

Campus de São Carlos

COMPARAÇÃO DO DESEMPENHO DE DISPOSITIVOS

DE INTERSEÇÕES RODOVIÁRIAS EM NÍVEL

UTILIZANDO O SIMULADOR INTEGRATION

GISELI APARECIDA ORTOLANI

ORIENTADOR: PROF. TITULAR ANTONIO CLÓVIS PINTO FERRAZ

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO



ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

Departamento de Transportes Área de Pós-graduação em Transportes

COMPARAÇÃO DO DESEMPENHO DE DISPOSITIVOS DE INTERSEÇÕES RODOVIÁRIAS EM NÍVEL UTILIZANDO O SIMULADOR INTEGRATION

Særeso de Pós-Gradução EESC/USP EXEMPLAR REVISADO . Data de entrada no Serviço: 17/10/03 Ass: hozareth

Giseli Aparecida Ortolani

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

DEDALUS - Acervo - EESC

ORIENTADOR: Prof. Dr. Antonio Clóvis Pinto Ferraz



São Carlos 2003

Class. TEF-EEC (utt. 4034 Tombo + 1013 | 04 Sysno 1357317

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento da Informação do Serviço de Biblioteca — EESC/USP

078c

Ortolani, Giseli Aparecida

Comparação do desempenho de dispositivos de interseções rodoviárias em nível utilizando o simulador integration / Giseli Aparecida Ortolani. -- São Carlos, 2003.

Dissertação (Mestrado) -- Escola de Engenharia de São Carlos-Universidade de São Paulo, 2003.

Área: Transportes.

Orientador: Prof. Dr. Antonio Clóvis Pinto Ferraz.

1. Dispositivos de interseções rodoviárias em nível. 2. Desempenho. 3. Nível de serviço. 4. Capacidade. 5. Simulador *integration*. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidata: Engenheiro GISELI APARECIDA ORTOLANI

Dissertação defendida e julgada em 21-08-2003 perante a Comissão Julgadora:

1 D	MAN UND
Prof. Tit. ANTONIO CLÓVIS PINTO FERRAZ (Orientador)	
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)	

Prof. Tit. JOÃO ALEXANDRE WIDMER (Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

Midma

Prof. Dr. CARLOS FELIPE GRANGEIRO LOUREIRO

(Universidade Federal do Ceará/UFC)

Prof. Assoc. JOSÉ REYNALDO ANSELMO SETTI Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes

Profa. Assoc. MARIA DO CARMO CALIJURI Presidente da Comissão de Pós-Graduação da EESC

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a minha mãe, Ilda e a minha irmã Márcia, que me deram toda a base para que eu pudesse viver e superar todos os obstáculos.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por abençoar tudo o que tenho recebido e iluminar meu caminho.

Ao Prof. Antonio Clóvis Pinto Ferraz pela orientação, incentivo e participação no desenvolvimento deste trabalho

Ao Eng. Fábio Quintela Fortes, pela experiência, sugestões e conselhos concedidos durante todo trabalho.

À FIPAI e ao DER-SP pela concessão da bolsa de estudo e auxílio pesquisa indispensáveis para realização desta pesquisa.

A todos os professores e alunos do Departamento de Transportes da EESC/USP, pelo convívio positivo durante a permanência nesta célebre instituição de ensino e pesquisa.

Aos professores Sandra Oda e Sérgio Henrique Demarchi, pelo incentivo para a realização deste mestrado.

Aos funcionários do Departamento de Transportes da EESC/USP, em especial: Beth, Carlos, Heloísa, Lílian e Magaly.

A todos os amigos pelo companheirismo e colaboração para a realização deste trabalho, em especial: Adriane, Andrea Helena, Bárbara, Cláudio, Cira, Fernanda, Giovane, Giselle, João Mota, Karênina, Marcela e Magaly.

Aos meus grandes amigos Lia e Roger pela amizade, incentivo, e companheirismo durante todos estes anos de ótima convivência.

A todos meus familiares que mesmo distante sempre me incentivaram e apoiaram.

Ao meu grande amor, Rossine, pela paciência, companheirismo, cumplicidade, afeto, em todos os momentos desse tempo juntos.

