

Análise Operacional de Fluxo em Pelotão em Interseções do Tipo Rotatória

Diego Fernandes Neris
Universidade de São Paulo
diego.neris@usp.br

Antonio Clóvis Pinto Ferraz
Universidade de São Paulo
cocca@sc.usp.br

RESUMO

Neste trabalho foi analisado o desempenho de interseções em nível tipo rotatória nas três seguintes situações: (1) parada obrigatória em todas as aproximações (caso usual); (2) passagem sem parada em uma via principal; (3) caso “2” com o emprego de semáforos na via principal próximos da interseção, visando facilitar a passagem nas outras aproximações e melhorando a segurança. O estudo foi realizado para o caso de rotatória com três pernas utilizando o simulador VISSIM. Os resultados mostram que a solução com o emprego de semáforo tem melhor desempenho no caso de altos fluxos.

Palavras-chave: rotatórias, tráfego, atraso

ABSTRACT

In this paper the performance of roundabout intersections is analyzed in the three following cases: (1) stop signs on all approaches (the usual case); (2) preferential passage at the main street; (3) case "2" with the use of traffic lights on the main road and near the intersection, to facilitate the passage on the other approaches and improving safety. The study was conducted in the case of a three-legged roundabout using the VISSIM simulator. The results showed that the solution with the use of traffic light has a better performance in the case of high flows.

Keywords: roundabouts, traffic, delay

1. INTRODUÇÃO

A rotatória (ou rótula) é um dispositivo de segurança viária para interseção em nível onde os veículos se movem contornando uma ilha central podendo realizar todos os movimentos: passagem direta, conversão à direita, conversão à esquerda e retorno.

As operações comuns em rotatórias são com prioridade para a via circular, onde os veículos que chegam na interseção devem dar a preferência para os que estão utilizando o dispositivo e rotatória com preferencial para uma via principal, onde todos os veículos da via secundária ou os veículos da via principal que farão conversão devem dar a preferência.

Um novo método de operar rotatórias vem sendo estudado onde o fluxo preferencial não é do dispositivo, mas sim de uma via que tem semáforos instalados à montante apenas com a finalidade de formação de pelotões de veículos. Esse método foi implantado em caráter experimental na cidade de Araraquara – SP, Brasil e após o emprego dessa operação, houve uma melhoria considerável no fluxo da região e na segurança do trânsito.

2. INTERSEÇÃO OPERADA POR ROTATÓRIA (RÓTULA)

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.

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).

2.1 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).

O número de pontos de conflitos, em comparação com uma interseção comum, é quatro vezes menor, conforme a Figura 1.

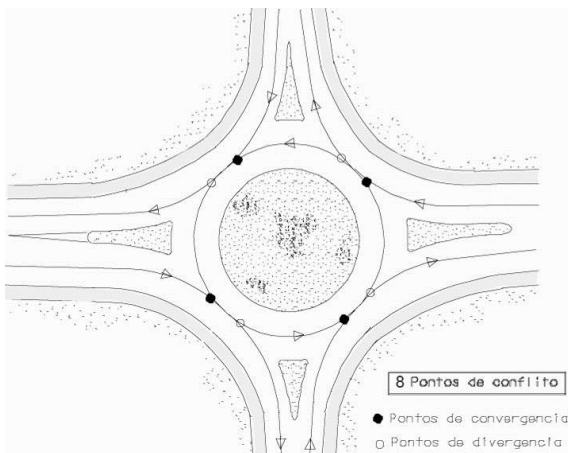
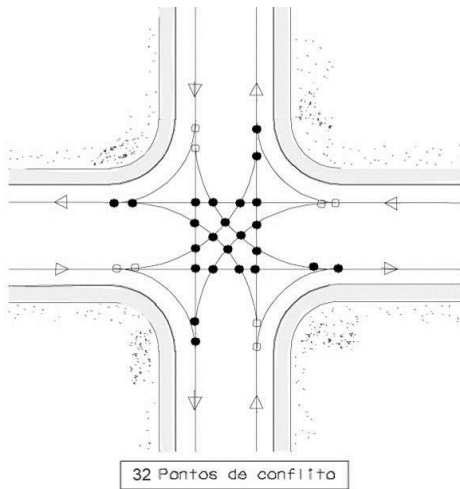


