

## SIMULAÇÃO E GEOMETRIA DE ROTATÓRIAS

**Sandro Rodrigues**

Programa de Pós-Graduação de Métodos Numéricos em Engenharia - UFPR\*  
sandrordrigues23@gmail.com

**Liliana Madalena Gramani**

Departamento de Matemática, UFPR\*  
l.gramani@gmail.com, gramani@ufpr.br

**Eloy Kaviski**

Departamento de Hidráulica e Saneamento, UFPR\*  
eloy.dhs@ufpr.br

**Fábio André Negri Balbo**

Programa de Pós-Graduação de Métodos Numéricos em Engenharia - UFPR\*  
andrebalbo@gmail.com

\*Centro Politécnico, Jardim das Américas, CEP 81531-990 - Curitiba - Paraná.

### RESUMO

Neste trabalho apresenta-se um estudo na rotatória que se localiza no trevo Cataratas (Cascavel-Pr), buscando relacionar os congestionamentos com a geometria da rotatória, tais como o número de entradas e saídas, tamanho das pistas entre outras. O modelo utilizado baseia-se no modelo da onda cinética, o qual é um modelo hidrodinâmico, na escala macroscópica. Para a resolução do modelo utilizou-se simulação computacional, sendo que para cálculo da densidade, fluxo e velocidade foi aplicado aproximações por diferenças finitas. Durante as simulações, dois casos foram considerados, um inicialmente com a pista sem veículos e outra com a rotatória contendo veículos. Como resultado verificou-se, que as posições que apresentaram maiores problemas foram, a entradas da rotatória BR-277 sentido Foz do Iguaçu-Curitiba-Pr e o ponto onde encontra-se entradas de veículos da BR 277, BR 369 e PR 163 sentido Curitiba-Cascavel-Pr e que o dimensionamento das saídas pode ser o principal responsável pelos congestionamentos.

**PALAVRAS-CHAVE:** Simulação, Escala Macroscópica, Rotatória.

SIM - Simulação.

### ABSTRACT

In this work presented a study on the roundabout which is located in clover Cataratas (Cascavel-Pr), seeking to relate the congestion with the geometric of the roundabout as the number of entrances, exits, size among other clues. The model is based on the kinetic model of the wave, which is a hydrodynamic model, on a macroscopic scale. To solve the model we used computer simulation, and for calculation of density and flow rate was applied finite difference approximations. During the simulations, two cases were considered, initially with a runway without vehicles and other vehicles with rotary containing. As a result it was found that the positions that had major problems were the entrances to the roundabout towards Foz do Iguaçu-Curitiba-Pr point where you will find entries of vehicles in BR 277, BR 369 and PR 163 towards Curitiba-Cascavel-Pr and the scaling of the outputs can be primarily responsible for congestion.

**KEY-WORDS:** Simulation, Macroscopic Scale, Roundabout.

SIM - Simulation.

## 1 Introdução

No decorrer dos últimos anos, pode-se notar um significativo aumento no tráfego de veículos nas rodovias. Isso faz com que sejam realizados vários estudos para o dimensionamento adequado da malha de trânsito, os quais são fundamentais para se garantir uma boa fluidez e coerência nas rodovias. As soluções adotadas para as interseções têm grande importância no projeto de uma estrada, pois podem intervir na segurança e capacidade de tráfego, uma vez que estas obras apresentam custos significativos quando comparado ao custo total da estrada (Pimenta, 2001). Com isso, os trechos de interseção são os que se destacam como sendo os mais críticos com relação à segurança, aspectos ambientais e de performance operacional (Montalvão, 2010).

Muitos métodos podem ser encontrados na literatura, os quais nos permitem a avaliação do desempenho de uma rotatória (capacidade, níveis de serviço, etc). Os modelos para análise de rotatória geralmente são divididos em duas categorias: os modelos estatísticos, que são modelos baseados em regressão dos dados coletados Silva (2004), DNIT (2008), e os modelos analíticos ou semi-probabilísticos que são modelos baseados na teoria Gallelli (2008) e Ming (2008).

Cada técnica considera alguns aspectos da rotatória em comparação a outras (elementos geométricos, o fluxo de veículos e parâmetros comportamentais). Os resultados obtidos muitas vezes não são comparáveis entre si devido a peculiaridades próprias de cada método, para Gallelli (2008) a melhor maneira de resolver este problema é usando um *software* de simulação refinada de circulação de veículos.

Os modelos clássicos de redes de sistema de transportes são considerados estáticos, por esta razão esses modelos não permitem uma simulação correta das redes viárias urbanas muito congestionadas. Por isso vários engenheiros de tráfego vem estudando modelos dentro de cada dia, sendo necessária a utilização de avanço da variável tempo (modelos contínuos) (Garavello, 2006).

