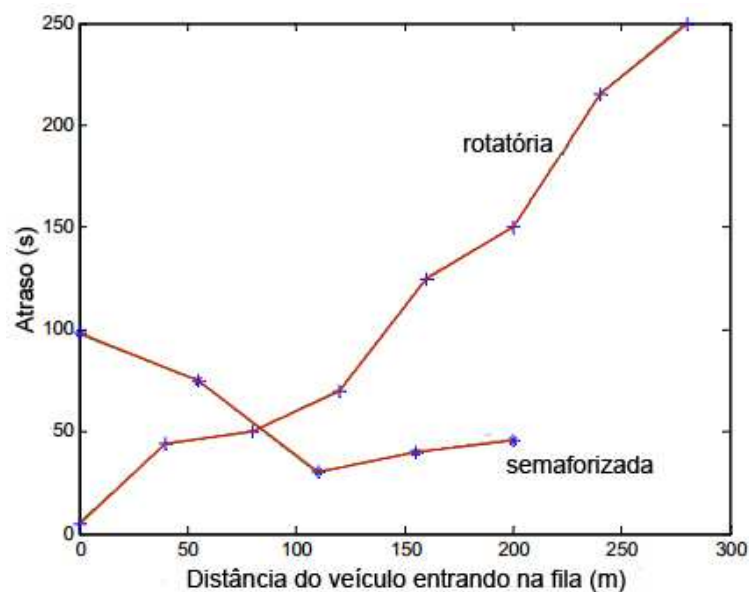


Figura 3.8 – Relação distância de veículos em fila X atraso
Fonte: Lin *et al.* (2008)

Para avaliar a o nível de serviço de uma rotatória, não há um critério bem definido devido à falta de estudos relacionados, porém o *Highway Capacity Manual* 2010 (HCM 2010) indica que seja feito como em uma interseção comum não semaforizada, ou seja, com base nos valores de atrasos, conforme a Tabela 3.2 que relaciona esses atrasos com um determinado nível de serviço (levando em consideração que se o volume for superior à capacidade da via, o nível de serviço é sempre F).

Atraso (s/veíc)	Nível de Serviço	
	$V/C \leq 1$	$V/C > 1$
0-10	A	F
>10-15	B	F
>15-25	C	F
>25-35	D	F
>35-50	E	F
>50	F	F

Tabela 3.2 – Critério para avaliação do nível de serviço em rotatórias
Fonte: HCM (2010)

Cada nível de serviço representa uma característica relacionada à fluidez na interseção e podem ser caracterizadas conforme o Manual de Projetos de Interseções do DNIT (2005):

- Nível de serviço A: A maioria dos veículos passa livremente pela interseção praticamente sem sofrer atrasos.
- Nível de serviço B: A capacidade de deslocamento da via secundária é afetada pelo fluxo na via principal, porém os atrasos são relativamente pequenos.
- Nível de serviço C: Número expressivo de veículos na via principal e inicia a formação de filas na via secundária, mas sem grande extensão e duração.
- Nível de serviço D: Os veículos da via secundária são obrigados a efetuar paradas e o tempo de espera pode ser elevado e, mesmo que

forme filas grandes, elas tendem a reduzir. O tráfego permanece estável.

- Nível de serviço E: Há grandes retenções de veículos que, enquanto não reduzir o volume de tráfego, tendem a se manter. Os tempos de espera são elevados e, com pequenos aumentos no volume, pode levar o tráfego ao colapso. É o ponto em que atinge a capacidade da interseção.
- Nível de serviço F: Sobrecarregamento da interseção. O volume de veículos é maior que a capacidade da via, ou seja, as filas e o atraso tendem a aumentar caso não haja uma queda de veículos chegando.

3.4. Aceitação de gap

Para uma operação em cruzamento não sinalizado, o intervalo entre veículos em uma via principal é determinante para a entrada do veículo que vem de outra via. Esse intervalo, entre o para-choque traseiro do veículo que está na frente e o para-choque dianteiro do veículo que está logo atrás, é denominado *gap* (DEMARCHI, 1995).

O valor do *gap* a ser aceito para a travessia na via principal depende de vários fatores, tais como: manobra a ser executada, sinalização, velocidade na via principal, número de faixas na via principal, da geometria e do cenário local (HAMED, EASA E BATAYNEH, 1997).

Falnery *et al.* (2000) citam as três características de fluxo interativo da teoria de aceitação de gap:

- Disponibilidade de *gaps* no fluxo de conflito;
- Utilidade desses *gaps* para os motoristas oriundos da via não preferencial; e
- Taxa de motoristas que seguem um aos outros dentro de um mesmo *gap* (também chamado *follow-up time*).

Para um cruzamento, o valor do *gap* influencia muito na fluidez do tráfego, pois leva um tempo considerável, já que o veículo que não está na via principal

precisa acelerar a partir da velocidade zero. O *gap* de aceitação é diferente de acordo com a habilidade do motorista, declividade da via, visibilidade do local, tipo de veículo, condições geométricas do cruzamento, tipo de manobra, tempo de espera do motorista no cruzamento, etc. (ORTOLANI, 2003).

Quando há interseções sinalizadas nas proximidades da rotatória em uma via principal, são produzidos *gaps* maiores na corrente de tráfego, podendo ser utilizado pelos veículos da via secundária para liberar o fluxo. Por isso, rotatórias com essas características tem maior eficiência que as demais (FHWA, 2000).

O valor do *gap* médio pode variar conforme o horário e o dia em que é medido. Estudos realizados por Cheng *et al.* (2008) em rotatórias de Pequim, encontraram valores mais reduzidos de *gap* crítico em horários de pico da manhã, chegando a 4,1 segundos, enquanto em fins de semana esse valor sobe para uma média de 5,4 segundos no mesmo período.

Outra variação que também pode ocorrer no valor do *gap* é com relação à faixa de entrada, nos casos de vias de chegada de múltiplas faixas. Xu e Tian (2008) analisaram rotatórias da Califórnia e, para os casos de múltiplas faixas de entrada, obtiveram um *gap* médio de 4,8 segundos para a faixa da esquerda de 4,4 segundos para a faixa da direita.

Xu e Tian (2008) ainda estudaram a relação do aumento de fluxo na rotatória e da velocidade de operação com o valor do *gap* crítico e do *follow-up time*. Como resultado foi observado a redução no valor do *gap* crítico conforme aumenta o fluxo de veículos circulando. Já o valor de *follow-up time* manteve-se praticamente constante, o que não acontece quando aumenta a velocidade de operação da rotatória, onde ambos se reduzem.

Segundo o HCM (2010), o valor médio do *gap* em rotatórias, quando um veículo chega na interseção e necessita realizar a parada obrigatória devido à passagem de veículos na via principal, varia de 4,1 a 4,6 segundos, enquanto para os veículos seguintes, se houver uma continuidade de liberação de fluxo devido a um *gap* maior, varia de 2,6 a 3,1 segundos (*follow-up time*). Ou seja, quanto mais *gaps* forem necessários no cruzamento, maior vai ser o atraso no sistema, o contrário ocorreria se houvesse mais *follow-up time*.

3.5. Principais tipos de operação em rotatórias

As interseções urbanas controladas por rotatórias podem ser operadas de diferentes maneiras com uma mesma configuração geométrica, conforme discutidas a seguir.

3.5.1. Rotatória com prioridade para a via circular

Nesse tipo de rotatória, também chamada de rotatória moderna, os veículos que chegam à interseção devem aguardar a preferência, que é dos que estão utilizando o dispositivo. Esse tipo de rotatória proporciona uma maior segurança devido à baixa velocidade operacional dos veículos (ORTOLANI, 2003).

Conforme seja a configuração do cenário local, as vias que chegam à interseção podem ser compostas por sinalização “Dê a Preferência” ou “Pare” para os pontos de retenção (ver Figura 3.9). A travessia é feita em apenas uma etapa e com uma via de apenas um sentido, melhorando a segurança.

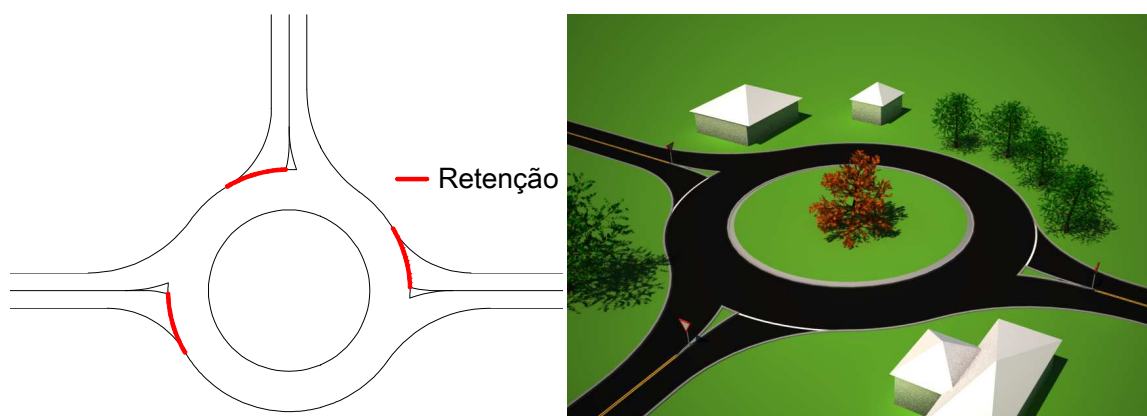


Figura 3.9 – Rotatória com preferência para a via circular

Existem casos em que esse tipo de rotatória é semaforizada, o que gera muita desconfiança sobre a eficiência do dispositivo. Estudos realizados por Ben-Edigbe, Abdelgalil e Abbaszadehfallah (2012) refutam a afirmação de que não se deve semaforizar rotatórias. Eles chegaram à conclusão que essa é a melhor opção

para locais com muitos acidentes, fluxo elevado de veículos e quando as vias têm diferentes hierarquias, além de que não há indícios de queda no nível de serviço, pois não há atrasos adicionais.

3.5.2. Rotatória com prioridade para a via principal

A rotatória com prioridade para a via principal é muito comum em rodovias, pois ela é bastante eficiente nos casos em que há uma via com um fluxo relativamente alto e com poucas conversões em comparação com a outra via da interseção (Fortes *et al*, 2003). Dependendo da configuração do cenário local, nesse tipo de rotatória são instaladas sinalizações “Dê a Preferência” ou “Pare” nos pontos de retenção para os veículos da própria rotatória e para os veículos da via secundária (ver Figura 3.10).

Para os veículos da via secundária podem ser necessária duas etapas de travessia, uma para cada sentido, melhorando a segurança ao se comparar com uma interseção comum não semaforizada.

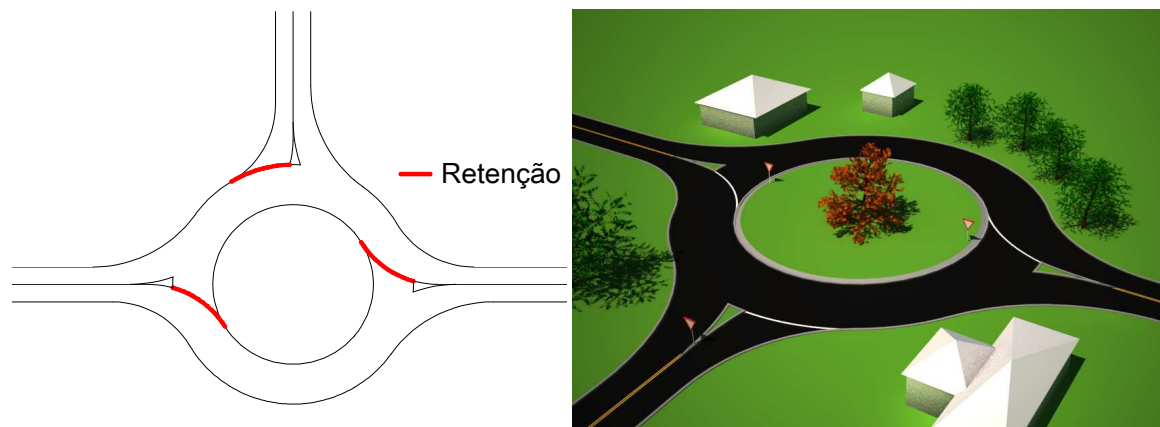


Figura 3.10 – Rotatória com preferência para a via principal

Esse tipo de operação não se apresenta muito eficiente em casos de alto tráfego fazendo conversão, pois existe a possibilidade de haver o bloqueio na rotatória devido ao excesso de veículos aguardando na faixa de retenção na via circular.

4. SIMULAÇÃO DE TRÁFEGO

4.1. Fundamentos

O uso de simuladores é de grande importância para a engenharia de transportes, pois, através dele, pode ser verificado o funcionamento de dispositivos de controle e infraestrutura antes mesmo de haver uma intervenção do tráfego, sendo então uma ferramenta importante de auxílio à tomada de decisões.

Os passos para a montagem de um modelo a ser simulado se inicia com a formulação do problema, seguida pela determinação dos objetivos, um projeto geral do sistema e, por último, a criação propriamente dita do modelo que deve focar as características essenciais do problema e ser aperfeiçoado até a aproximação do cenário real dentro de um nível adequado de complexidade (SETTI, 2012).

A partir da simulação, podem ser feitas análises de alternativas novas de tráfego ou adaptação de alternativas já existentes, sem a necessidade de interferir no tráfego atual, sendo assim, uma importante ferramenta para o processo de decisão.