FIGURA 1: Pontos de Conflitos
Fonte: Silva e Seco (2004)

O tipo de colisão em que os motoristas estão vulneráveis a sofrer é de menor gravidade nas rotatórias. Enquanto na interseção comum são apresentados vários pontos de colisão transversal ou lateral em sentido contrário, na rotatória apresenta pontos de conflito de colisão lateral no mesmo sentido (onde a velocidade relativa dos veículos é menor).

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 a ser cruzada (formando um ângulo aproximado de 180°), em uma rotatória esse valor se reduz (dependendo das características geométricas) pois há apenas um sentido a ser observado.

É importante a limitação da velocidade no dispositivo para, no máximo, 50 km/h. Acima desse valor, a rotatória passa a ser menos segura que os outros tipos de interseções. Para o controle da velocidade é importante um raio que, ao mesmo tempo, possibilite uma boa fluidez e que também cause a necessidade, por parte dos motoristas, da redução de velocidade. O valor recomendado é entre 10 e 25 metros (Brüde e Larsson, 2000).

Brüde e Larsson (2000) desenvolveram um método de cálculo de taxa de acidentes em rotatórias através de um estudo empírico na Suécia. Segundo o modelo desenvolvido por eles, os principais fatores que influenciam na acidentalidade são: número de pernas do dispositivo (rotatórias de três pernas tem uma redução de 8% na taxa de acidentes ao se comparar com uma de

quatro pernas), velocidade de operação (quando a velocidade passa de 50 km/h para 70 km/h, a taxa de acidentes aumenta 84%), número de faixas (uma rotatória de 2 faixas tem um acréscimo de 17% na taxa de acidentes se comparar com de 1 faixa) e velocidade dos veículos na aproximação de 600 metros do dispositivo (se a velocidade na proximidade for maior que no dispositivo, a taxa de acidentes aumenta 40%).

2.2 Nível de Serviço

Para avaliar o nível de serviço de uma rotatória, não há um critério bem definido, porém o HCM - *Highway Capacity Manual* (TRB, 2010) indica que seja feito com base nos valores de atrasos de controle (atrasos causados pela espera na interseção), conforme a Tabela 1 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).

TABELA 1: Critério de Medida de Nível de Serviço para Automóveis

Atraso (s/veic)	Nível de Serviço	
	V/C ≤ 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

Fonte: Highway Capacity Manual 2010

3. METODOLOGIA

Para a análise comparativa de desempenho em rotatórias, foram utilizados três tipos de operações diferentes: (1) rotatória com prioridade para a via circular, (2) rotatória com prioridade para a via principal e (3) rotatória com formação de pelotões, uma nova abordagem relacionada ao assunto. Esse novo método de operação de rotatória foi implantado em caráter experimental no município de Araraquara/SP, Brasil, onde há alto fluxo de veículos fazendo conversões à esquerda a partir da via de maior movimento.

Utilizou-se o *software* VISSIM, um microssimulador que emprega o algoritmo de *car-following* psicofísico (PTV AG, 2012) para estimar o atraso críticos devido às filas formadas à montante da rotatória.

O dimensionamento do dispositivo foi baseado e simplificado a partir do caso em estudo (de Araraquara), conforme a Figura 2.