"Posso todas as coisas Naquele que me fortalece".

Filipenses 4,13

SUMÁRIO

RESUMO	viii
ABSTRACT	ix
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Considerações iniciais	1
1.2. Objetivos do trabalho	3
1.3. Estrutura do trabalho	4
2. OPERAÇÃO EM CRUZAMENTOS NÃO SEMAFORIZADOS	6
2.1. Considerações iniciais	6
2.2. Controle do tráfego nos cruzamentos não semaforizados	6
2.2.1 Cruzamento sem sinalização	6
2.2.2 Cruzamento com sinal de parada obrigatória ou dê a	
preferência	7
2.2.3. Cruzamento com semáforo	8
2.3. Distribuição dos veículos no tráfego	8
2.4. Intervalo aceitável nas travessias com vias preferenciais	9
2.5. Operação nos cruzamentos com via preferencial	12
2.5.1. Operação em cruzamento sem visibilidade	12
2.5.2 Operação em cruzamento com visibilidade	13
2.6. Avaliação dos parâmetros de desempenho de cruzamentos com via preferencial	14
2.6.1. Expressões de Tanner	15

2.6.2 Modelo do HCM – 2000	17
3. PRINCIPAIS TIPOS DE DISPOSITIVOS RODOVIÁRIOS	20
3.1. Considerações iniciais	20
3.2. Características dos principais tipos de rotatórias	21
3.2.1. Semi-rotatória com prioridade para a via principal	21
3.2.2. Rotatória com prioridade para a via principal	21
3.2.3. Rotatória com prioridade para a via circular	22
4. SIMULAÇÃO DO TRÁFEGO	24
4.1. Considerações iniciais	24
4.2 Classificação dos modelos de simulação	25
4.3 Simuladores de Tráfego	26
4.4. Vantagens e desvantagens da simulação	30
4.5. Critério de escolha do simulador	31
4.5.1. Dados de entrada requeridos	32
4.5.2. Resultados disponibilizados	32
4.5.3. Demais aspectos	33
4.6. Modelo escolhido	33
5. PROGRAMA INTEGRATION	35
5.1. Considerações iniciais	35
5.2. Estrutura do programa	35
5.3. Lógicas fundamentais	38
5.3.1. Relação interveicular	39
5.3.2. Mudança de faixa	39
5.3.3. Aceleração em função do desempenho	40
5.3.4. Geração de veículos	41
5.3.5. Escolha de rota	41
5.3.6. Fila	42
5.3.7. Sinalização	43

6. TESTES PRELIMINARES DA LÓGICA DO INTEGRATION	44
6.1. Considerações iniciais	44
6.2. Tempo de simulação	44
6.3. Comprimento mínimo do tramo anterior ao cruzamento	46
6.4. Comparação de valores do atraso em cruzamentos com via	1000
preferencial	49
6.5. Comparação dos valores do atraso para vias de sentido único e	
sentido duplo	50
6.6. Comparação das capacidades	52
7. RESULTADOS OBTIDOS COM O INTEGRATION	55
7.1. Considerações iniciais	55
7.2. Dados de Entrada	56
7.2.1. Características geométricas dos dispositivos	57
7.2.2. Características dos veículos	58
7.2.3. Características do tráfego	59
7.2.4. Características da operação dos veículos nos	
cruzamentos	60
7.2.5. Distribuição dos veículos	60
7.2.6. Cenários analisados	60
7.3. Procedimento para a obtenção dos parâmetros de desempenho	60
7.4. Resultados obtidos	61
7.4.1. Atraso crítico	61
7.4.2. Atraso global	64
8. AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DOS DISPOSITIVOS	68
8.1. Níveis de serviço baseado no atraso crítico	68
8.2. Níveis de serviço baseado no atraso global	71
8.3. Comparação do desempenho dos dispositivos	75
8.3.1. Sob o critério do atraso crítico	75
8 3 2 Sob o critério do atraso global	78