São diversos os simuladores de tráfego e podem ser classificados em microscópicos, mesoscópicos e macroscópicos. Os modelos microscópicos analisam os veículos individualmente em função de suas velocidades e localizações e incorporam análise de filas, ondas de choque, entre outras. O macroscópico descreve o fluxo de tráfego em função de velocidade, fluxo e densidade. Já os mesoscópicos que tem aspectos macroscópicos e microscópicos (Boxill e Yu, 2000).

Os modelos também podem ser divididos em dinâmico ou estático. Os modelos estáticos representam os sistemas em um dado instante enquanto os dinâmicos representam as mudanças no tempo (SETTI, 1994 *apud* ORTOLANI, 2003).

Outra classificação é em modelo estocástico e determinístico. Daganzo (1997) cita um exemplo onde uma contagem de tráfego é feita em dois dias de características semelhantes e o volume de tráfego pode ser também semelhante,

porém a sua distribuição ao longo do tempo não. Essa é a característica de um modelo estocástico. Já o determinístico os resultados serão sempre os mesmos caso os dados de entrada também são.

Existem vários simuladores de tráfego no mercado e a diferença entre os resultados deles é mínima, sendo considerada mais a questão de maleabilidade e facilidade que cada um tem com determinadas características de rede.

Bloomberg e Dale (2000) estudaram a diferença entre dois simuladores: o CORSIM e o VISSIM. As diferenças encontradas entre os dados de saída deles são pequenas, pois são apenas relacionadas com os parâmetros comportamentais, e não é significativa a ponto de fazer diferença em um projeto final.

Boxill e Yu descrevem alguns microssimuladores muito utilizados no mercado e as características positivas de cada um em relação aos outros:

AIMSUN 2: eficiente para utilização em sistemas de controle de tráfego, orientação de rotas, painéis de mensagens variáveis e avaliações de alternativas de projeto de vias.

CONTRAM: eficiente para análise de variações de demandas de tráfego, previsão de variações de tempo nos tempos de viagens ao longo das rotas, filas e atrasos, consumo de combustíveis, efeitos de sincronismo de sinalização e opções de gerenciamento de tráfego urbano.

CORSIM: Eficiente para avaliação de cenários de controle de tráfego em que a escolha de rota é fixa.

FLEXYIT II: Eficiente para estudo de efeitos de estratégias de controle.

HUTSIM: eficiente para estudo de efeitos de estratégias de controle e diferentes arranjos de trânsito, desenvolvimento de novos sistemas de controle e avaliações de aplicações de ITS (*intelligent transport system*).

INTEGRATION: Estratégias de melhorias em corredores e informações sobre as rotas em tempo real.

PARAMICS: Modelagem detalhada de ruído e poluição escape; simulação de transporte multimodal; determinação do estado de tráfego a partir da contagem on-line de veículos e prestação de informações sobre o trânsito de previsão para os serviços de bordo.

VISSIM: Estudos de projeto e operações de cruzamentos, localizações de paradas de ônibus, viabilidade de implantação de pedágios, alocações apropriadas para interseções em rodovias, estratégias de sinais, etc.

Para a escolha do simulador a ser utilizado, FHWA (2000) sugere que sejam feitas algumas perguntas listadas a seguir:

- Deve se usar um modelo de simulação ou um modelo analítico isolado de rotatória é o suficiente?
- Quais são os dados de entrada requeridos pelo software? Eles são suficientes? Como eles podem ser fornecidos ou estimados?
- Quais são os dados de saída que o *software* fornece de forma animada, gráfica ou tabular?
- Quais as características especiais do modelo que são pertinentes para o problema abordado?
- O manual do simulador especifica sobre modelagem de rotatórias?
- Quão sensível é o *software* para vários parâmetros geométricos?
- Há na literatura a validação desse modelo para avaliação de rotatórias?
- Há informações suficientes sobre os processos microscópicos utilizados pelo modelo tais como *car-following*, *lane change*, aceitação de *gap* ou de direção?
- Existem projetos passados relevantes disponíveis para exemplo?

4.2. Simulador VISSIM

Existem inúmeros simuladores de tráfego no mercado atualmente, entre eles o VISSIM, um simulador microscópico amplamente utilizado tanto em meio acadêmico quanto profissional devido à facilidade de elaboração e entendimento dos fenômenos ocorridos sendo capaz de representar qualquer alternativa realista de um sistema. Esse software foi desenvolvido na Alemanha, em 1992.

O *software* VISSIM tem como vantagem, além das mencionadas anteriormente, a facilidade e flexibilidade na elaboração das redes de diferentes

tipos e na determinação das características de cada trecho (OLIVEIRA E CYBIS, 2008).

As aplicações são diversas sendo verificadas em campo com eficiência algumas como: Estudo detalhado de semáforos e sinais, impacto no tráfego devido à passagem de trens, metrô e ônibus, análise de áreas de redução de velocidade, análise comparativa de projetos de interseções, vias preferenciais, impactos de mensagens variáveis e desvios, modelagens de pedestres, entre outros (PLANUNG TRANSPORT VERKEHR AG, 2012).

Os dados de entrada são facilmente colocados com a interface do software assim como o desenho da rede. Durante a simulação é possível a visualização, possibilitando assim uma análise mais crítica da operação e, como resultados, são gerados arquivos de acordo com a necessidade do operador.

O *software* vem com alguns exemplos de projetos de rotatórias, o que facilita o entendimento da construção e caracterização do modelo.

O simulador de tráfego é do tipo microscópico que inclui duas importantes lógicas psicofísicas de interação entre veículos chamadas *car-following* e *Lane change*.

Os modelos *car-following* estão presentes nas mais recentes teorias de fluxo de tráfego e em simulações microscópicas. Esses modelos, diferentemente de outros, traçam uma trajetória mais realísticas dos veículos que se aproximam de outros em uma fila (DAGANZO, 1997).

O modelo *car-following* psicofísico leva em consideração uma reação mais natural do motorista que está dirigindo a uma velocidade relativamente alta e encontra em sua frente um veículo mais lento. A partir desse momento inicia a interação com o outro veículo de forma que o motorista “seguidor” passa a desacelerar sem saber a velocidade exata do motorista à frente, até chegar a uma velocidade muito baixa e ele inicia novamente a aceleração, formando assim um processo iterativo. (PLANUNG TRANSPORT VERKEHR AG, 2012). Esse processo pode ser observado na Figura 4.1.

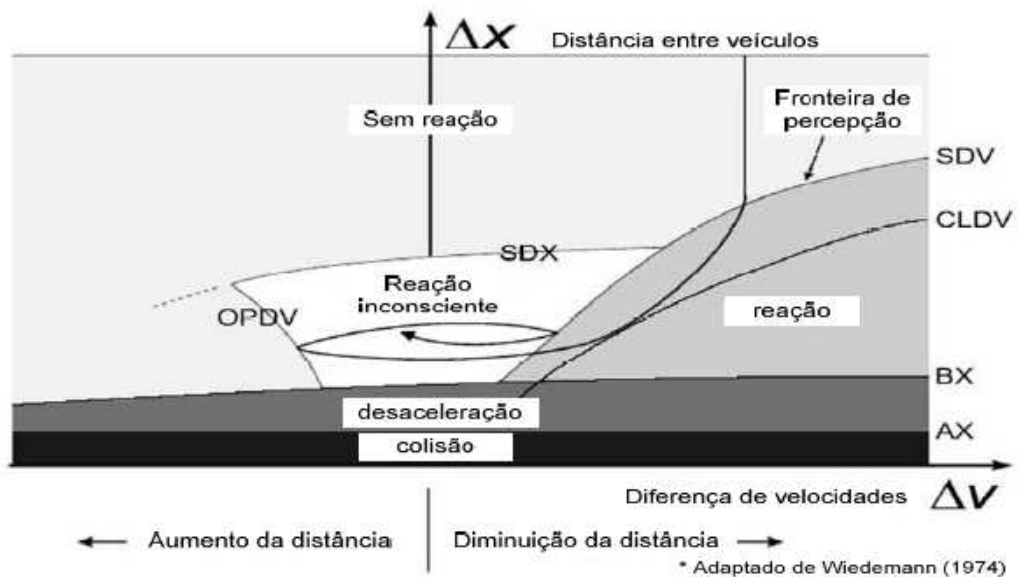


Figura 4.1 – Processo interativo entre veículos próximos e no mesmo sentido
 Fonte: Oliveira e Cybis (2008)

Onde:

AX – Distância entre veículos em uma fila parada;

BX – Distância mínima desejada entre veículos em movimento;

SDV – Ponto onde o motorista percebe a aproximação de um veículo mais lento à frente;

CLDV – Ponto a partir de onde o motorista passa a reagir conscientemente;

OPDV – ponto onde o motorista percebe o aumento na distância com o veículo à frente e;

SDX – Fronteira onde se limita a reação inconsciente como veículo “seguidor”.

O VISSIM utiliza dois modelos diferentes de *car-following*: o primeiro, desenvolvido por Wiedemann em 1974, tem aplicação para ambientes urbanos e o segundo, desenvolvido também por Wiedemann em 1999, é mais detalhado e recomendado para ambientes interurbanos. O *software* ainda permite que o usuário opte pela não utilização de interação veicular (PLANUNG TRANSPORT VERKEHR AG, 2012).

Lane change é um modelo utilizado no VISSIM para mudanças de faixas sem congestionamento. Para isso é necessário que exista um gap seguro e compatível

com a velocidade do veículo que pretende mudar de faixa. Modelar comportamento de mudança de faixa é mais complexo do que se imagina. Primeiro deve haver a necessidade da mudança, depois analisar a possibilidade para então executar uma trajetória para isso. É uma ação que envolve três veículos (ZHANG, 2004).

O VISSIM considera dois casos de necessidade de mudança de faixa: O primeiro é quando o motorista precisa fazer alguma conversão, neste caso ele está disposto a reduzir ao máximo sua velocidade para facilitar a mudança de faixa, caso necessário. O segundo é quando o veículo pretende mudar de faixa para obter mais espaço na via ou para poder viajar em maior velocidade (PLANUNG TRANSPORT VERKEHR AG, 2012).

Ainda existem os parâmetros que consideram a posição lateral do veículo, influenciando em casos de ultrapassagens, e os parâmetros comportamentais em semáforos.

Outra característica do *software* é que a liberação dos veículos segue a distribuição de Poisson, a que mais se aproxima da real taxa de chegada de veículos em um determinado ponto, caso não haja perturbações à montante.

Essa distribuição indica que a probabilidade de um número de eventos “X” ocorrerem dentro de um intervalo é conforme a equação a seguir, onde “m” representa a média de ocorrência do evento.

$$P(X = x) = e^{-m} \frac{m^x}{x!} \quad (12)$$

A distribuição de Poisson ainda tem outras aplicações na engenharia de tráfego: estudo de *gaps*, estudo de probabilidade de encontrar vaga para estacionar, estudo de certos tipos de acidentes, projeto de chamados “*pocket lanes*” que são áreas de conflito entre faixas para bicicletas e faixas para automóveis, além de outras aplicações (Gerlough, 1955).

5. AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DAS ROTATÓRIAS

5.1. Considerações iniciais

Foram avaliados os desempenhos dos três tipos distintos de rotatórias com três pernas: (1) com prioridade para o fluxo da via circular, (2) com prioridade para os fluxos da via principal e (3) com prioridade para os fluxos da via principal com semáforos próximos do dispositivo.

O dispositivo analisado, conforme mostrado na Figura 5.1, consiste de uma rotatória de três pernas (ramos) com apenas uma faixa de tráfego em cada aproximação (via).

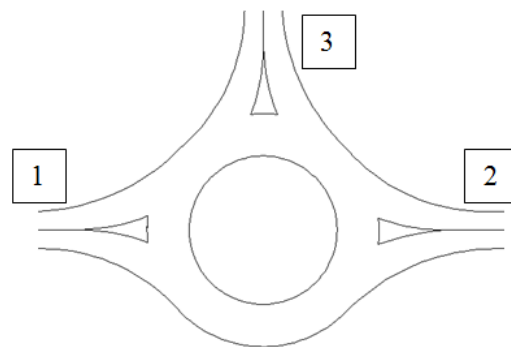


Figura 5.1 – Configuração da rotatória analisada.

Os parâmetros utilizados para caracterizar o desempenho das rotatórias foram o atraso médio na aproximação crítica (onde o valor médio do atraso é maior) e o tamanho médio da fila na aproximação crítica (onde o valor da tamanho médio da fila é maior), que são os parâmetros recomendados por *Facilities Development Manual* (2010).

As rotatórias foram supostas sendo um círculo com 18 metros de raio e, para o caso com semáforos próximos, estes estão situados a 20 metros do início do dispositivo, conforme a Figura 5.2.



Figura 5.2 – Configuração da rotatória analisada.

Os valores foram determinados mediante simulação utilizando o *software* VISSIM, com os valores *default* do simulador, com exceção dos valores do *gap* crítico para a entrada na interseção que foi fixado em 4,3 segundos, que se aproxima mais da realidade que o valor *default* do VISSIM de 3,0 segundos, de acordo com HCM (2000).

O limite de velocidade considerado foi de 50 km/h nas vias de chegada e de 30 km/h na rotatória.

O fluxo de veículos foi suposto igual nas duas aproximações (nos dois sentidos) da via principal.

Foi admitida a matriz origem-destino do tráfego mostrada na Tabela 5.1, o que significa que os movimentos de retorno foram considerados iguais a zero, desprezíveis em comparação aos volumes de fluxo dos outros dois movimento, que têm a distribuição de 50% para cada.