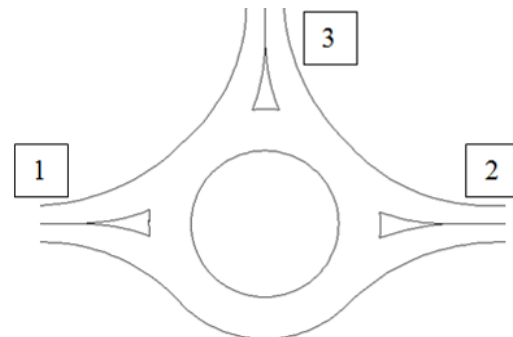


FIGURA 2: Modelo em Estudo

Como o caso é em via urbana, o limite de velocidade considerado foi de 50 km/h nas pernas e de 30 km/h na rotatória, nos casos em que esta é a preferencial. O raio considerado foi de 18 m.

Como dado de entrada, o fluxo foi variado de 100 a 1200 veículos/hora nas vias principais (1 e 2) e de 0 a 1200 veículos/hora na via secundária (3). Esse acréscimo foi de 100 veículos/hora na via 3 para cada fluxo das vias 1 e 2 (que variaram também com acréscimo de 100 veículos/hora).

Como destino do tráfego, foi adotado 50% para cada direção, criando um cenário mais pessimista. Não foi considerado a possibilidade de retorno dos veículos para a via de origem.

Os diferentes tipos de operações analisadas são apresentados a seguir.

3.1 Rotatória com Prioridade para a Via Circular

Nessa operação os veículos que chegam na 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. Conforme seja a configuração do cenário local, as vias que chegam na interseção podem ser compostas por sinalização “Dê a Preferência” ou “Pare” para os pontos de retenção (ver Figura 3).

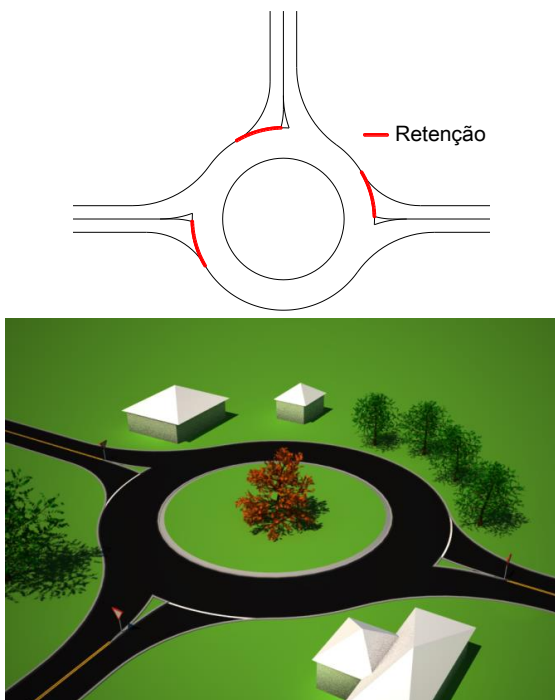


FIGURA 3: Rotatória com Prioridade para a Via Circular

3.2 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. 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 4).

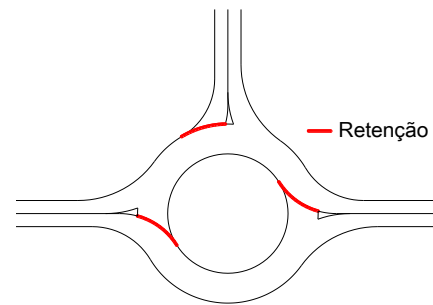


FIGURA 4: Rotatória com Prioridade para a Via Principal

3.3 Rotatória com Formação de Pelotões

Na rotatória com a formação de pelotões (Figura 5), a operação funciona de forma semelhante à rotatória com prioridade para a via principal, porém há um semáforo próximo a interseção cujo objetivo é o agrupamento de veículos na via principal e conseqüente atraso para disponibilizar intervalos de tempo para realização de movimentos não prioritários, melhorando o atraso geral do sistema e a segurança, pois haverá menos conflitos entre os diferentes movimentos, ocorrendo apenas com os veículos dos extremos dos pelotões, ou seja, a grande maioria dos veículos não estará exposta à colisão lateral.