Neste trabalho, a rotatória estudada está localizada na BR-277, no município de Cascavel, estado do Paraná, Brasil. A escolha se deve ao intenso tráfego de veículos, que tem causado congestionamentos e um grande número de acidentes (Balbo, 2011).

Foram realizadas simulações considerando-se apenas a rotatória localizada no trevo Cataratas, sendo uma simulação para pista livre e outra para a pista contendo veículos, para analisar as condições de fluxo de veículos. Para cada simulação utiliza-se dois modelos os quais são comparados com modelos conhecidos na literatura.

Após a simulação são apresentados os diagramas velocidade-densidade, diagrama fundamental (fluxo-densidade) e densidade-espaco, que podem ser utilizados para realizar possíveis mudanças na geometria da rotatória.

## 2 Teoria do Fluxo de Tráfego de Veículos

Uma das vantagens do uso da simulação na teoria do fluxo de tráfego de veículos é a possibilidade de análise de cenários diversos, algo difícil de ser realizado em condições reais. Esta vantagem permite a análise em um ambiente controlado de um conjunto de configurações geométricas e de diversos níveis de tráfego, permitindo-lhes escolher as melhores soluções para cada caso concreto (Ferreira, 2010).

O estudo da teoria do fluxo de tráfego teve início na década de trinta com o cientista Bruce Greenshields, na tentativa de relacionar as grandezas de fluxo, densidade e velocidade, mais tarde James Lighthill e Gerald Whitham em 1950, especialistas em Dinâmica dos Fluidos, (e independentemente por Richards) pensavam que as equações que descrevem o fluxo de água

também poderiam descrever o escoamento do tráfego de automóveis. Essas são equações da Dinâmica dos Fluidos um conjunto de equações diferenciais parciais conhecidas como de Navier-Stokes, que expressam a conservação de massa e quantidade de movimento.

## 2.1 Escalas de representação para fluxo de tráfego de veículos

O fenômeno do fluxo de tráfego, como todos os sistemas reais no mundo, pode ser observado e representado por diferentes escalas, entre elas: microscópica, macroscópica, e mesoscópica ou cinética Gramani (2010). Cada uma destas escalas apresenta uma estrutura matemática própria, que será apresentada a seguir:

Neste trabalho, foi utilizado apenas a escala de representação macroscópica que será detalhada na seção (2.2). Mais detalhes podem ser encontrados em Kerner (2004) e Prigogine (1971).

### 2.1.1 Escala Microscópica

Para a modelagem microscópica todos os veículos são identificados individualmente. Neste caso a posição e a velocidade de cada veículo definem o estado do sistema como variáveis dependentes do tempo. Os modelos matemáticos referentes a esta escala, são representados pelas equações da mecânica newtoniana, ou seja equações diferenciais da dinâmica que descrevem sua evolução geralmente por sistemas de equações diferenciais ordinárias (EDO). A solução do sistema de EDO providencia a descrição das condições de fluxo na estrada.

### 2.1.2 Escala Macroscópica

A modelagem macroscópica descarta a escala microscópica do tráfego em termos das velocidades individuais dos veículos ou as componentes individuais do sistema (tais como as ligações ou os cruzamentos), adotando uma visão macroscópica do tráfego em uma rede. Nesta escala o estado do sistema é descrito por quantidades médias localmente calculadas, nominalmente a densidade, o momento linear e a energia cinética dos veículos, consideradas como variáveis dependentes do tempo e do espaço. Os modelos matemáticos referentes a esta escala são baseados na teoria hidrodinâmica de fluidos e assumem um fluxo contínuo de veículos. As equações de conservação e modelos fenomenológicos são utilizadas, descrevendo a evolução das variáveis, densidade, momento linear e energia, por sistemas de equações diferenciais parciais. Considerando a dificuldade em se modelar a energia por uma descrição macroscópica os modelos são limitados geralmente às primeiras duas quantidades, a equação de evolução da densidade de veículos e velocidade como variáveis observáveis do fluxo de veículos.

### 2.1.3 Escala Mesoscópica ou Cinética

Na modelagem mesoscópica o estado do sistema é ainda identificado pela posição e pela velocidade dos veículos, entretanto esta identificação não refere-se a cada veículo, mas a uma distribuição apropriada de probabilidade sobre o estado microscópico considerado como uma variável aleatória. Os modelos matemáticos referentes a esta escala descrevem a evolução da função de distribuição por equações íntegro-diferenciais com a estrutura similar à equação de Boltzmann.

Os modelos matemáticos aplicados na teoria cinética foram desenvolvidos, a partir dos livros pioneiros de Prigogine (1971), para o modelo de fluxo de tráfego veicular sobre estradas e redes de estradas.