Tabela 5.1 – Matriz origem-destino do tráfego.

O/D	1	2	3
1	0	50%	50%
2	50%	0	50%
3	50%	50%	0

Os valores associados aos semáforos adotados nas simulações foram os seguintes: duração do tempo de ciclo = 70 segundos e duração do tempo de verde: variável conforme os valores dos fluxos para minimizar o atraso crítico (os valores obtidos são mostrados na Tabela 5.2), tempo de vermelho: variável conforme o valor do verde, tempo de amarelo = 4 segundos, defasagem de tempos: o vermelho do semáforo situado na via 2 começa 10 segundos após o início do verde do semáforo situado na via 1, de forma que quando o primeiro veículo liberado no verde do semáforo da via 1 chegar na via 2 e não houver nenhum veículo na fila para cruzar a via 2 que pode ter ficado retido no ciclo anterior, ele pode passar sem necessidade de parar.

A defasagem de tempos foi estabelecida visando evitar que o elevado número de conversões à esquerda da via 1 para a via 3 (50% do fluxo total) pudesse bloquear o funcionamento da rotatória mesmo para valores não tão altos do fluxo na via principal.

Tabela 5.2 – Valores do tempo de verde que levam ao mínimo atraso crítico.

Fluxo na via secundária (veíc/h)	Fluxo na via principal (veíc/h)											
	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200
0	56	56	56	56	56	56	56	56	56	56	56	n.s.
100	56	56	56	56	56	56	56	49	50	36	28	n.s.
200	56	56	56	56	56	56	55	48	35	33	27	n.s.
300	56	56	56	56	56	55	55	48	35	31	26	n.s.
400	56	56	56	56	56	51	30	46	33	23	23	n.s.
500	56	56	56	56	56	50	30	21	22	21	n.s.	n.s.
600	56	56	56	56	55	48	30	20	28	n.s.	n.s.	n.s.
700	56	56	56	56	52	42	18	19	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
800	56	56	56	54	48	26	18	25	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
900	56	56	56	52	46	24	22	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
1000	56	56	56	48	24	20	21	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
1100	56	56	53	45	20	18	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
1200	56	56	52	23	16	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.

n.s.: cenários não simulados

O esquema de operação da rotatória com semáforos próximos é mostrado na Figura 5.3.

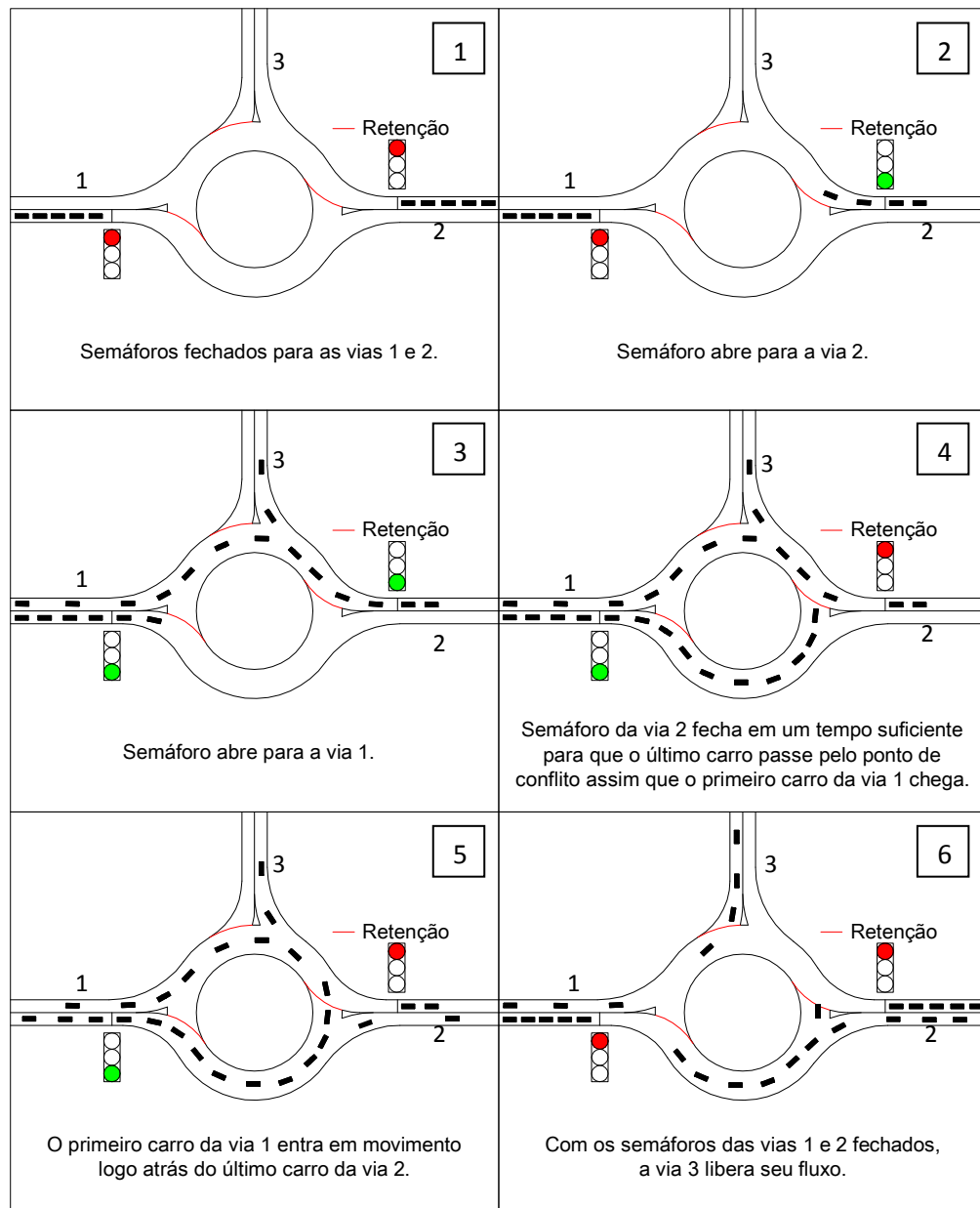


Figura 5.3 – Operação na rotatória com formação de pelotões

No processo de simulação foi considerada a existência de fila desde quando, seguindo o modelo *car-following*, o veículo reduz a velocidade para 5 km/h até que a velocidade passe novamente a ser maior que 10 km/h. Esses valores são indicados como *default* do VISSIM.

Foram consideradas variações discretas do fluxo de 100 a 1200 veículos por hora nas vias principais (1 e 2) e de 0 a 1200 veículos por hora na via secundária (3). Os fluxos foram considerados iguais nos dois sentidos de fluxo da via principal.

5.2. Resultados para rotatória com prioridade para a via circular – Tipo 1

Na Figura 5.4 é mostrada a relação entre o atraso crítico e o fluxo na via secundária (aproximação 3) para diferentes valores do fluxo na via principal (aproximações 1 e 2).

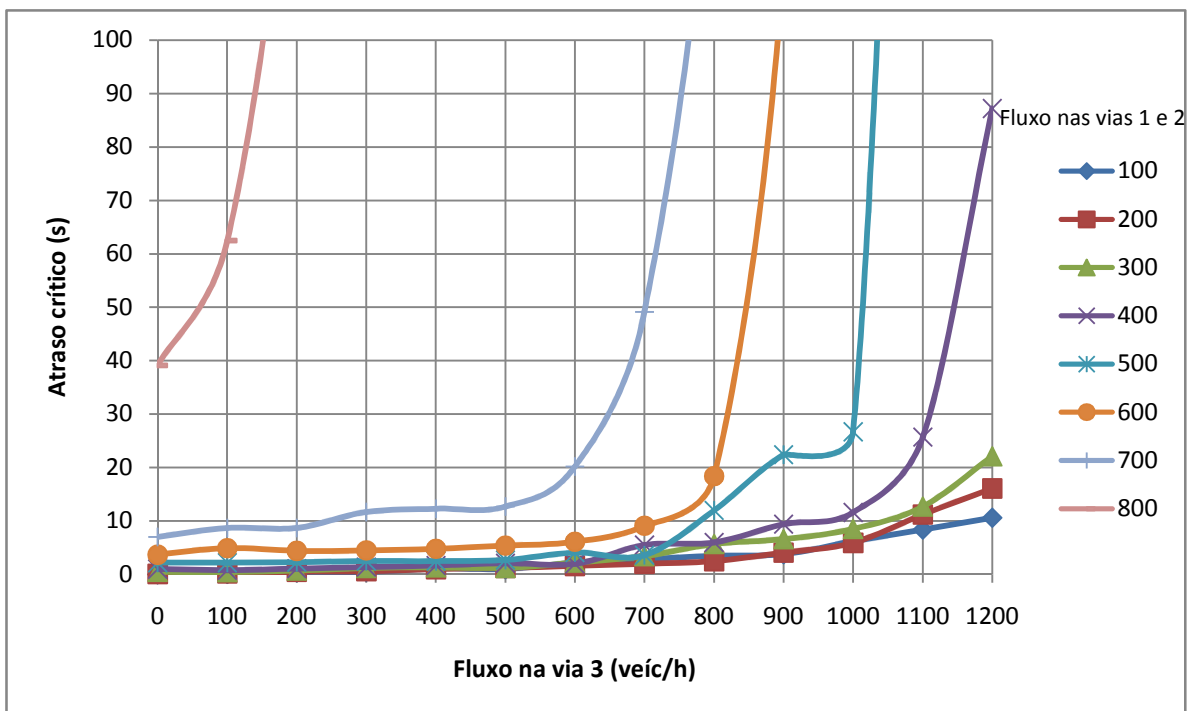


Figura 5.4 – Atraso crítico x fluxo na via secundária (aproximação 3).

Na Figura 5.5 é mostrada a relação entre o tamanho da fila crítica e o fluxo na via secundária (aproximação 3) para diferentes valores do fluxo na via principal (aproximações 1 e 2).

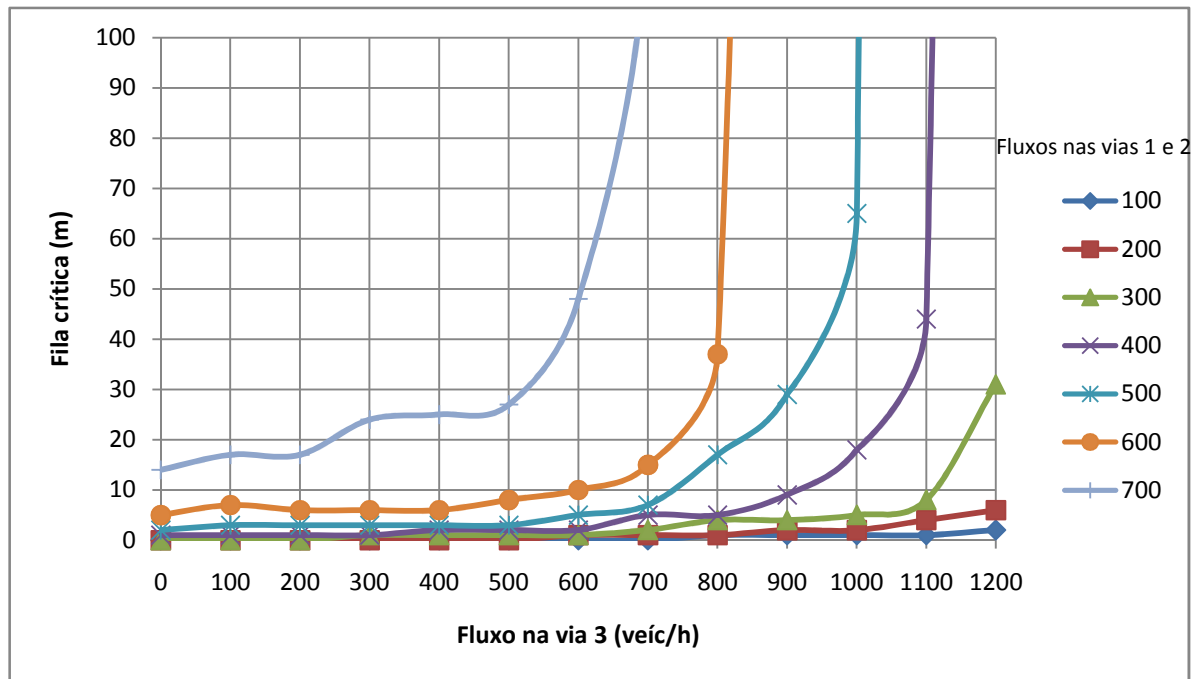


Figura 5.5 – Tamanho da fila crítica x fluxo na via secundária (aproximação 3).

5.3. Resultados para a rotatória com prioridade para a via principal – Tipo 2

Na Figura 5.6 é mostrada a relação entre o atraso crítico e o fluxo na via secundária (aproximação 3) para diferentes valores do fluxo na via principal (aproximações 1 e 2).