8.4. Análise comparativa do desempenho dos dispositivos	82
8.4.1. Nível de serviço E (capacidade)	82
8.4.2. Nível de serviço C	83
8.4.3 Conclusões	84
9. CONSIDERAÇÕES FINAIS	86
9.1. Sobre o emprego de simuladores de tráfego	86
9.2. Sobre o uso do simulador Integration na simulação de	
dispositivos viários	86
9.3. Sobre a comparação do desempenho dos principais dispositivos	
rodoviários	87
9.4. Sobre novas pesquisas acerca do tema	87
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	89
ANEXOS	93

RESUMO

Ortolani, G. A. (2003). *Comparação do Desempenho de Dispositivos de Interseções Rodoviárias em Nível Utilizando o Simulador Integration.*São Carlos, 2003. 100 p. Dissertação (Mestrado) — Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

O trabalho contém uma avaliação do desempenho operacional do tráfego de veículos em três tipos de dispositivos rodoviários em nível, utilizando como critério a capacidade para os diversos níveis de serviço, incluindo uma análise comparativa do entre eles. A avaliação do desempenho é feita com base nos resultados fornecidos pelo simulador Integration. Os três dispositivos analisados, são: semi-rotatória com prioridade para os veículos da via principal, rotatória com prioridade para os veículos da via principal e rotatória com prioridade para os veículos da via circular. No trabalho também é realizada uma análise de alguns aspectos relevantes da lógica utilizada pelo Integration e de resultados fornecidos pelo simulador em alguns casos particulares simples, através da comparação de valores obtidos variando-se para alguns parâmetros, bem como da comparação com resultados fornecidos por outros modelos de avaliação de desempenho de interseções com sinal de parada obrigatória ou dê a preferência.

Palavras-chave: dispositivos rodoviários em nível, desempenho, nível de serviço, capacidade, simulador Integration.

ABSTRACT

Ortolani, G. A. (2003) Performance comparison of Road intersections at grade using Integration Simulator. São Carlos, 2003. 100p. Dissertation (Máster Degree) — Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

The work contains a performance evaluation of the traffic vehicles in the three types of Road intersections at grade used in Brazil, using as criteria the capacity relatively to the level of service. A comparative analysis of the performance of these intersections is also presented. The performance evaluation is made based on the supplied results by the Integration simulator. The three analyzed intersections, are: semi roundabout with priority for the vehicles of the main road, roundabout with priority for the vehicles the main road and roundabout with priority for the vehicles in the circular road (modern roundabout). In this research an analysis is also accomplished about some important aspects of the Integration logic and of the supplied results by the simulator in some specific cases, through the comparison of obtained values being varied some parameters, as well as the comparison with results supplied by other evaluation models of intersections performance with STOP SIGN and GIVE WAY traffic signs.

Key words: : Road intersections at grade, Performance, Level of service, Capacity, Integration Simulator.

1. INTRODUÇÃO

1.1. Considerações Iniciais

A utilização intensa dos veículos rodoviários (automóveis, peruas, motocicletas, bicicletas, caminhões, ônibus, etc.) ocorre, na atualidade, em praticamente todos os países do mundo.

Em razão dos inúmeros benefícios que os veículos rodoviários trazem à qualidade de vida da população, seria inconcebível, hoje, pensar num mundo sem esses veículos.

Contudo, a utilização massiva dos veículos rodoviários traz uma série de problemas para a sociedade, dentre os quais podem ser destacados: os acidentes de trânsito, os congestionamentos, a poluição, o consumo desordenado de energia, etc.

Em vista disso, há, desde já alguns anos, uma grande preocupação em nível mundial de fazer com que o trânsito de veículos e pedestres seja realizado com o máximo de segurança e fluidez, com o mínimo de poluição e consumo de energia. Isso explica o grande desenvolvimento experimentado pela Engenharia de Tráfego - ramo da Engenharia que trata das questões relacionadas com o trânsito de veículos e pedestres sobre a superfície terrestre.

Um dos principais problemas da Engenharia de Tráfego é proceder à análise comparativa de diferentes características geométricas e operacionais de vias e interseções urbanas e rodoviárias, isoladas ou em conjunto, para

escolher as melhores soluções no atendimento de demandas relacionadas à quantidade e características.