## 2.2 Modelos Hidrodinâmicas de Tráfego

Para descrição do comportamento de tráfego em altas densidades, pode-se associar a teoria macroscópica do tráfego com a teoria hidrodinâmica. Comumente consideram-se três leis de conservação da dinâmica dos fluidos: a lei da conservação de massa, do movimento e de invariantes na colisão. Levando-se em consideração os modelos do fluxo de tráfego de veículos, as equações de conservação de massa deve ser fechadas com uma relação fenomenológica que une a velocidade média com a densidade e condições de contorno adequadas.

### 2.2.1 Modelos Hidrodinâmicos de Primeira Ordem

Os modelos hidrodinâmicos de primeira ordem são obtidos considerando-se apenas a lei da conservação de massa. Esse tipo de modelo é motivado pela sua simplicidade, mesmo apresentando resultados não muito precisos quando comparados com a realidade física ou quando comparados com resultados dos modelos de segunda ordem Gramani (2010).

A equação diferencial para esse modelo é representada por duas variáveis, a densidade ( $\rho$ ) e a velocidade ( $u$ ), como função do tempo e do espaço, sendo fechada com uma relação matemática fenomenológica adicional, a qual representa a velocidade média como função da densidade. Diferentes alternativas para essas relações, resultam em diferentes modelos macroscópicos de primeira ordem.

O problema do fechamento da equação da conservação de massa consiste em analisar e interpretar fenomenologicamente o comportamento do sistema. Para Gramani (2010), o fechamento destas equações, referindo-se aos modelos de primeira ordem, podem ser desenvolvidos através dos seguintes procedimentos:

- I. Fechamento por propriedades da densidade local, a equação analítica:

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} = 0, \\ u = u[\rho], \end{cases} \quad (1)$$

ou

- II. Fechamento usando a equação da evolução para a velocidade, uma equação dinâmica para a evolução de  $u$ , a equação funcional:

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} = 0, \\ \frac{\partial u}{\partial t} = f(u[\rho]), \end{cases} \quad (2)$$

Neste trabalho é utilizado um modelo hidrodinâmico de primeira ordem, ele é fechado utilizando o procedimento da equação (1), isto é, utiliza-se funções que relacionam a velocidade e a densidade.

### 2.2.2 Modelos Hidrodinâmicos de Segunda Ordem

Os modelos hidrodinâmicos de segunda ordem são formados por duas equações da conservação com base na analogia com a Dinâmica de Fluidos unidimensional.

Considera-se o sistema de equações:

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} = 0, \\ \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} = Q[\rho, u], \end{cases} \quad (3)$$

A primeira equação representa a conservação de massa e a segunda equação representa a conservação do momento linear (de equilíbrio). Ao trabalhar com esses modelos encontra-se dificuldade em modelar a aceleração  $Q$  que fecha a equação do momento por modelos fenomenológicos que descrevem a aceleração.

Introduzindo um modelo com uma equação de aceleração que inclui um termo de relaxamento da velocidade ( $u$ ) em um determinado período de tempo  $t$  para a velocidade de equilíbrio  $u_e(\rho)$ , Payne (1979) foi o primeiro matemático a utilizar o sistema (1) sugerindo uma ordem superior para relações de estrutura de choque. Representa-se o modelo da seguinte forma:

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} = 0, \\ \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} = -\frac{c_1}{\rho t} |u'_e(\rho)| \frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{c_2}{t} (u_e(\rho) - u), \end{cases} \quad (4)$$

Algumas modificações técnicas foram propostas por Phillips (1979), no entanto, Hauer (1979) afirma que essas mudanças mostram resultados irrealistas para fortes mudanças de densidade. Para superar essa dificuldade Kuhne (1984) introduziu o termo de viscosidade, o qual é semelhante ao termo que descreve a viscosidade nas equações da hidrodinâmica clássica. Um estudo mais detalhado pode ser encontrado em Bonzani (2009).

### 3 Materiais e Métodos

#### 3.1 Modelo da onda Cinemática

O modelo proposto para simular o tráfego da rotatória baseia-se no modelo da onda cinemática Li (1974). Assume-se um modelo analítico, sendo uma relação por partes no qual a velocidade para  $\rho \leq \rho_{crit}$  permanece constante e decai para  $\rho > \rho_{crit}$ , tendendo ao valor de  $v = 0$  para  $\rho = \rho_{max}$ . O modelo possui a seguinte formulação:

$$u(\rho) = \begin{cases} u_0 & \text{se, } 0 \leq \rho \leq \rho_{crit}, \\ \frac{1}{\rho} \left( \frac{u_0 \rho_{crit}}{\rho_{max} - \rho_{crit}} \right) (\rho_{max} - \rho) & \text{se, } \rho_{crit} < \rho \leq \rho_{max}, \end{cases} \quad (5)$$

onde  $u(\rho)$  é a velocidade para cada  $\rho$  com  $0 \leq \rho \leq \rho_{max}$ ,  $u_0$  é a velocidade média da pista,  $\rho_{crit}$  é a densidade crítica e  $\rho_{max}$  é a densidade máxima admitida por metro quadrado.