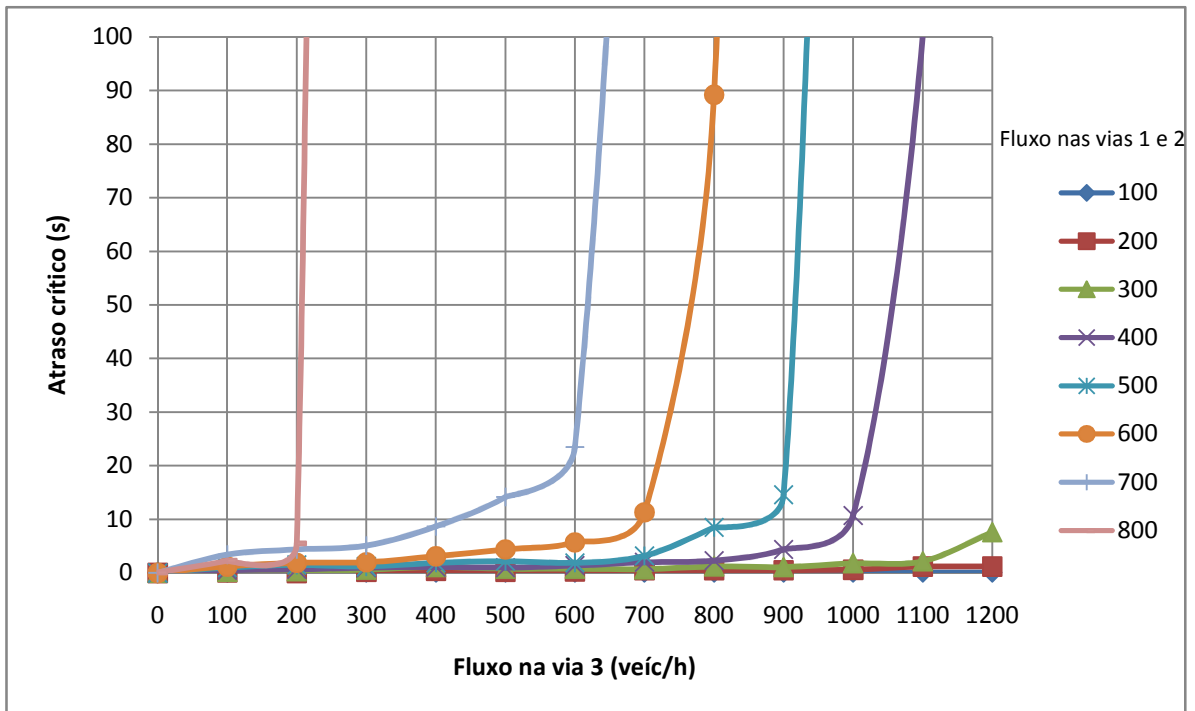


Figura 5.6 – Atraso crítico x fluxo na via secundária (aproximação 3).

Na Figura 5.7 é mostrada a relação entre o tamanho da fila crítica e o fluxo na via secundária (aproximação 3) para diferentes valores do fluxo na via principal (aproximações 1 e 2).

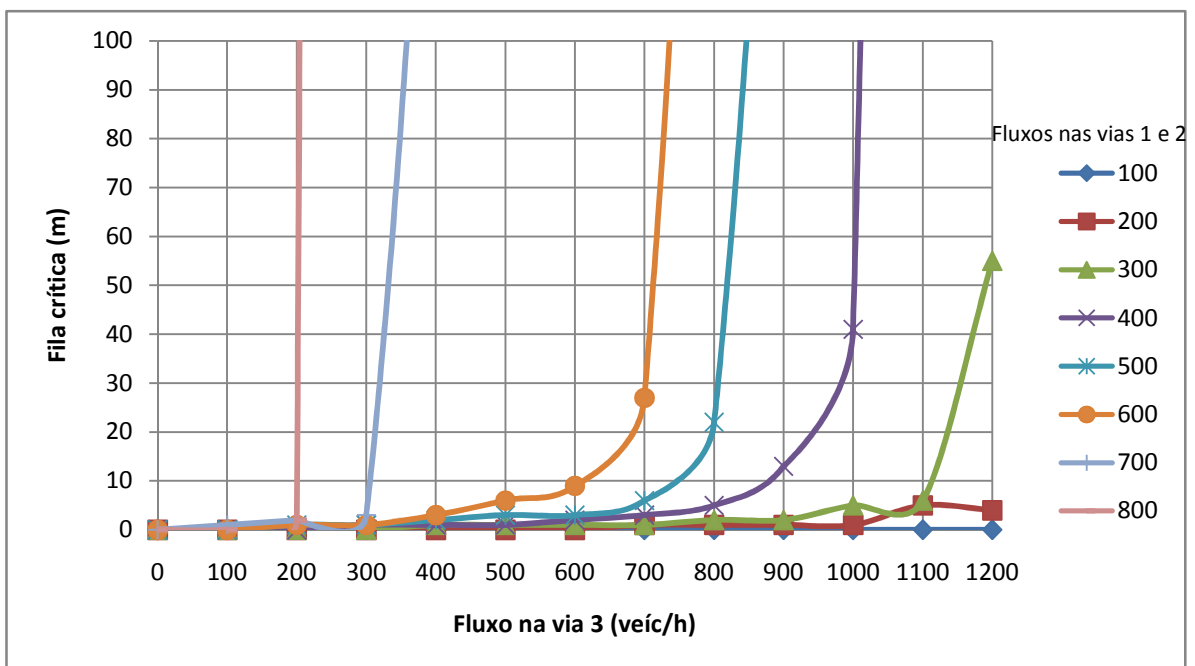


Figura 5.7 – Tamanho da fila crítica x fluxo na via secundária (aproximação 3).

5.4. Resultados para a rotatória com prioridade para a via principal com semáforos próximos – Tipo 3

Na Figura 5.8 é mostrada a relação entre o atraso crítico e o fluxo na via secundária (aproximação 3) para diferentes valores do fluxo na via principal (aproximações 1 e 2).

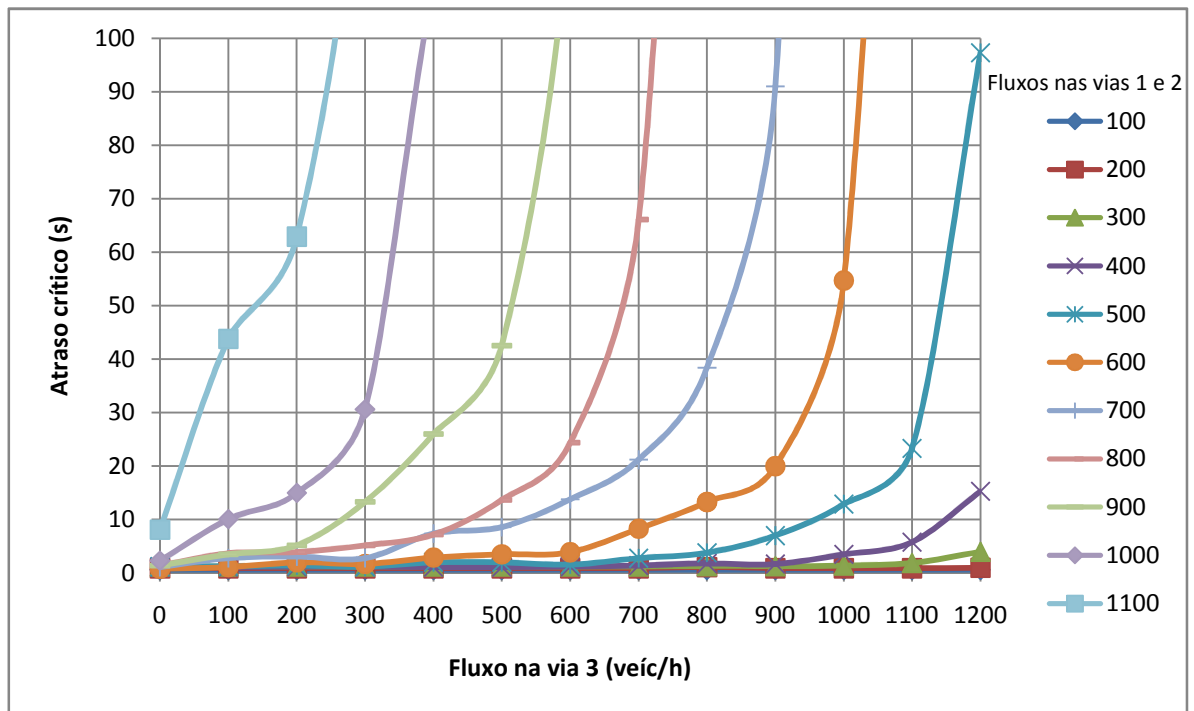


Figura 5.8 – Atraso crítico x fluxo na via secundária (aproximação 3).

Na Figura 5.9 é mostrada a relação entre o tamanho da fila crítica e o fluxo na via secundária (aproximação 3) para diferentes valores do fluxo na via principal (aproximações 1 e 2).

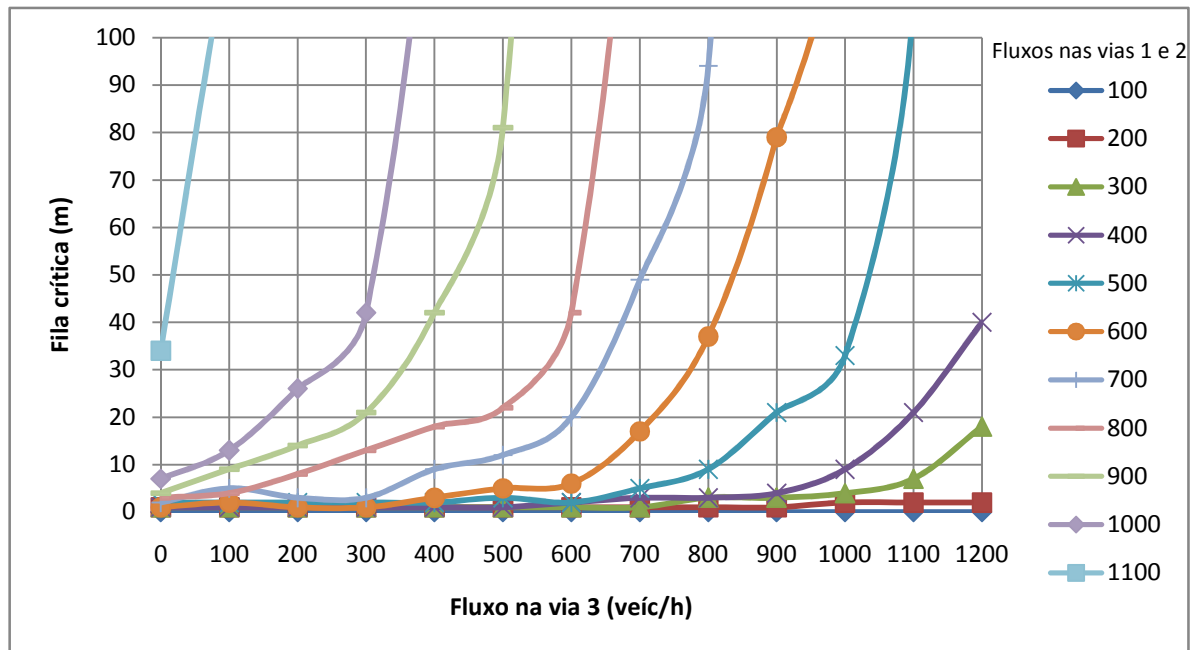


Figura 5.9 – Tamanho da fila crítica x fluxo na via secundária (aproximação 3).

5.5. Comparação dos desempenhos com base nos valores do atraso crítico

Nas Figuras 5.10 a 5.19 são mostrados os valores do atraso crítico para as três configurações de rotatória em função do fluxo na via secundária (via 3) para distintos valores do fluxo na via principal (soma dos fluxos que chegam pelas vias 1 e 2).

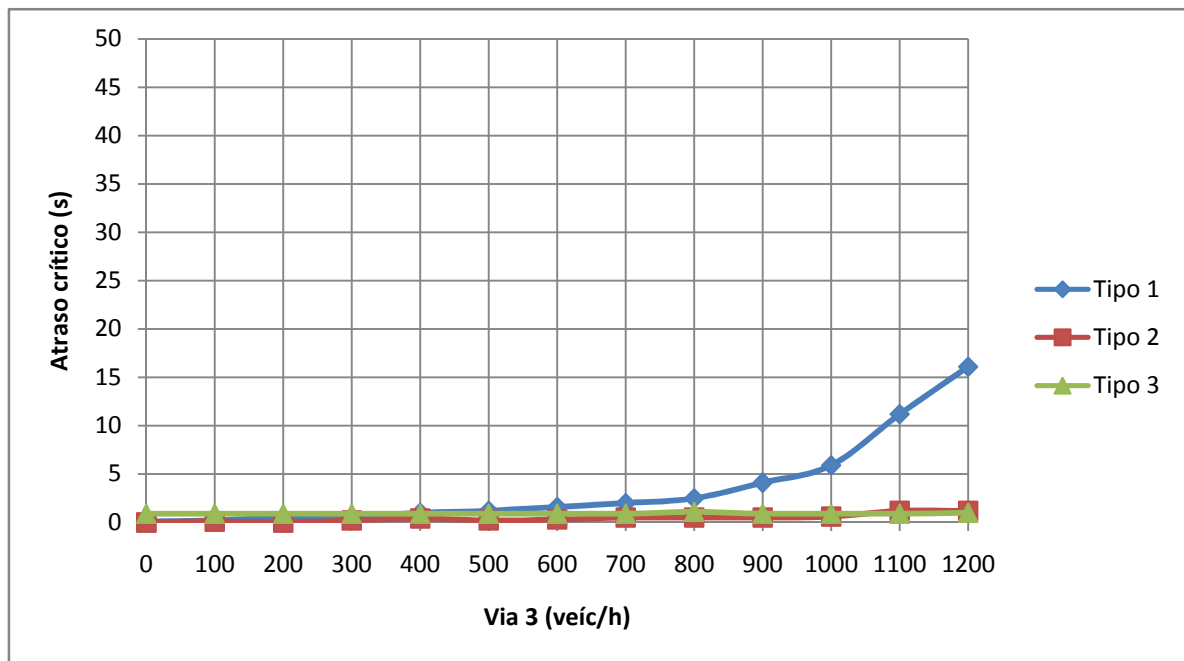


Figura 5.10 – Variação de atraso para um total de 200 veíc/h nas aproximações 1 e 2