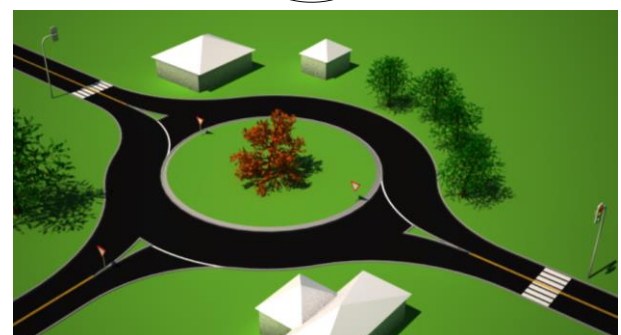
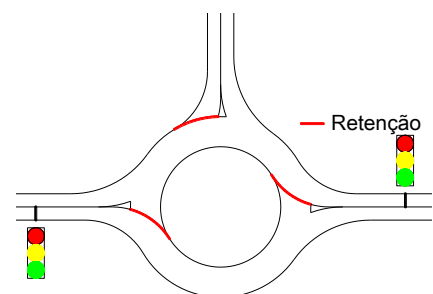


FIGURA 5: Rotatória com Formação de Pelotões

Para as simulações de fluxo formado por pelotões, o ciclo semafórico foi calculado caso a caso e implantado a uma distância razoável nas vias principais (pois o objetivo não é semaforizar a rotatória, mas sim para formar pelotões).

Essa distância foi simulada em vários fluxos diferentes que tiveram um comportamento muito parecido e, para o caso de 900 veículos/hora nas faixas da via principal e de 500 veículos/hora na via secundária, obtiveram-se as variações no atraso crítico conforme a Figura 6 que apresenta também a faixa limite de atraso crítico para o início do nível de serviço F (50 segundos).