Ao relacionar o fluxo e a densidade para o modelo, tem-se a seguinte equação:

$$q(\rho) = \begin{cases} \rho u_0 & \text{se, } 0 \leq \rho < \rho_{crit}, \\ \frac{u_0 \rho_{crit}}{\rho_{max} - \rho_{crit}} (\rho_{max} - \rho) & \text{se, } \rho_{crit} \leq \rho \leq \rho_{max}, \end{cases} \quad (6)$$

### 3.2 Exposição do Problema

A solução para o modelo matemático é obtida através de simulação computacional, sendo realizadas no espaço e tempo do domínio.

Resolve-se o seguinte modelo prático, considerando-se apenas a rotatória que se localiza no trevo Cataratas Figura 1, sendo essa rotatória escolhida devido a congestionamentos e o grande número de acidentes Balbo (2011), que ocorrem neste local.

Como considera-se apenas a rotatória localizada no trevo Cataratas, foram realizadas algumas simplificações, resultando no esquema ilustrado na Figura 2.

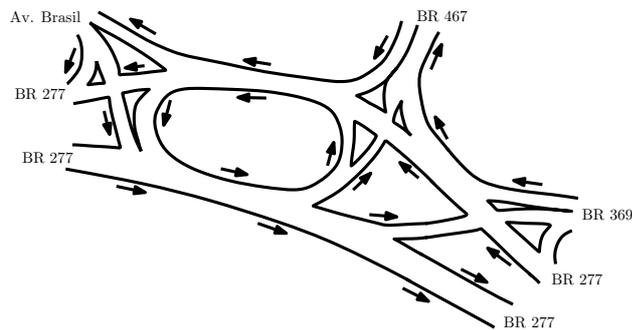


Figura 1: Rotatória localizada no trevo Cataratas (Cascavel - Paraná)

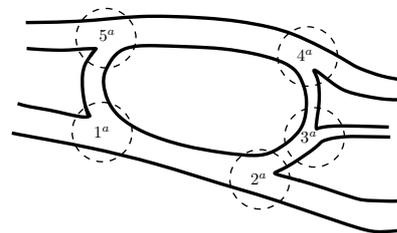


Figura 2: Rotatória simplificada com suas posições de entradas e saídas

Ao discretizar a região, ilustrada na figura 2 considera-se uma pista de comprimento  $L$  metros, como mostrado na figura 3. Para simular a rotatória usa-se condição de contorno periódica, fazendo com que para o próximo intervalo de tempo  $\Delta t$ , a primeira posição  $x_0$  receba o valor da densidade de  $x_n$  na última posição do espaço, no intervalo de tempo anterior.

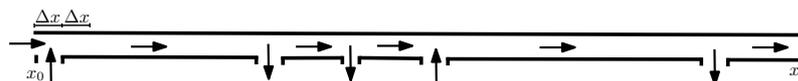


Figura 3: Representação linear da pista da rotatória

Admite-se que a condição de Courant<sup>1</sup>  $\frac{\Delta t}{\Delta x}$  para este modelo vale  $\lambda = 0,1$ , o que fornece  $\Delta t = 0,1\Delta x$ , contudo pode-se trabalhar com valores bem maiores, caso fosse desejado que os resultados computacionais fossem obtidos mais rapidamente.

<sup>1</sup>Problemas que envolvem diferenças finitas explícitas necessitam que seja determinada uma ligação entre o intervalo de discretização no espaço  $\Delta x$  e o intervalo de discretização no tempo  $\Delta t$ , como consequência da condição de estabilidade do esquema. Esta ligação normalmente é chamada de condição de Courant-Friedrichs-Lewy - CFL, Fortuna (2000) que pode ser formulada da seguinte forma

$$\lambda \leq 1,$$

onde  $\lambda$  é o número de Courant.

### 3.3 Modelos Utilizados

O modelo computacional é gerado para um tempo total de uma hora. A pista analisada computacionalmente tem 400 metros de comprimento. Realizou-se duas simulações e para cada simulação foram rodados dois modelos, com valores diferentes para a condição inicial.

Para a primeira simulação, para o primeiro modelo em  $t = 0$  e  $x = 0$  a pista inicia com densidade de 0(zero) veículos/metro, ou seja  $\rho(0, t) = 0$  e  $\rho(x, 0) = 0$ , para o segundo modelo também iniciou-se com 0(zero) veículos/metro, ou seja  $\rho(0, t) = 0$  e  $\rho(x, 0) = 0$ .