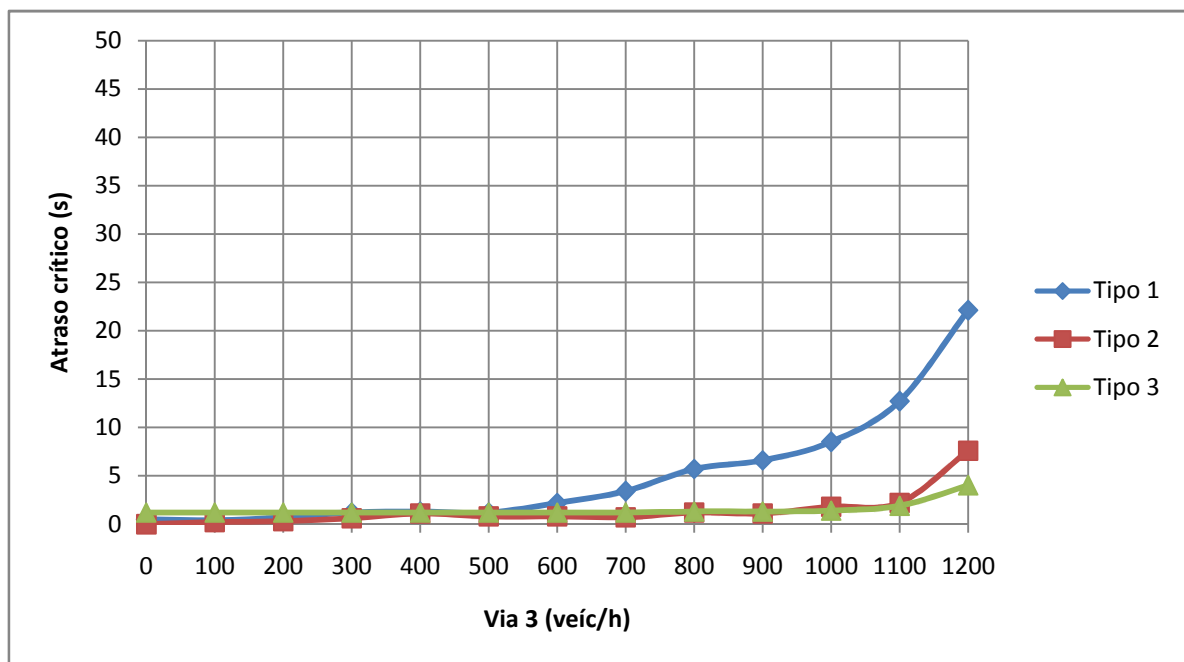


Figura 5.11 – Variação de atraso para um total de 300 veíc/h nas aproximações 1 e 2

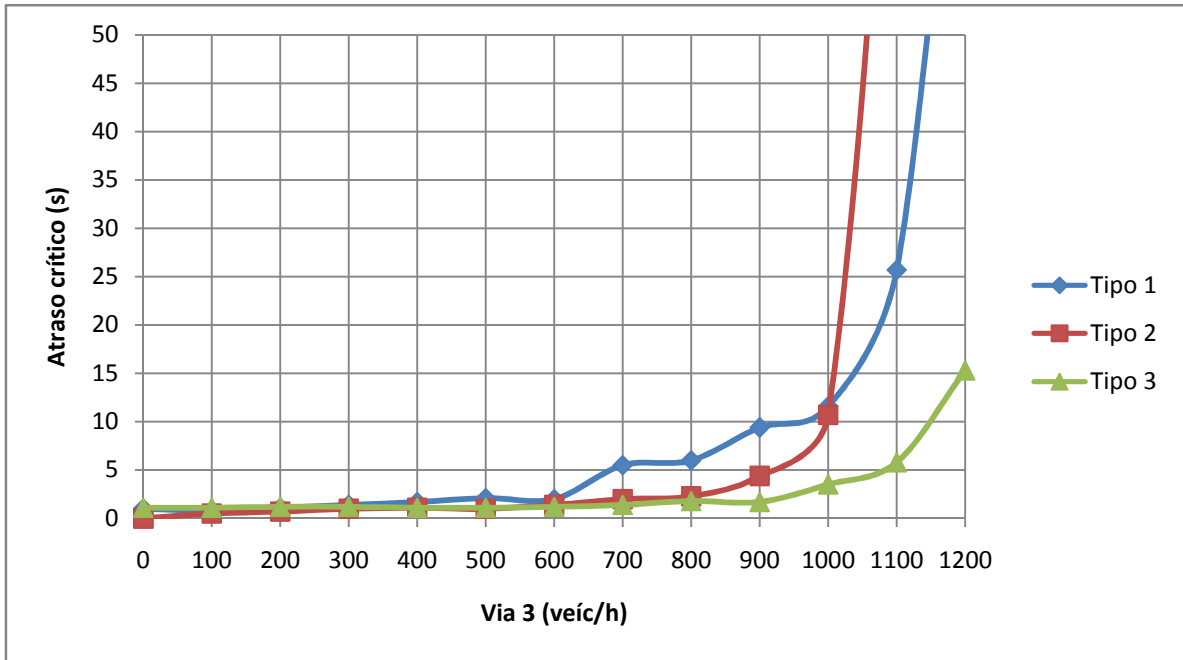


Figura 5.12 – Variação de atraso para um total de 400 veíc/h nas aproximações 1 e 2

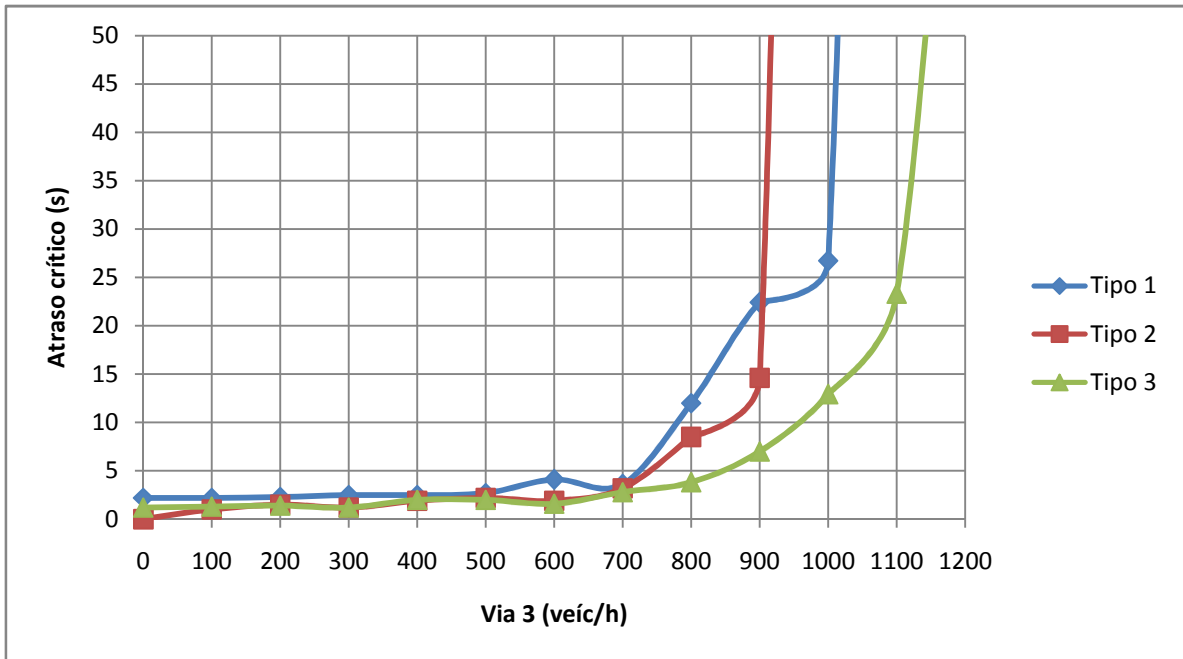


Figura 5.13 – Variação de atraso para um total de 500 veíc/h nas aproximações 1 e 2

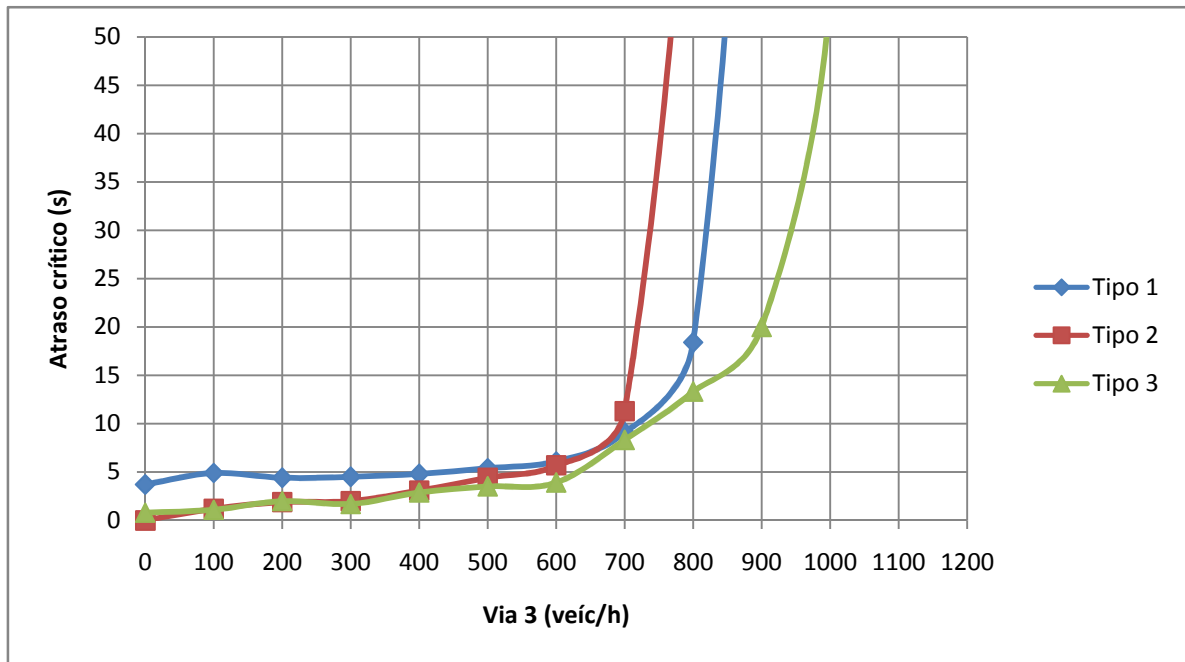


Figura 5.14 – Variação de atraso para um total de 600 veíc/h nas aproximações 1 e 2

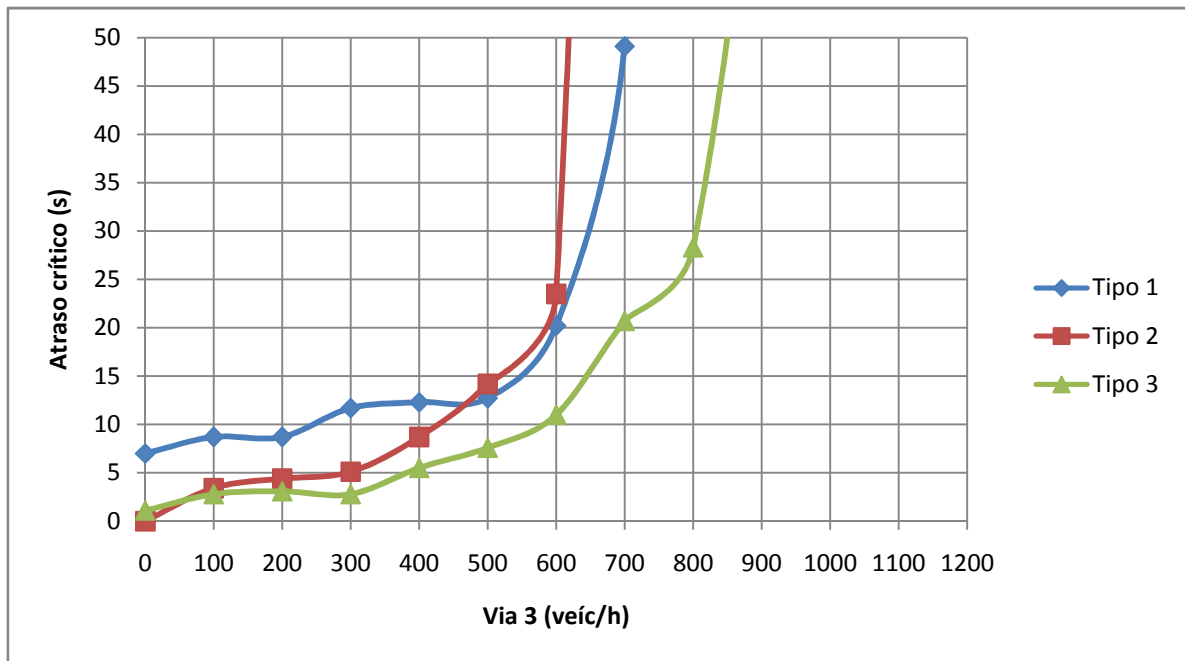


Figura 5.15 – Variação de atraso para um total de 700 veíc/h nas aproximações 1 e 2