Uma importante ferramenta hoje bastante utilizada nos estudos de trânsito é a simulação, pois proporciona aos engenheiros de transportes condições para avaliar o desempenho do tráfego em um elemento ou num conjunto de elementos (sistema), como, também, muitas vezes, fazer a otimização da operação do sistema.

A simulação permite a análise dos fenômenos sem a intervenção direta no sistema real, sendo possível, dessa forma, simular uma grande diversidade de condições e analisar o impacto de diferentes composições e volumes de tráfego em diferentes configurações geométricas. DEMARCHI (2000).

A utilização dos modelos de simulação vem aumentando devido ao número de soluções que podem ser dadas nos problemas da engenharia de tráfego, pois pode analisar novos projetos que ainda não foram utilizados na prática e avaliar situações já existentes que apresentam problemas, sem que interfiram no funcionamento.

Os simuladores de tráfego são hoje de uso constante pelos engenheiros de tráfego no processo de avaliação de alternativas de operação de uma interseção, de uma via ou de um conjunto de vias e interseções.

Inúmeros simuladores de tráfego já foram desenvolvidos por diferentes pesquisadores em diferentes países. Alguns se prestam à análise de situações específicas, enquanto outros são mais genéricos e permitem o emprego para um número maior de situações. Alguns dos simuladores mais citados na literatura técnica são: NETFLO, NETSIM, FRESIM, CORSIM, DRÁCULA, PARAMICS, KRONOS, KWAVES, CORFLO, FREFLO, FREQ, TEXAS, TRANSYT, INTEGRATION, DYNAMIT, DYNEMO e DYNASMART.

Em particular, o simulador Integration permite analisar diversos cenários de forma global e agregada, e é capaz de representar diversos elementos componentes em uma rede de tráfego, tais como vias expressas,

mudanças de faixas, interseções semaforizadas ou não, trechos de convergência, divergência e fluxo de entrelaçamento, entre outros aspectos. Constitui, assim, uma ferramenta capaz de representar de forma bastante realista todo o sistema. Este simulador foi desenvolvido por Michel Van Aerde, no Canadá, na década de 1980.

Uma característica interessante do Integration é a possibilidade de visualização durante a simulação, possibilitando a identificação dos fenômenos que nele ocorrem, tais como formação de filas e escolha na rota. Essa característica facilita detectar possíveis erros na validação. Além disso, o programa tem uma alta flexibilidade em simular cenários, podendo ser ajustado para qualquer geometria de interseção.

1.2. Objetivos do Trabalho

O objetivo principal da dissertação é avaliar e comparar o desempenho da operação do tráfego de veículos em três tipos de dispositivos rodoviários em nível, sob o ponto de vista do nível de serviço e da capacidade. Para efetuar essa análise é utilizado o simulador Integration.

Os três dispositivos analisados são: semi-rotatória com prioridade para os veículos da via principal (dispositivo vazado), rotatória com prioridade para os veículos da via principal (dispositivo fechado com prioridade para a via principal) e rotatória com prioridade para os veículos da via circular (dispositivo fechado com prioridade para aqueles que estão circulando).

Outros objetivos secundários do trabalho são: estudar e descrever as principais características do simulador Integration; verificar a validade e a consistência dos resultados fornecidos pelo simulador Integration em alguns modelos particulares de interseções simples não semaforizadas, através da comparação entre valores fornecidos pelo simulador e do confronto com resultados obtidos com outros métodos de avaliação do desempenho de cruzamentos não semaforizados; e investigar sobre alguns aspectos relevantes

da lógica utilizada pelo simulador Integration, através da análise do comportamento de resultados fornecidos pelo mesmo.

1.3. Estrutura do Trabalho

O trabalho está dividido em sete capítulos, dentre os quais este capítulo introdutório.

No capítulo 2 são apresentados os fundamentos sobre a operação de cruzamentos não semaforizados e descritos dois métodos para avaliação do desempenho de cruzamentos com parada obrigatória ou dê a preferência: HCM –2000 e Tanner.

No capítulo 3 são apresentados alguns conceitos básicos sobre interseções viárias e descritas as características dos dispositivos estudados no trabalho.