Para a segunda simulação em  $t = 0$  e  $x = 0$ , a pista inicia com densidade de 1,4 veículos/metro, ou seja  $\rho(0, t) = 1,4$  e  $\rho(x, 0) = 1,4$ , para o primeiro modelo e com densidade de 0,35 veículos/metro, ou seja  $\rho(0, t) = 0,35$  e  $\rho(x, 0) = 0,3$ , para o segundo modelo. Para ambos os modelos considerou-se os veículos com dimensão de 4 metros de comprimento.

#### 3.3.1 Primeiro modelo

Para o primeiro modelo o comprimento da pista, a velocidade a dimensão do veículo foram divididos em quatro partes. Para uma pista simples tem-se uma densidade de um veículo para cada metro de pista como pode ser observado na figura 4. Após calculadas as aproximações para a densidades os valores são multiplicados por quatro, resgatando os valores reais do comprimento e velocidade.

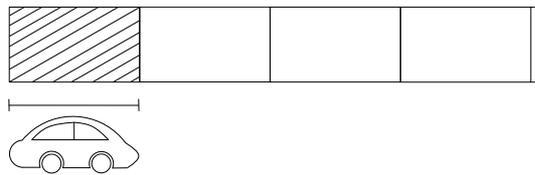


Figura 4: Representação da densidade primeiro modelo

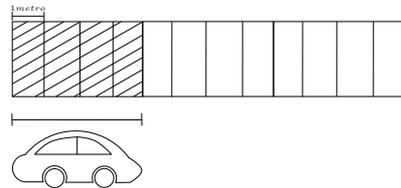


Figura 5: Representação da densidade segundo modelo

### 3.4 Características do Problema

Como trabalha-se com uma pista unidimensional, a pista dupla, tripla é obtida dobrando ou triplicando respectivamente o valor da densidade nesse espaço. Por exemplo, se uma pista simples tem densidade máxima de um veículo por metro, afim de torna-lá uma pista dupla basta aumentar sua densidade máxima para dois veículos por metro.

Para uma primeira análise tem-se que, a partir do instante inicial, os veículos começam a entrar, ou sair em alguns pontos pelas laterais da pista, representado as entradas e saídas de veículos da rotatória, durante um período de 1 hora. Tem-se cinco pontos de entradas e saídas ilustrada na figura 2, os quais ocorrem com uma média de (1350) veículos a cada hora (primeira entrada), (-1080) veículos a cada hora, o sinal “ - ” representa que estão saindo veículos da

rotatória (segunda entrada), (-216) veículos a cada hora (terceira entrada), (810) veículos a cada hora (quarta entrada) e (-860) veículos a cada hora (quinta entrada).

Estes dados de entrada e saída, foram fornecidos pela concessionária de pedágio Ecocataratas para o dia 12/05/08 no período das 6:30 às 19:30 horas. Foi escolhido o período com o maior fluxo de veículos, sendo o qual apresenta maiores problemas com congestionamentos. O período está entre 07h30min às 08h30min.

O programa foi feito em linguagem Fortran. Usa-se a discretização da equação  $\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = f(t, x, \rho)$ , através de diferenças finitas explícitas para se calcular as densidades. A função  $f(t, x, \rho)$  nos permite adicionar ou retirar veículos da pista. Ela é dada em número de veículos que entram (ou saem caso possua sinal negativo) na posição  $x$  da pista em um de um determinado instante de tempo. O cálculo para essa função pode ser observado no diagrama da figura 6.