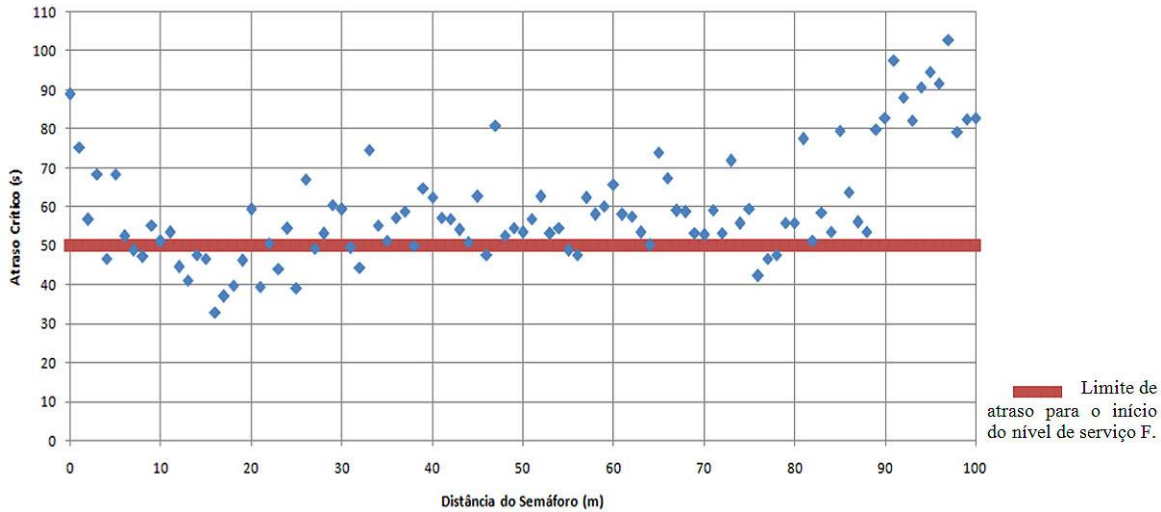


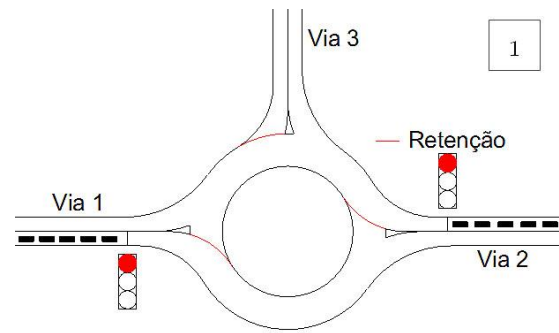
FIGURA 6: Variação no Atraso Crítico em Função da Distância dos Semáforos

Com isso foi verificada, para a instalação dos semáforos, uma faixa de distância ótima de 10 a 25 metros da interseção.

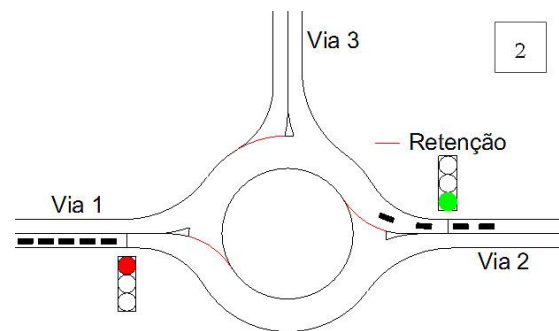
A instalação dos semáforos distantes é importante também para a questão de segurança. Os veículos das outras vias não podem ser influenciados pela sinalização das vias principais devendo apenas esperar o fluxo preferencial, ou seja, caso algum veículo passe pelo semáforo fechado, os outros veículos devem aguardá-lo terminar a travessia. Isso poderia não ocorrer caso os motoristas que devem ceder a preferência, soubessem que o semáforo está fechado para a preferencial.

Para maior eficiência na utilização do dispositivo, foi considerada uma defasagem de tempo entre os dois semáforos com o objetivo de disponibilizar um intervalo para os veículos de cada perna realizar seu movimento. Essa defasagem é o tempo suficiente para que o primeiro veículo da via 1 (sujeito ao conflito na conversão para esquerda) obrigatoriamente pare para a passagem do último veículo da via 2, além de servir para 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.

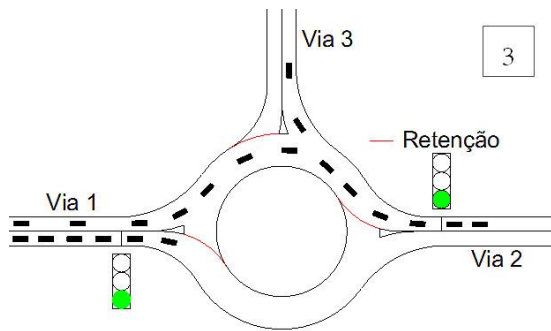
Com base nisso, é apresentado o esquema de operação na Figura 7.



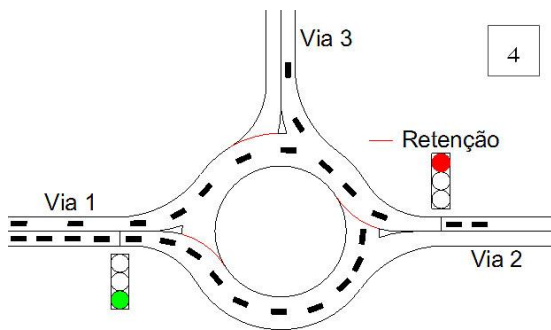
1 - Semáforos fechados para as vias 1 e 2.