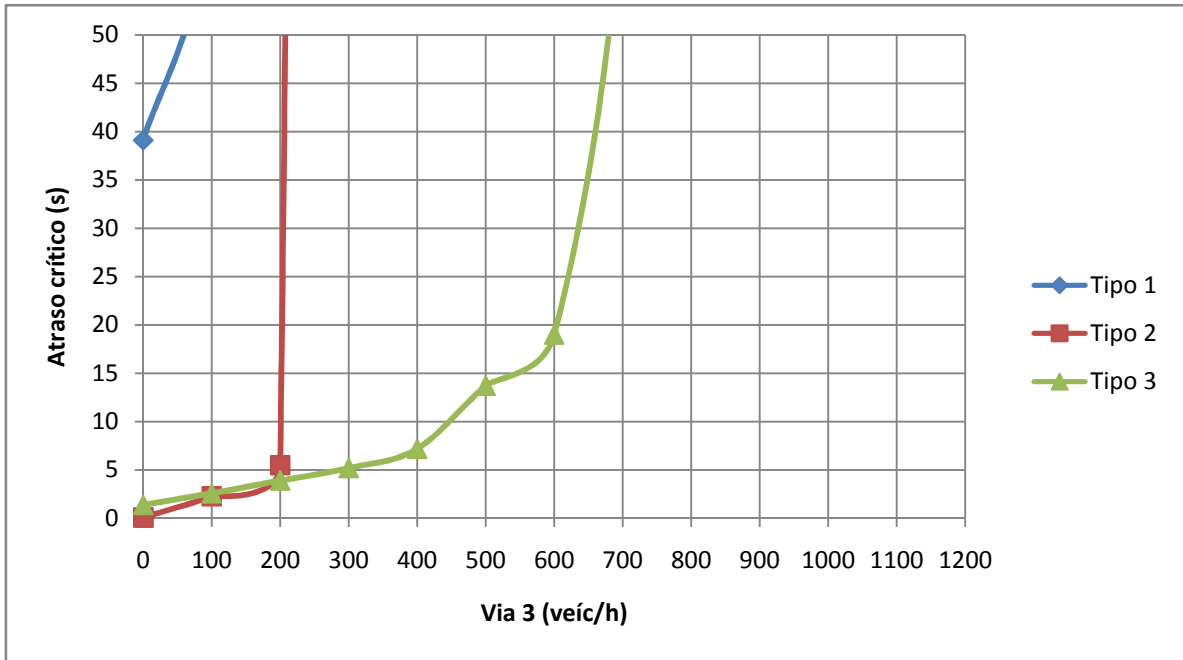


Figura 5.16 – Variação de atraso para um total de 800 veíc/h nas aproximações 1 e 2

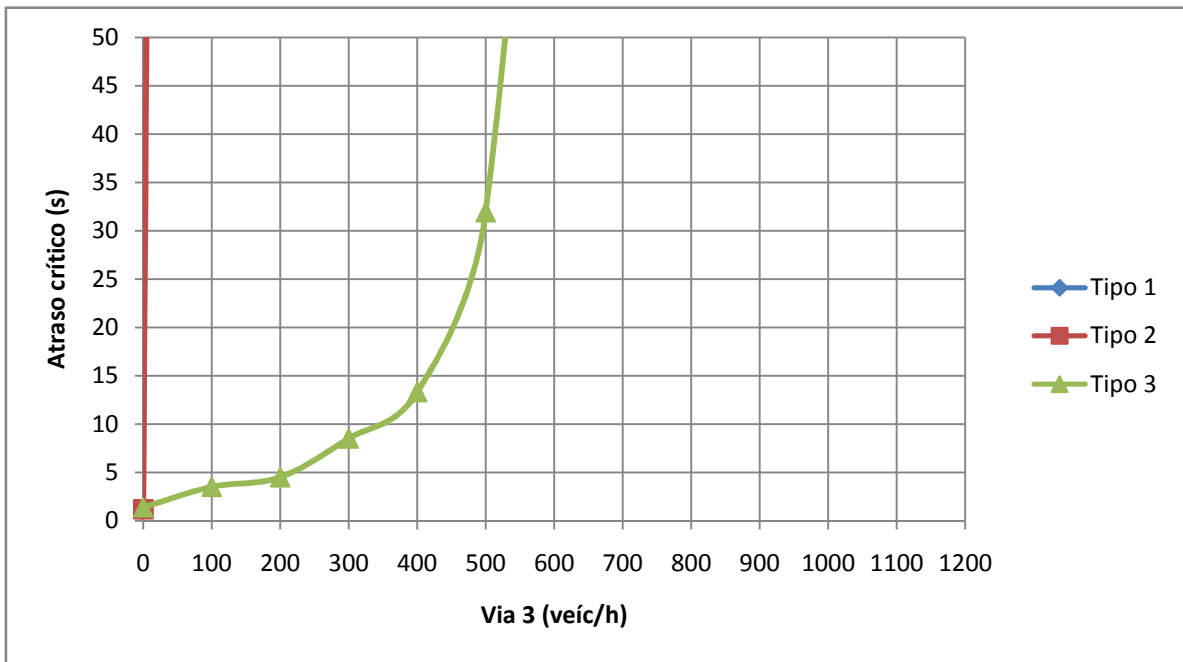


Figura 5.17 – Variação de atraso para um total de 900 veíc/h nas aproximações 1 e 2

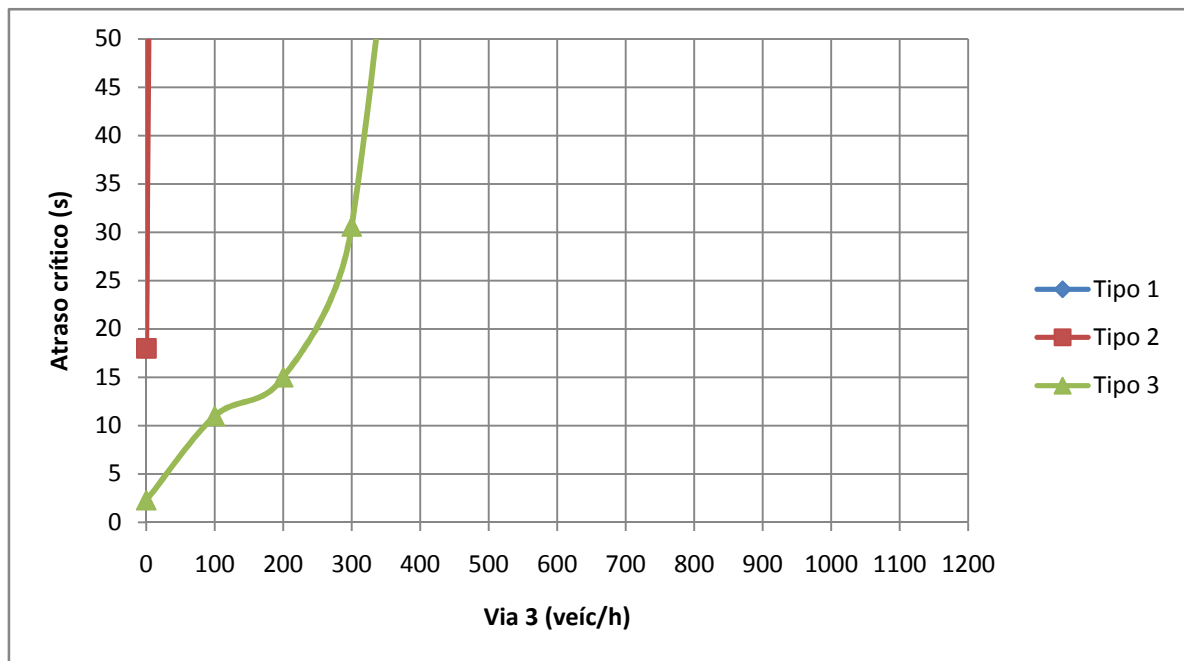


Figura 5.18 – Variação de atraso para um total de 1000 veíc/h nas aproximações 1 e 2

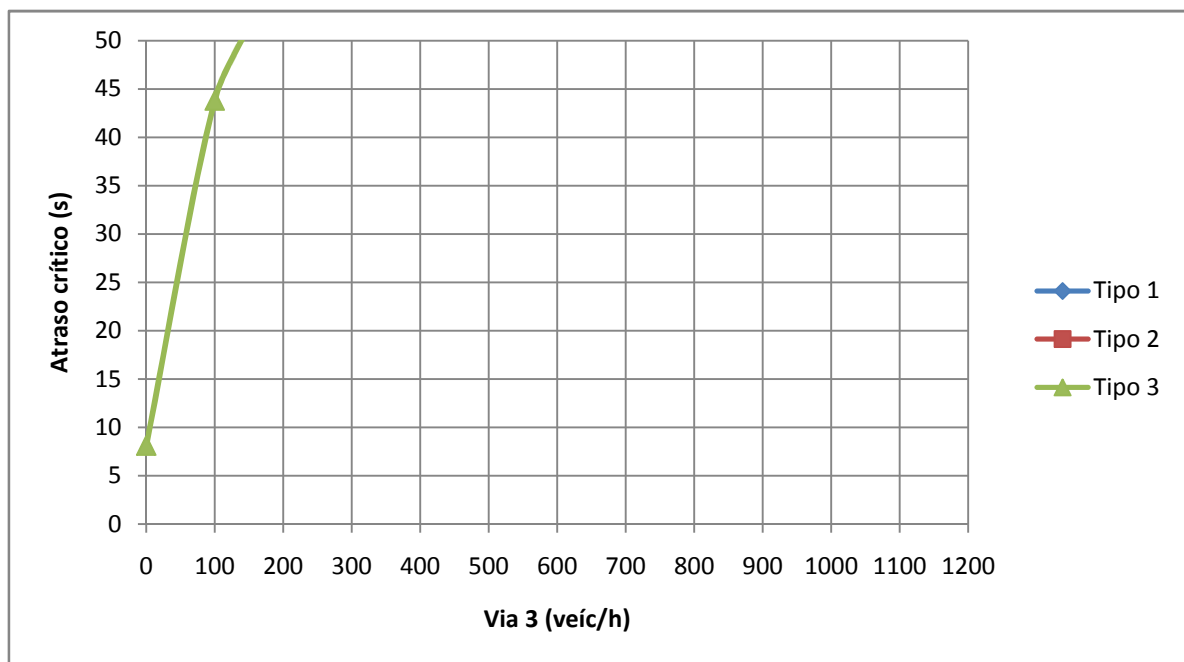


Figura 5.19 – Variação de atraso para um total de 1100 veíc/h nas aproximações 1 e 2

5.6. Comparação do desempenho com base nos níveis de serviço

Os níveis de serviço considerados são aqueles preconizados pelo HCM (2010) em função do atraso médio; no caso desse estudo o atraso crítico, ou seja, o atraso médio na aproximação crítica (onde ocorre o maior valor do atraso médio).

Nas Figuras 5.20 a 5.24 são mostrados os valores do fluxo na via secundária (3) associado a um determinado nível de serviço para distintos valores do fluxo na via principal (1,2), para as três configurações de rotatória.

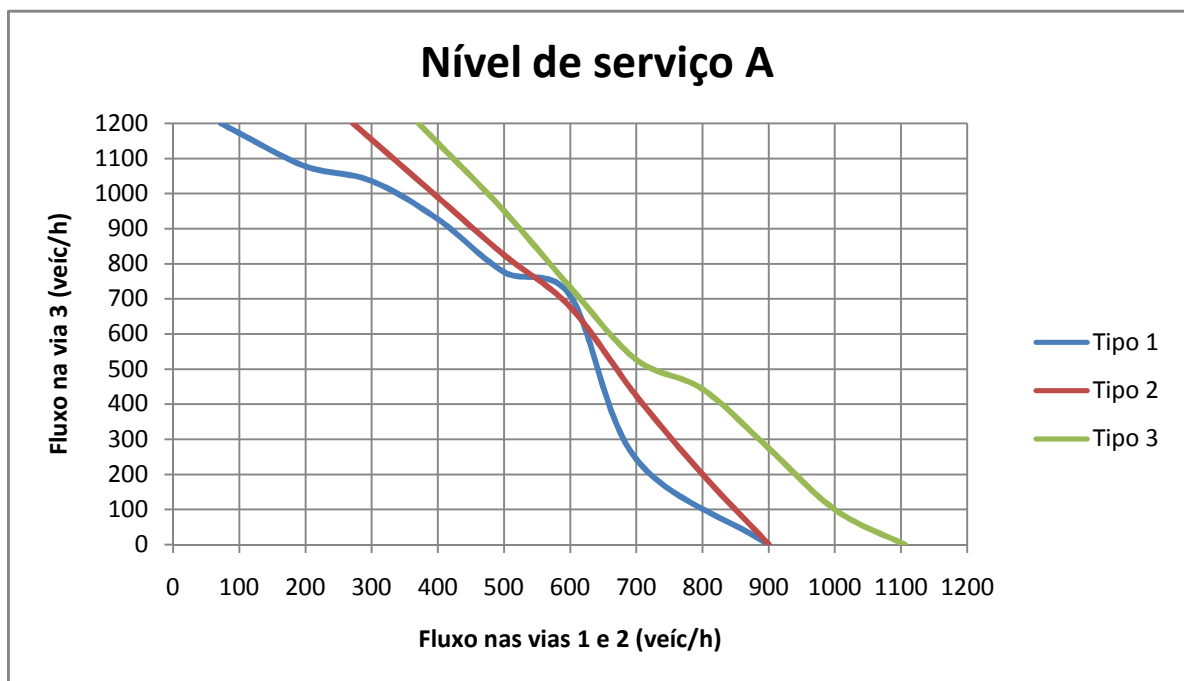


Figura 5.20 – Limites dos fluxos de tráfego para nível de serviço A.