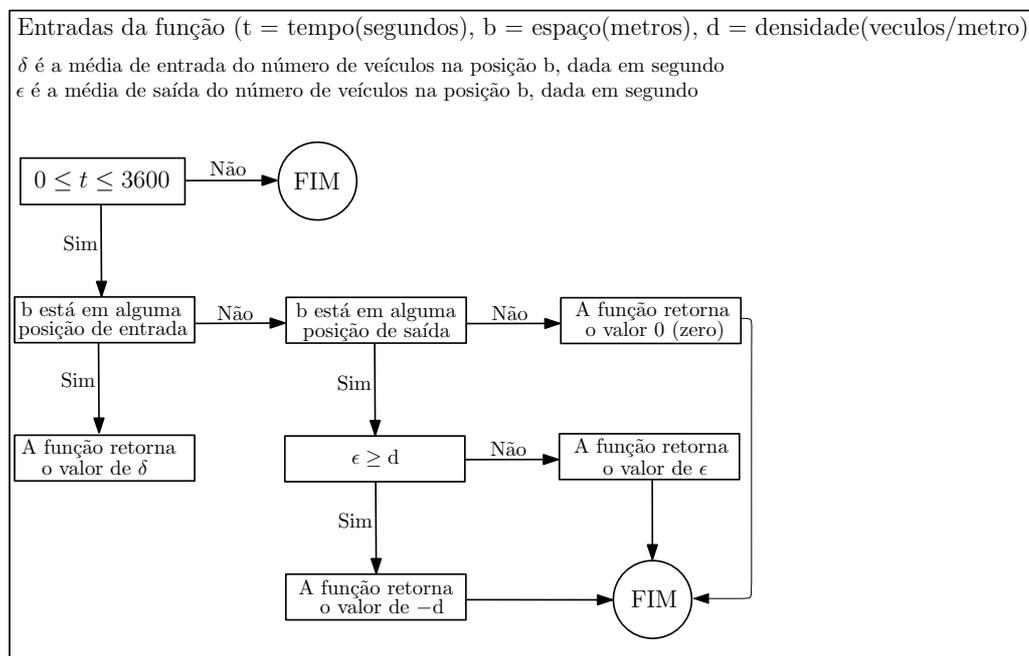


Figura 6: Fluxograma de  $f(t, x, \rho)$

Após calculado o valor da densidade para os intervalos de tempo  $\Delta x$  e  $\Delta t$  obtém-se os resultados expostos no capítulo seguinte.

## 4 Resultados e Conclusões

### 4.1 Primeira Simulação

Para a primeira simulação, com pista inicialmente livre, ou seja  $\rho(0, t) = 0$  e  $\rho(x, 0) = 0$ , os dois modelos não apresentaram problemas de congestionamentos na rotatória para o tempo de simulação.

## 4.2 Segunda Simulação

A segunda simulação para  $t = 0$  e  $x = 0$ , a pista inicia com densidade de 1.4 veículos/metro, ou seja  $\rho(0, t) = 1.4$  e  $\rho(x, 0) = 1.4$ , para o primeiro modelo e com densidade de 0.3 veículos/metro, ou seja  $\rho(0, t) = 0.35$  e  $\rho(x, 0) = 0.35$ , para o segundo modelo. Esses valores para a densidade, foram escolhidos devido o sistema começar a apresentar problemas de congestionamentos para  $\rho > 1.2$  veículos/metro para o primeiro modelo e  $\rho > 0.3$  veículos/metro para o segundo.

## 4.3 Primeiro Modelo

Os resultados para o primeiro modelo, como seus gráficos da densidade-velocidade e diagrama fundamental são apresentados a seguir nas figuras 7 e 8.

Pode ser observado na figura 7 que a velocidade permanece constante até chegar a densidade critica ( $\rho_{crit}$ ), a partir desse ponto a velocidade começa a cair, com isso a pista começa a congestionar.

Observa-se que a velocidade não chega a zero, isso acontece, pois para uma densidade maior que 1,9 ainda há movimento, mesmo sendo pequeno ele existe. O gráfico do diagrama fundamental pode ser observado na figura 8.

Nota-se, na figura 8, que o fluxo aumenta até chegar a densidade máxima e logo após começa a cair. O fluxo não chega a zero para densidades maiores que 1,9 pois sempre existe movimento, ainda que pequeno.

As figuras 7 e 8, mostram que para esse modelo o sistema apresenta congestionamentos, porém, apenas com esse dois diagramas não se sabe que posição da pista está congestionada. Para observar qual a posição apresenta problemas, constrói-se o gráfico de densidade-espaco representado na figura 9.

Observando o gráfico da densidade-espaco, nota-se que os pontos que apresentam problemas estão na posição 0(zero) metro, 130 metros e 210 metros. Essas posições correspondem a 1ª, 2ª e 4ª entradas conforme figura 2.

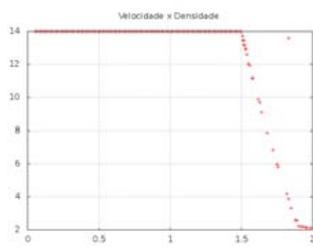


Figura 7: Velocidade-densidade

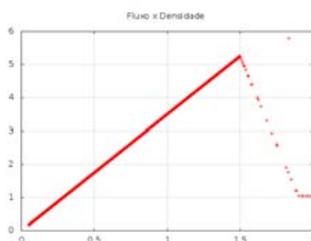


Figura 8: Fluxo-densidade

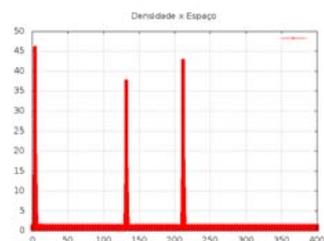


Figura 9: Densidade-espaco

Analisando o gráfico de densidade-espaco, observa-se os postos com maiores problemas e a partir dele pode-se indicar mudanças na geometria da rotatória. Deve-se salientar que mudanças na geometria da rotatória são responsabilidade dos arquitetos ou engenheiros de tráfego, sendo o modelo de simulação uma ferramenta que os auxilia para tomadas de decisão.

A primeira sugestão de mudança na geometria da rotatória está na 3ª entrada figura 2. Essa mudança faz com que a saída que era uma pista simples passe a ser uma pista dupla.