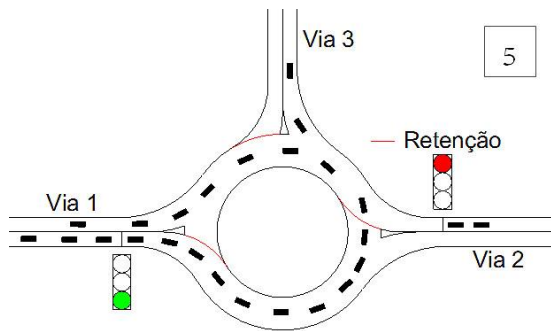
2 - Semáforo abre para a via 2.



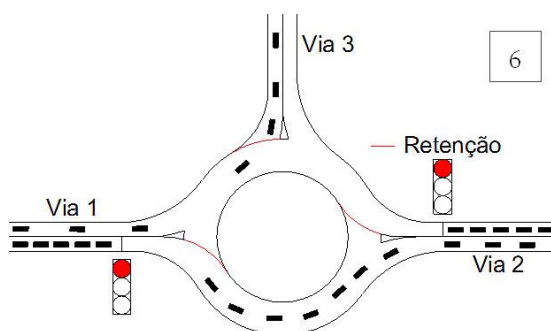
3 - Semáforo abre para a via 1.



4 - Semáforo da via 2 fecha em um tempo suficiente para que o último carro passe pelo ponto de conflito assim que o primeiro carro da via 1 chega.



5 - O primeiro carro da via 1 entra em movimento logo atrás do último carro da via 2.



6 - Com os semáforos das vias 1 e 2 fechados, a via 3 libera seu fluxo.

FIGURA 7: Esquema de Operação da Rotatória com Formação de Pelotões

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para comparar o desempenho das três diferentes operações de rotatória, são apresentados gráficos com curvas representando o fluxo na via principal (para cada sentido) em função do fluxo na via secundária e do atraso crítico, ou seja, no maior atraso entre as três pernas da rotatória.

A Figura 8 apresenta a relação das variações dos fluxos em função dos atrasos críticos para o caso de rotatória com preferência para os veículos circulantes. Vale destacar que a operação representada demonstrou eficiência apenas para valores muito baixos de fluxos.

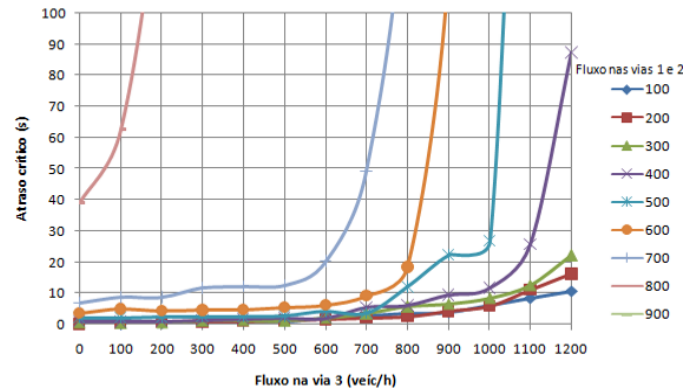


FIGURA 8: Atraso Crítico X Fluxo Rotatória com Preferencial para Veículos Circulantes

Também foram feitas simulações para a situação onde a rotatória tem como preferencial os fluxos das vias 1 e 2, os resultados foram conforme apresentados na Figura 9.