O capítulo 4 contém considerações sobre simulação do tráfego de veículos e comentários sobre alguns dos principais modelos de simulação desenvolvidos.

No capítulo 5 são descritas de forma detalhada as principais características do simulador Integration, bem como comentados alguns aspectos relevantes sobre esse simulador.

No capítulo 6 é verificado (comprovado) a validade e a consistência dos resultados fornecidos pelo simulador Integration em alguns modelos particulares de interseções simples não semaforizadas, através da comparação entre valores fornecidos pelo simulador e do confronto com resultados obtidos com outros métodos de avaliação do desempenho de cruzamentos não semaforizados; e investigado alguns aspectos relevantes da lógica utilizada pelo simulador Integration, através da análise do comportamento de resultados fornecidos pelo mesmo.

No capítulo 7 são apresentados os resultados fornecidos pelo simulador Integration na determinação dos valores do atraso e do tempo parado dos três tipos de dispositivos rodoviários analisados.

No capítulo 8 os resultados obtidos no capítulo 7 são utilizados para a determinação do nível de serviço dos dispositivos estudados. Também é apresentada neste capítulo uma análise comparativa do desempenho desses dispositivos.

No capítulo 9 são feitas algumas considerações finais consideradas relevantes no contexto do trabalho.

No anexo são apresentados os arquivos utilizados para dados de entrada do simulador Integration

2. OPERAÇÃO EM CRUZAMENTOS NÃO SEMAFORIZADOS

2.1. Considerações Iniciais

As interseções são os pontos críticos da rede viária, pois são os locais onde os fluxos se cruzam. Como o movimento dos fluxos que cruzam deve ser feito um de cada vez, estes locais representam os gargalos em termos de capacidade da rede viária. Ademais, como nesses locais há o cruzamento de fluxos conflitantes, eles constituem pontos com grande potencial de ocorrência de acidentes.

Para otimizar a operação dos cruzamentos em termos de segurança e capacidade é necessário implantar algum tipo de controle que ordene os movimentos no tempo e/ou no espaço.

Neste capítulo o termo interseção é empregado como sinônimo de cruzamento.

2.2. Controle do Tráfego nos Cruzamentos

Os principais tipos de controle de tráfego empregado nos cruzamentos viários são discutidos a seguir.

2.2.1. Cruzamento sem sinalização

De acordo com o Código de Trânsito Brasileiro (artigo 26.III): "Quando veículos, transitando por fluxos que se cruzem, se aproximarem de local não sinalizado, terá preferência de passagem: a) no caso de apenas um fluxo ser proveniente de rodovia, aquele que estiver circulando por ela; b) no caso de

rotatória, aquele que estiver circulando por ela; c) nos demais casos, o que vier pela direita do condutor.

Essas regras, infelizmente, são desconhecidas da maioria dos motoristas e acabam gerando confusões e acidentes.

Cruzamentos sem sinalização são comuns em vias com baixo ou médio volume de tráfego, embora, esta seja uma situação injustificável, em razão do pequeno custo de pelo menos uma placa de pare ou dê a preferência.

2.2.2. Cruzamento com sinal de parada obrigatória ou dê a preferência

Os veículos da via preferencial passam sem parar e os da via secundária param (no caso de "pare"), e param ou reduzem a velocidade (no caso do sinal "dê a preferência").

Na Figura 2.1 são mostrados esses dois tipos de sinais, de acordo com o Código Brasileiro de Trânsito.



Figura 2.1 - Placas de parada obrigatória e dê a preferência.

Em muitos países os motoristas efetivamente param nos sinais de parada obrigatória. Em outros, como no Brasil, não: o sinal de "pare" é interpretado e utilizado pelos condutores como um sinal de "dê a preferência".

De acordo com o Código Brasileiro de Trânsito a sinalização vertical de cruzamento com via preferencial é sempre obrigatória. A utilização de sinalização horizontal é facultativa, razão pela qual costuma ser empregada apenas em cruzamentos com problemas de visibilidade, alta freqüência de acidentes, etc., onde se deseja que a sinalização de parada obrigatória tenha um maior impacto visual.