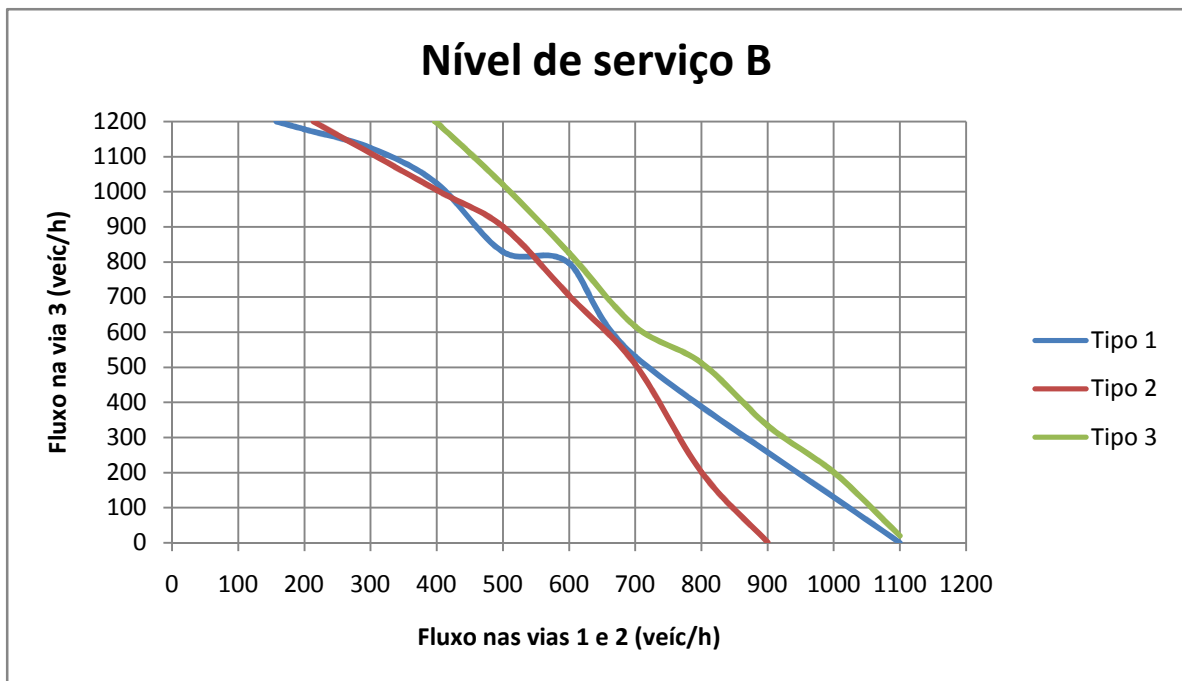


Figura 5.21 – Limites dos fluxos de tráfego para nível de serviço B

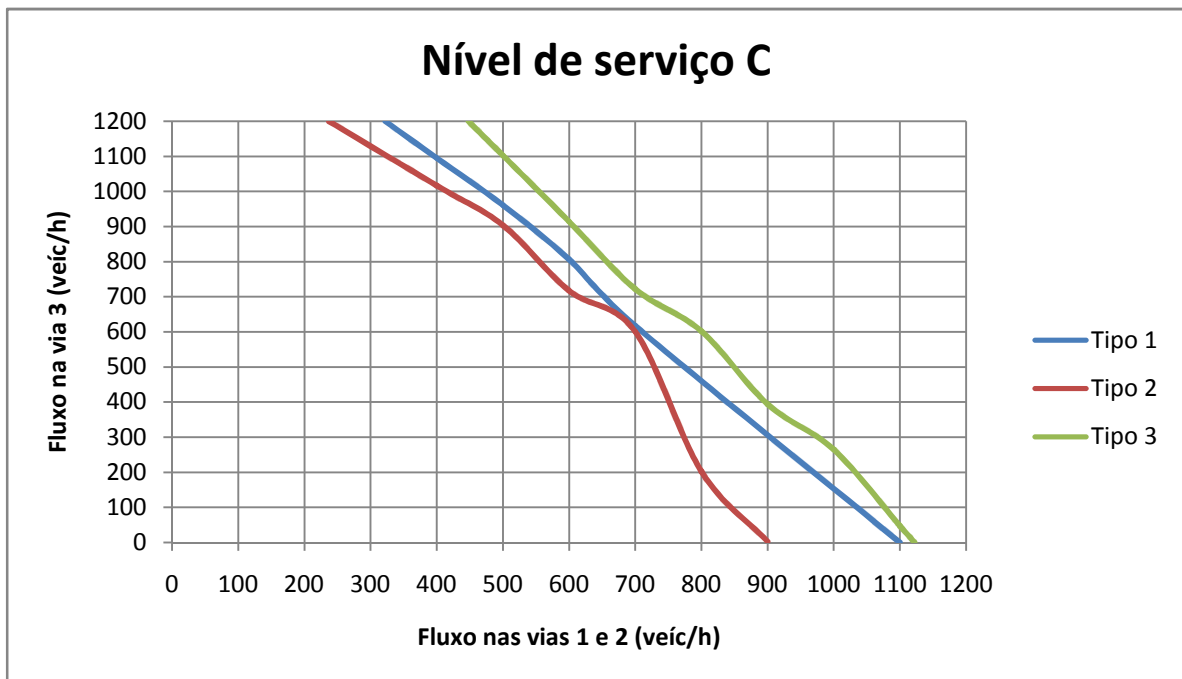


Figura 5.22 – Limites dos fluxos de tráfego para nível de serviço C

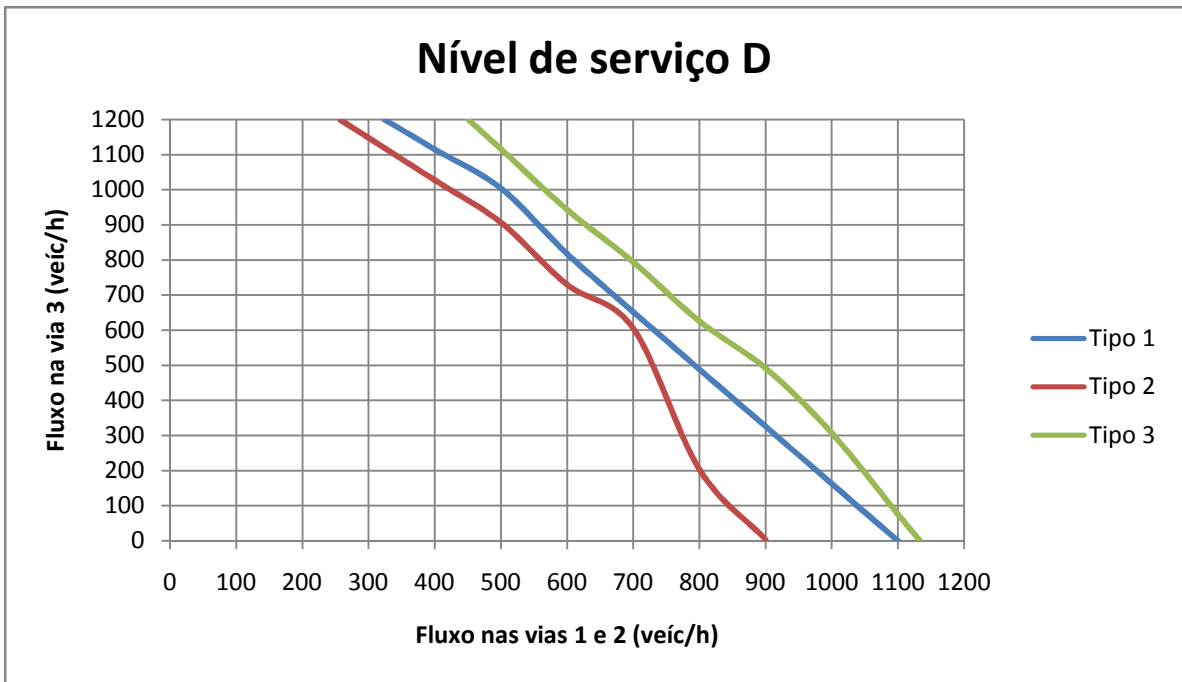


Figura 5.23 – Limites dos fluxos de tráfego para nível de serviço D

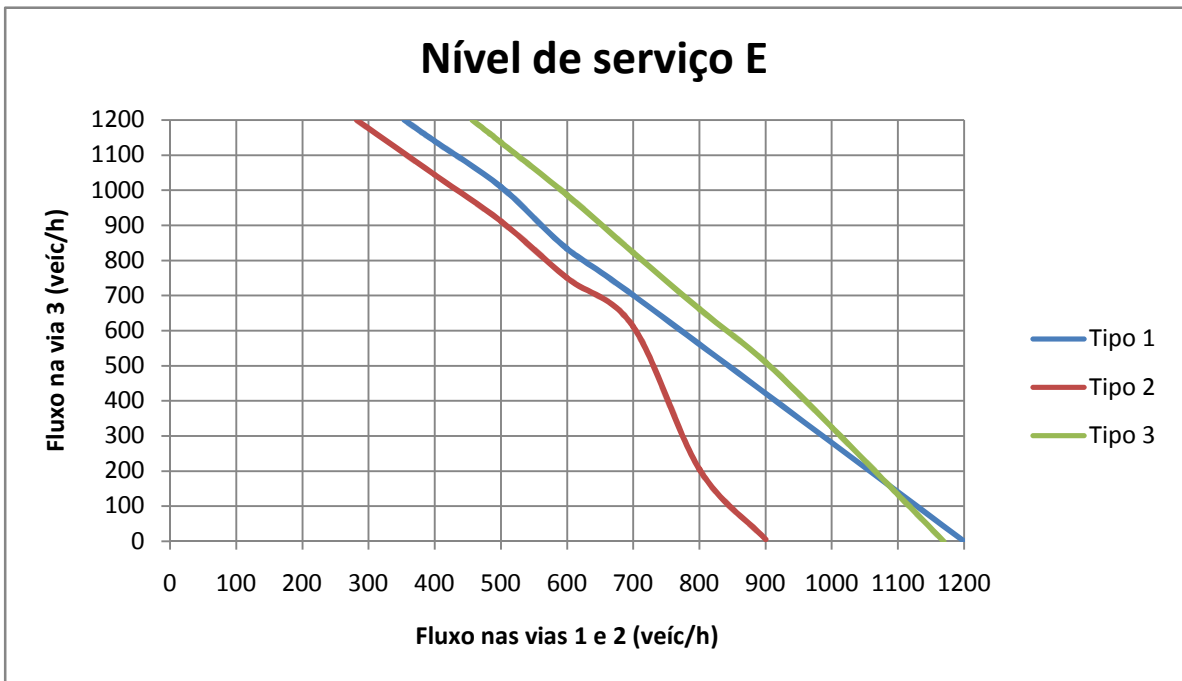


Figura 5.24 – Limites dos fluxos de tráfego para nível de serviço E

Na Tabela 5.3 são mostrados os valores aproximados do fluxo máximo na via secundária correspondente ao nível de serviço E (capacidade da via) associados a distintos valores do fluxo na via principal, para os três tipos de rotatória. Também

estão indicados os valores das diferenças da capacidade entre os três tipos de rotatórias.

Tabela 5.3 – Valores da capacidade na via secundária para os três tipos de rotatórias e diferença entre eles

Fluxo na principal (veíc/h)	Fluxo máximo na via secundária para nível de serviço E – capacidade (veíc/h)			Diferença (veíc/h)		
	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	1-2	3-2	3-1
500	1000	900	1130	100	230	130
600	820	750	990	70	240	170
700	700	600	820	100	220	120
800	560	200	670	360	470	110
900	420	*	510	420	510	90
1000	280	*	320	280	320	40
1100	120	*	120	120	120	0

*não considerado devido ao travamento da rotatória

Os valores da Tabela 5.3 mostram o desempenho superior da rotatória tipo 1 (prioridade para o fluxo da rotatória) sobre a do tipo 2 (prioridade para o fluxo da via principal) e a do tipo 3 (prioridade para fluxo da via principal com semáforos próximos) sobre as do tipo 1 e 2.

A superioridade da configuração 3 sobre a 2 é substancial; sobre a 1, menor, mas ainda bastante significativa. Nesse sentido, vale observar, por exemplo, que para fluxos na via principal de 900 veículos por hora por sentido, na rotatória do tipo 1 a capacidade na via secundária fica esgotada, enquanto na do tipo 3 a capacidade é de 510 veículos por hora. A capacidade na do tipo 3 somente fica esgotada para fluxos na via principal perto de 1200 veículos por hora.

Na Figura 5.25 são mostrados os intervalos de fluxos na via principal (1,2) e secundária (3) associados as três configurações de rotatória (tipo 1: preferência para o fluxo circulante, tipo 2: preferência para a via principal e tipo 3: preferência para a via principal com semáforos próximos) que correspondem aos menores valores do atraso crítico. Isto é, o tipo de configuração de rotatória indicada para ser utilizada

sob o critério do menor atraso crítico. A zona branca do gráfico corresponde ao nível de serviço F (situação considerada inaceitável).