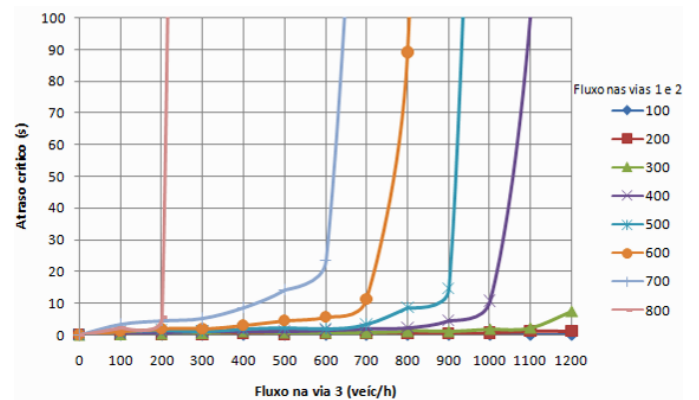


FIGURA 9: Atraso Crítico X Fluxo Rotatória com Preferencial para as Vias 1 e 2

Em geral, essa operação mostrou-se mais eficiente que a anterior devido a prioridade de dois dos três fluxos existentes, porém, com volumes mais elevados, houve um bloqueio da rotatória devido ao alto fluxo fazendo conversão à esquerda, conforme a Figura 10.

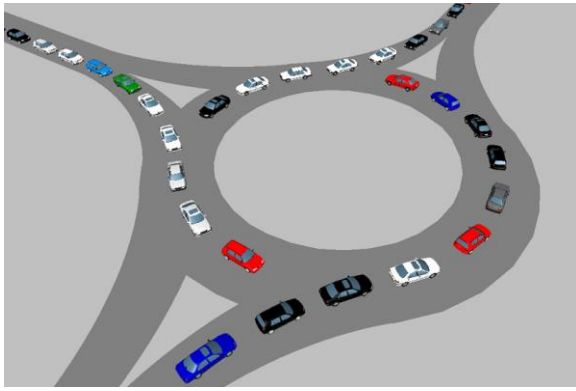


FIGURA 10: Bloqueio na Rotatória
Fonte: Software VISSIM

A Figura 11 mostra a relação dos atrasos críticos em função da variação dos fluxos para o caso da rotatória com semáforo à jusante com a função de formação de pelotão.

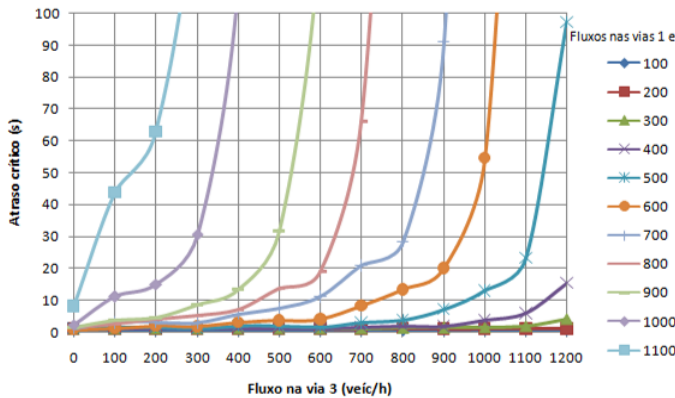


FIGURA 11: Atraso Crítico X Fluxo Rotatória com Formação de Pelotão

Observa-se que há uma melhoria na capacidade do dispositivo que consegue operar com altos fluxos de veículos e sem o bloqueio da rotatória que passou a operar com fluxo na via principal de até 1100 veículos/hora.

5. CONCLUSÃO

Com a análise detalhada de cada valor de atraso, chegou-se a uma tipo de operação ideal para diferentes combinações de fluxos, conforme a Figura 12.