Após a modificação, e uma nova simulação com os mesmos dados de entrada capítulo (3.3), obtém-se o resultado indicado pelas figuras 10 e 11.

Observando o diagrama fundamental e o diagrama densidade-velocidade nota-se que a pista ainda continua congestionada, porém, ao analisar a gráfico densidade-espaço figura 12 notou-se uma melhora, pois agora apenas dois pontos apresentam problemas.

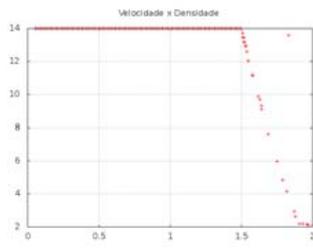


Figura 10: Velocidade-densidade

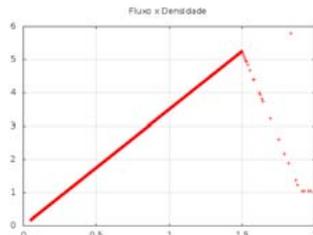


Figura 11: Fluxo-densidade

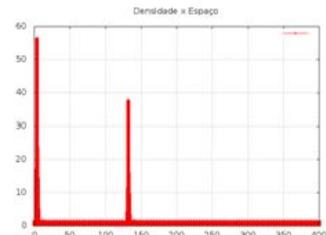


Figura 12: Densidade-espaço

Os pontos onde se encontram problemas estão na posição 0(zero) metro e 130 metros. Essas posições correspondem a 1ª e 2ª entradas, figura 2.

Como o problema se encontra apenas na parte inferior da rotatória a próxima mudança foi de passar toda a pista inferior de duas pistas para três pistas. Rodando novamente para os mesmos dados de entrada obtém-se os seguintes diagramas figuras 13 e 14.

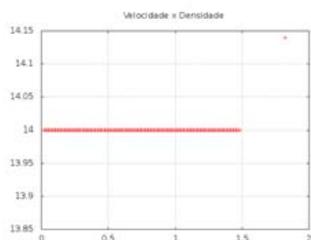


Figura 13: Diagrama velocidade-densidade

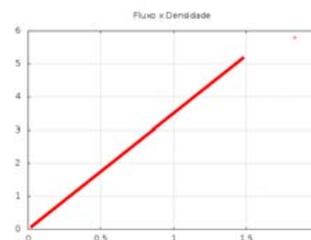


Figura 14: Diagrama fluxo-densidade

Nota-se no diagrama velocidade-densidade que a velocidade dos veículos permanece constante para toda a simulação. No diagrama fluxo-densidade, os dados estão apenas na região fluxo livre, significando com essas mudanças, para esse modelo de rotatória (Figura 2) e para os dados de entrada do capítulo (3), que a rotatória trabalha sem problemas de congestionamentos.

#### 4.4 Segundo Modelo

Os resultados para o segundo modelo, como seus gráficos da densidade-velocidade e diagrama fundamental são apresentados nas figuras 15 e 16. Os valores para a velocidade, densidade e fluxo para o segundo modelo assemelha-se aos resultados encontrados para o primeiro modelo.

O gráfico densidade-espaço figura 17, difere do gráfico do primeiro modelo figura 9. Observando o gráfico da densidade-espaço, notamos que os pontos onde se encontram problemas estão na posição 0(zero) metro, 210 metros e 330 metros. Essas posições correspondem a 1ª, 4ª e 5ª entradas, Figura 2.

Observou-se na figura 17 que a densidade aumenta rapidamente, isso ocorre pois trabalha-se com valores pequenos para a densidade, para esse modelo  $\rho_{max} = 0,5$ . Devido a esse motivo determinam-se resultados distantes do que ocorre fisicamente.

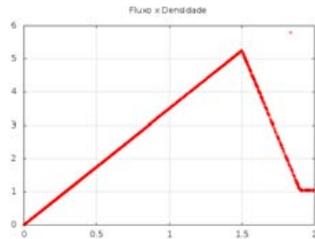


Figura 15: Fluxo-densidade

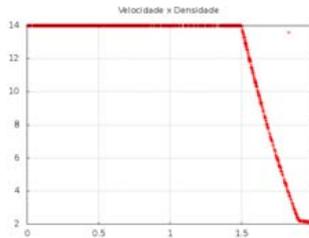


Figura 16: Velocidade-densidade

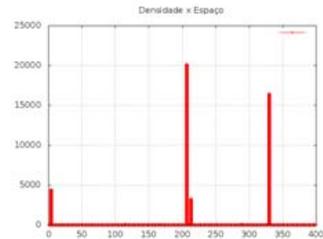


Figura 17: Densidade-espaco

Por apresentar resultados distantes do que ocorre fisicamente optou-se por aplicar apenas o primeiro modelo para simulação da rotatória.