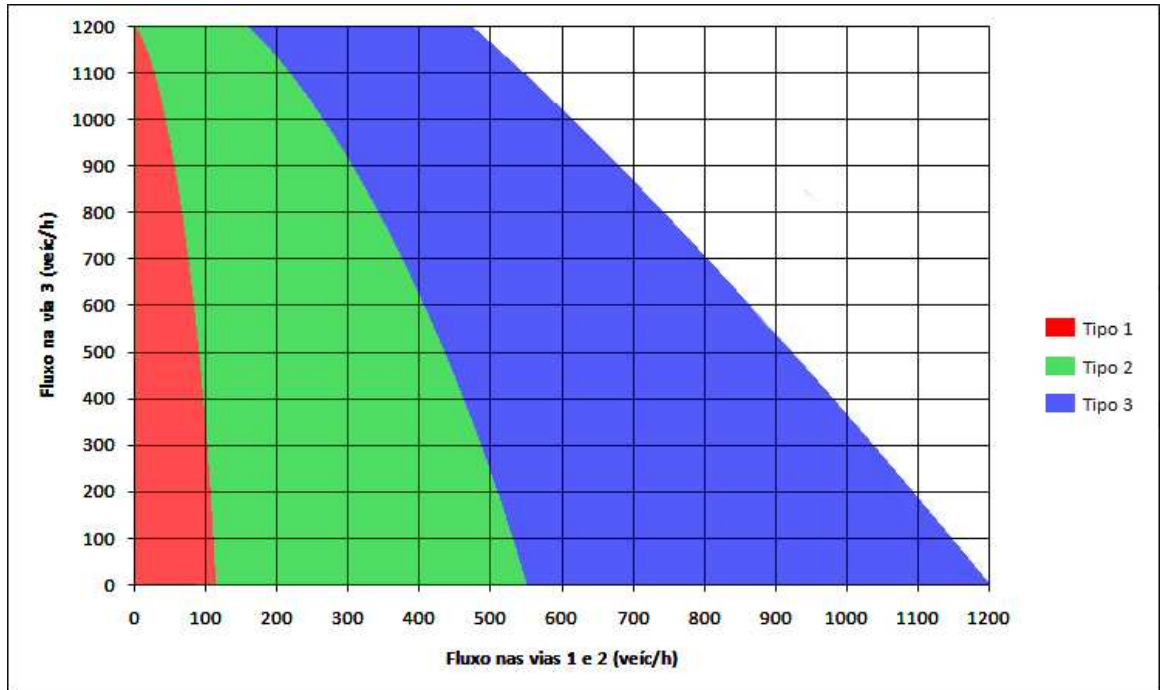


Figura 5.25 – Variação do tipo de operação em função do fluxo para nível de serviço até E

A rotatória do tipo 1 se mostrou a mais indicada para fluxos muito baixos; para fluxos baixos e médios, a mais indicada é a do tipo 2; e, para fluxos altos, a do tipo 3.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1. Sobre o desempenho operacional das rotatórias com semáforos próximos

Os valores obtidos nas simulações mostram, de forma inequívoca, o desempenho operacional superior da rotatória com prioridade para a via principal com semáforos próximos, adequadamente programados, no caso de fluxos altos. O emprego de semáforos próximos reduz significativamente o atraso na aproximação crítica e, em consequência, o tamanho da fila.

Isso significa que a presença de semáforos próximos aumenta de forma expressiva a capacidade de tráfego da rotatória.

Os resultados da simulação corroboram com o que se pode observar nos sistemas implantados na cidade de Araraquara, onde a colocação de semáforos próximos de rotatórias de três pernas melhorou de forma significativa o desempenho operacional dos dispositivos, reduzindo o atraso crítico e o tamanho da fila crítica e aumentando a capacidade.

6.2. Sobre a segurança do trânsito nas rotatórias com semáforos próximos

O acompanhamento da acidentalidade nas rotatórias de três pernas onde foram colocados semáforos próximos na cidade de Araraquara mostra uma redução dos acidentes graves de aproximadamente 90%. Cabe frisar que todas elas já operavam anteriormente com prioridade para os fluxos da via principal.

A colocação dos semáforos aumentou significativamente a capacidade de passagem do fluxo da via secundária e do fluxo de conversão à esquerda da via principal, com isso evitando que os condutores tivessem que aceitar pequenas brechas no fluxo da via principal, nos períodos de maior movimento, para poder passar – o que aumentava muito o risco de acidentes.

6.3. Sobre sugestões para trabalhos futuros

As seguintes principais sugestões podem ser feitas para trabalhos futuros sobre o emprego de semáforos próximos de rotatórias:

- Ampliar a análise para rotatórias com quatro ou mais pernas.
- Analisar outras distribuições do tráfego (matriz origem-destino) e outras programações semaforicas.
- Coletar informações no campo por meio de filmagens e outros procedimentos para aperfeiçoar a modelagem do fenômeno de modo tornando mais reais os resultados obtidos em simulações.

Sobre a modelagem do fenômeno, uma simples observação no campo mostra que quando os semáforos estão com a luz vermelha e os fluxos sem prioridade estão “atravessando” a via principal, o movimento da fila é próximo daquele que observa em semáforos e não do que ocorre em cruzamento com parada obrigatória, ou seja, os veículos passam um atrás do outro sem que os condutores tenham que “buscar” por brechas adequadas no fluxo da via principal e com tempo de posicionamento (*follow-up time*) nulo. Isso significa que é ainda melhor o desempenho operacional das rotatórias com semáforos próximos, pois na simulação é suposto o comportamento do tráfego em cruzamento com parada obrigatória.

- Analisar o efeito dos semáforos na travessia de pedestres.
- Incorporar no estudo dados reais sobre o efeito dos semáforos na acidentalidade do trânsito.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRADE, G. R. **Capacidade e Relação Fluxo-Velocidade em Autoestradas e Rodovias de Pista Dupla Paulistas**. 2012.154 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

AKISHINO, P. **Algumas Técnicas de Engenharia de Tráfego na Redução e Prevenção de Acidentes de Trânsito** [notas de aula]. Departamento de Engenharia de Transportes – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2009.

AI OMARI, B. H.; AI MASAEID, H. R.; AI SHAWABKAH, Y. S. Development of a delay model for roundabouts in Jordan. **Journal of Transportation Engineering**, Reston, v. 130, n. 1, p. 76-82, 2004.

BEN-EDIGBE, J.; ABDELGALIL, A.; ABBASZADEHFALLAH, I. Extent of Delay and Level of Service at Signalized Roundabout. **International Journal of Engineering & Technology**, Durham, v. 2, n. 3, p. 419-424, 2012.

BLOOMBERG, L.; DALE, J. **A Comparison of the VISSIM and CORSIM Traffic Simulation Models**. In: Institute of Transportation Engineers Annual Meeting, 2000, Nashville, 2000.

BRASIL. **Código de Trânsito Brasileiro**. Lei nº 9.503, de 23 de setembro de 1997. 1ª ed. Brasília: DENATRAN, 2008.

BOXILL, S. A.; YU, L. **An Evaluation of Traffic Simulation Models for Supporting ITS Development**. Center for Transportation Training and Research, Texas University, Huston, 115 p. Houston, 2000.

CHENG, J.; YANG, X.; DENG, W.; HUANG, X. Driver's Critical Gap Calibration at Urban Roundabouts: A Case Study in China. **Tsinghua Science and Technology**, Pequim, v. 13, n. 2, p. 237-242, 2008.

COELHO, M. D. **Análise e sugestões para projetos geométricos de rótulas modernas em vias urbanas**. 2012.121 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) –Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

CONSELHO NACIONAL DE TRÂNSITO. **Manual Brasileiro de Sinalização de Trânsito**. 1ª ed. Brasília: CONTRAN, 2007, 228 p. v. 1: Sinalização Vertical de Regulamentação.

CONSELHO NACIONAL DE TRÂNSITO. **Manual Brasileiro de Sinalização de Trânsito**. 1ª ed. Brasília: CONTRAN, 2007, 218 p. v. 2: Sinalização Vertical de Advertência.

CONSELHO NACIONAL DE TRÂNSITO. **Manual Brasileiro de Sinalização de Trânsito**. 1ª ed. Brasília: CONTRAN, 2007, 128 p. v. 4: Sinalização Horizontal.

CONSELHO NACIONAL DE TRÂNSITO. **Manual Brasileiro de Sinalização de Trânsito**. 1ª ed. Brasília: CONTRAN, 2007, 293 p. v. 5: Sinalização Semafórica.

CUNTO, F. J. C. **Assessing Safety Performance of Transportation Systems Using Microscopic Simulation**. 2008. 190 f. Tese (Doutorado em Filosofia em Engenharia Civil), University of Waterloo, Waterloo, 2008.

DAZANGO, C. F. **Fundamental of Transportation and Traffic Operations**. 1ª Ed. New York: Elsevier, 1997.

DEMARCHI, S. H., **Influência dos veículos pesados na capacidade de interseções rodoviárias**. 1995. 164 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

DEPARTMENT OF TRANSPORTATION – STATE OF WISCONSIN. **Facilities Development Manual – Chapter 11 Design – Section 26 - Roundabouts**, Milwaukee, EUA, 2010.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de Projeto de Interseções**, Rio de Janeiro, RJ, 2005.

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION. Roundabouts: Na Informational Guide. **Turner-Fairbank Highway Research Center**, McLean, Mar. 2000. Disponível em:

<<http://www.fhwa.dot.gov/publications/research/safety/00068/00068.pdf>>. Acesso em: 31 mar. 2013.

FERRAZ, A. C. P.; RAIA JR, A.; BEZERRA, B.; BASTOS, T.; e RODRIGUES, K. **Segurança Viária**. 1^a Ed. São Carlos: Suprema Gráfica e Editora, 2012.

FERRAZ, A. C. P. **Engenharia de Tráfego** [notas de aula]. Departamento de Engenharia de Transportes– Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

FORTES, F. Q.; BOSCHIERO, M, A, F.; BLASSIOLI, P, R, F.; FERRAZ, A, C, P. Interseções rodoviárias: passado, presente e futuro. In: III Seminário de Segurança Rodoviária, 2004, São Paulo, **Seminário...** São Paulo: DER-SP, 2004.

FLANNERY, A.; KHAROUFEH, J. P.; GAUTAM, N.; e ELEFTERIADOU, L. **Estimating Delay at Roundabouts**. In: Institute of Transportation Engineers Annual Meeting, 2000, Nashville, 2000.

HAMED, M. M.; EASA, S. M.; BATAYNEH, R. R. Disaggregate gap-acceptance model for unsignalized T-intersections. **Journal of Transportation Engineering**, Reston, v. 123, n. 1, p. 36-42, 1997.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Base de Dados Cidades. 2014. Disponível em: <<http://cidades.ibge.gov.br/xtras/home.php>>. Acesso em: 11Out. 2013.

KHISTY, C. J.; LALL, B. K. **Transportation Engineering – An Introduction**. 2^a Ed. Upper Saddle River: Prentice-Hall, 1998.

LIN, Z.; WEN, D.; SHAOBIN, L.; SONGLONG, Z. Dynamic Vehicular Analysis Between a Roundabout and a Pre-Timed Traffic Signal. In: The eighth International Conference of Chinese Logistics and Transportation Professionals, 2008, Chengdu, **Proceedings...** Chengdu: ASCE, 2008, p. 3982.

OLIVEIRA, M. L.; CYBIS, H. B. B. Revisão da experiência de calibração do software Vissim aplicado a um estudo de caso de autoestrada brasileira. **8ª Semana da Engenharia de Produção Sul-Americana**, Bento Gonçalves, 2008.

ORTOLANI, G. A. **Comparação do desempenho de dispositivos de interseções rodoviárias em nível utilizando o simulador Integration**. 2003.100 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

PAPACOSTAS, C. S.; PREVEDOUROS, P. D. **Transportation Engineering and Planning**.3^a Ed. Upper Saddle River: Prentice-Hall, 2001.

PLANUNG TRANSPORT VERKEHR AG. **VISSIM 5.40 – User Manual**, Karlsruhe, Germany, 2012.

ROESS, R. P.; PRASSAS, E. S.; MCSHANE, W. R. **Traffic Engineering**.3^a Ed. Upper Saddle River: Prentice-Hall, 2004.

SETTI, J. R. A. **Simulação de fluxos de tráfego** [slide]. Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

SILVA, A. M. C. B.; SECO, A. J. M. **Dimensionamento de Rotundas**. 2004. 42 f. Documentos de Trabalho. Faculdade de Ciências e Tecnologia. Universidade de Coimbra, Coimbra, 2004.

TRANSPORTATION RESEARCH BOARD. **Highway Capacity Manual**, Washington D. C., EUA, 2000.

TRANSPORTATION RESEARCH BOARD. **Highway Capacity Manual**, Washington D. C., EUA, 2010. V. 1: Concepts.

TRANSPORTATION RESEARCH BOARD. **Highway Capacity Manual**, Washington D. C., EUA, 2010. V. 3: Interrupted Flow.

TRUEBLOOD, M.; DALE, J. Simulating Roundabouts With VISSIM.In: 2ND URBAN STREET SYMPOSIUM, 2003, Anaheim. **Anais...**, Anaheim, 2003.

XU, F.; TIAN, Z. Z. Driver Behavior and Gap-Acceptance Characteristics at Roundabouts in California. **Journal of Transportation Engineer**, Reston, p. 117-124, 2008.

ZHANG, Y. **Scalability of Car-Following and Lane-Changing Models in Microscopic Traffic Simulation Systems**. 2004.157 f. Dissertação (Mestrado em

Ciências em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Luisiana State University, Baton Rouge, 2012.