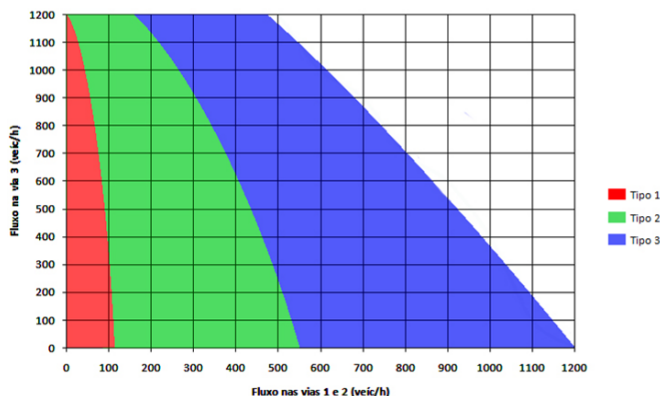


FIGURA 12: Operação mais Eficiente em Função dos Fluxos

A rotatória com preferencial para os veículos circulantes se apresentou praticamente inviável ao se comparar com as outras operações para uma interseção de três pernas. Quando é concedida a preferencial para duas pernas, como é o caso da rotatória com via preferencial (rotatória tipo 2), apenas uma perna passa a ter problemas de atrasos (ao invés das três, como na rotatória tipo 1). Para uma rotatória de quatro ou mais pernas seria diferente pois o número de pernas com movimentos preferenciais (que sempre são duas) passaria a ser igual ou menor ao número de pernas com problemas de atraso. Por exemplo, em uma rotatória de cinco pernas, dando a preferência para duas, restam três que passam a ter problemas de atraso.

A rotatória com via preferencial (rotatória tipo 2) se apresentou muito eficiente até aproximadamente 400 veículos/hora na via principal. Após esse valor, os atrasos na via secundária passam a ser altos e aumenta a possibilidade de haver bloqueio na rotatória. Esse problema é resolvido com a formação de pelotões (rotatória tipo 3) que passa a ser mais eficiente devido à retenção de veículos causado pelo semáforo que oferece a oportunidade para cada uma das três vias liberarem o fluxo por um período de tempo, o que acarreta também na diminuição do número de conflitos entre veículos oriundos de vias diferentes, melhorando a segurança.

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.

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.

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.

AGRADECIMENTOS

Ao auxílio oferecido pelo Observatório Nacional de Segurança Viária que confiou nesse projeto e pela parceria da organização com a Universidade de São Paulo, que tende a contribuir cada vez mais para a segurança viária no Brasil.

O Observatório Nacional de Segurança Viária é uma organização não governamental sem fins lucrativos e reconhecida pelo Ministério da Justiça como OSCIP (Organização da Sociedade Civil de Interesse Público). Criada a partir da iniciativa de profissionais de diferentes áreas (Educação, Fiscalização, Legislação, Veicular, Engenharia, etc.), que preocupados com os altos índices de acidentes no trânsito brasileiro, decidiram fundar uma organização que atue como agente catalisador da sociedade brasileira no que diz respeito ao desenvolvimento e à gestão de ações de segurança viária e veicular.

Mais que um órgão consultivo, o Observatório nasce como órgão de inteligência, destinado a promover os subsídios técnicos

necessários para o desenvolvimento seguro do trânsito em prol do cidadão, por meio da educação, pesquisa, planejamento e informação. A ideia é executar ações que gerem soluções eficientes, necessárias ao convívio harmônico entre pessoas, veículos e vias.

REFERÊNCIAS

Brüde, U. e Larsson, J. (2000) What roundabout design provides the highest possible safety. **Nordic Road and Transport Research**, 2, 17–21.

DNIT (2005) **Manual de Projeto de Interseções**, Capítulo 7. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, Brasil.

Ferraz, A. C. P., Raia Jr, A., Bezerra, B., Bastos, T. e Rodrigues, K. (2012) **Segurança Viária**. 1st Ed. São Carlos, São Paulo.

PTV AG (2012) **VISSIM 5.40 – User Manual**, Traffic Mobility Logistics, Alemanha.

Silva, A. M. C. B. e Seco, A. J. M. (2004) **Dimensionamento de Rotundas**. Documentos de Trabalho. Faculdade de Ciências e Tecnologia. Universidade de Coimbra.

TRB (2010) **Highway Capacity Manual**, Volumen 3: Interrupted Flow, Capítulo 8: Roundabouts. Transportation Research Board, Estados Unidos.

Trueblood, M. e Dale, J. (2003) Simulating Roundabouts With VISSIM. **2nd Urban Street Symposium**. 28-30 Julho 2003, Anaheim, California.