As posições que mais apresentaram problemas foram a posição 0 (zero), uma das entradas da rotatória BR-277 sentido Foz do Iguaçu-Curitiba-Pr e a posição 210, outra entrada da rotatória, porém com entradas de veículos da BR 277, BR 369 e PR 163 sentido Curitiba-Cascavel-Pr.

Um outro detalhe que se pode observar é que trabalhando-se com densidades baixas, tem-se problemas ao calcular a densidade e fluxo, pois ao realizar-se cálculos com divisões com valores muito pequenos, o resultado tende para valores grandes fazendo com isso que se tenha valores distantes da realidade. Entretanto, para o modelo com densidade da pista 1,4 os resultados mostraram que o modelo se comportou de maneira adequada, respeitando as características de velocidade e densidade, dentro do cenário proposto.

Recomenda-se a partir desses resultados, verificar se existem problemas de planejamento nesses pontos e propor mudanças para minimizar esses congestionamentos.

## Referências

- Balbo, F. A. N.** Análise Multivariada Aplicada aos Acidentes da BR-277 Entre Janeiro de 2007 e Novembro de 2009. Dissertação de mestrado, UFPR, 2011.
- Bonzani, I. and Gramani, C.L.M.** Critical analysis and perspectives on the hydrodynamic approach for the mathematical theory of vehicular traffic. *Mathematical and Computer Modelling*, 526-541, 2009.
- DNIT, Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transportes and UFSC, Universidade Federal de Santa Catarina,** Análise e tratamento estatístico dos resultados de contagens de tráfego. [http://www.dnit.gov.br/rodovias/operacoes-rodoviaras/convenios-com-a-ufsc/convenio-00562007-p1-f3-produto-5.pdf/at\\_download/file](http://www.dnit.gov.br/rodovias/operacoes-rodoviaras/convenios-com-a-ufsc/convenio-00562007-p1-f3-produto-5.pdf/at_download/file) [Online; acesso em 14-Dezembro-2011]
- Ferreira, G. B., et al** O Desempenho de Rotundas analisado através da microsimulação - Um caso de estudo. *Pluris*, 1-8, 2010.

- Fortuna, A. O.** Técnicas Computacionais para Dinâmica dos Flúidos: Conceitos Básicos e Aplicações. *edusp*, 2000.
- Gallelli, V. and Vaina, R.** Roundabout Intersections Evaluation of Geometric and Behavioural Features With Vissim. *National Roundabout Conference*, 1-19, 2008.
- Garavello, M. and Picolli, B.** Traffic flow on networks. *American Institute of Mathematical Sciences*, 2006.
- Gramani, L. M.** Descrições microscópica, macroscópica e cinética do fluxo de tráfego veicular Notas em Matemática Aplicada, 89, SBMAC, 2010.
- Hauer, E. and Hurdle, V. F.** Discussion of the freeway traffic model Freflo. *Transpn. Res. Rec.*,75 -77, 1979.
- Kerner, B. S.** The Physics of Traffic. *Springer*, 2004.
- Kuhne, R.D.** Macroscopic freeway model for dense traffic. *N. Vollmuller, (Ed.), 9th Int. Symp. on Transportation and Traffic Theory*, 21-42, 1984.
- Li, R.-M.** Mathematical Modeling of Response From Small Watershed. Tese de doutorado, Colorado State University, 1974.
- Ming, S. H.** Oportunidades de Conflito de Tráfego: Modelos de Previsão. Dissertação de mestrado, USP, 2008.
- Montalvão, E. H. R.** Simulação de uma Rotatória: Análise Crítica e Desempenho. *XLII SBPO - Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional*,1-10, 2010.
- Payne, H. J.** FREFLO: A Macroscopic Simulation Model of Freeway Traffic. *Transportation Research Record*,68-78, 1979.
- Phillips, W. F.** A kinetic model for traffic flow with continuum implications. *Transportation Planning and Technology*,131-138, 1979.
- Pimenta, C. R. T. and Oliveira, M. P.** Introdução ao Projeto Geométrico de Interseções Rodoviárias. <http://www.dec.uem.br/site.del/images/users/76/projeto-geometrico-de-vias/proj11-intersecao-rodoviaria.pdf> [Online; acesso em 14-Dezembro-2011]
- Prigogine, I. and Herman, R.** Kinetic Theory of Vehicular Traffic. *American Elsevier Pub. Co.*, 1971.
- Silva, A. M. B. e Seco, A. J. M.** Dimensionamento de Rotundas. [http://w3.ualg.pt/mgameiro/Aulas\\_2006\\_2007/transportes/rotundas\\_0420prof.Alvaro20Seco.pdf](http://w3.ualg.pt/mgameiro/Aulas_2006_2007/transportes/rotundas_0420prof.Alvaro20Seco.pdf) [Online; acesso em 14-Dezembro-2011]