2.2.3. Cruzamento com semáforo

Os semáforos proporcionam alternância do direito de passagem dos veículos no cruzamento através de indicações luminosas (verde, vermelho e amarelo).

Nem sempre, no entanto, toda disciplina na movimentação é feita através de indicações luminosas. Ao contrário, é muito comum se permitir movimentos conflitantes numa mesma indicação luminosa, sendo a disciplina (prioridade) definida por outra regra. Exemplos: passagem em linha reta com prioridade em relação a conversão à esquerda do fluxo oposto estando o sinal verde para ambos, travessia de veículos com prioridade sobre a travessia de pedestres, etc.

2.3. Distribuição dos Veículos no Tráfego

O fluxo de veículos, assim como o de pedestres, pode ser considerado como uma distribuição no espaço, num dado instante, ou como uma distribuição no tempo, num dado ponto. Essas distribuições podem levar, de forma aproximada, vários modelos matemáticos.

No caso de fluxos de veículos e pedestres não intensos e sem perturbações próximas à montante (fatos que ocorrem devido a existência de semáforo, estreitamento de via, forte restrição de ultrapassagens, etc.), a prática tem mostrado a existência de um bom ajustamento entre os intervalos reais de aceitação do veículo para travessia em um cruzamento e aqueles obtidos teoricamente através de uma Distribuição Exponencial Negativa. Se os intervalos de tempo ou espaço são exponencialmente distribuídos, pode-se demonstrar que o número de veículos ou pedestres que passa num ponto em intervalos constantes segue uma Distribuição de Poisson.

Muitas vezes é desejável o uso da distribuição exponencial negativa deslocada, para eliminar os valores menores que uma constante pré-fixada.

Em estudos realizados por Françoso (1990) e Silveira (1992) mostram que no caso de fluxos intensos e/ou com perturbação próxima, o tráfego deixa de ser totalmente aleatório – seguir uma distribuição de Poisson. Nesses casos, outras distribuições estatísticas têm sido propostas para representar o tráfego real, como por exemplo as propostas por Schuhl e por Kell. Em situações onde as restrições de ultrapassagem são severas e/ou existem semáforos próximos à montante, o tráfego se apresenta em pelotões de veículos agrupados. Nesse caso alguns modelos matemáticos mais complexos podem representar melhor a realidade, como, por exemplo, o modelo de Borel, de Tanner, de Miller, etc.

2.4. Intervalo Aceitável nas Travessias com Vias Preferenciais

A travessia dos veículos de uma via não preferencial somente pode ser concretizada quando existe um intervalo de tempo entre a passagem de veículos consecutivos na via preferencial maior que um determinado valor (denominado na literatura técnica em língua inglesa de "gap"). A travessia também pode ser efetivada quando ocorre um intervalo suficiente entre a chegada do veículo da via secundária e a passagem do primeiro veículo na via principal (intervalo denominado em Inglês de "lag").

O "gap", na realidade, compreende o tempo decorrido entre a passagem do pára-choque traseiro do veículo da frente e do pára-choque dianteiro do veículo de trás. O "headway" por sua vez, refere-se ao intervalo entre a passagem dos pára-choques dianteiros. Embora o parâmetro "gap" 'e o que efetivamente importa na travessia, o "headway" é muito mais fácil de ser medido e a diferença entre os dois valores é muito pequena, razão pela qual os modelos sobre travessia de vias preferenciais consideram o parâmetro "headway" e não o "gap". Assim, o termo "gap" é utilizado como sinônimo de "headway".

O intervalo mínimo aceito pelos motoristas para entrar nos cruzamentos também depende de uma série de fatores: tipo de manobra (passagem direta, conversão à direita ou conversão à esquerda), largura da via, visibilidade do local, velocidade dos veículos da via preferencial, tipo de veículo, declividade na

aproximação, habilidade e idade do condutor (tempo de percepção e reação), existência ou não de pressa no momento, tempo que o motorista já está esperando no cruzamento, etc.

Pesquisas realizadas por Ferraz et al. (1999) mostram que mantidas fixas todas as condições que não dependem do motorista, a probabilidade dos motoristas aceitarem intervalos acima de um determinado valor segue aproximadamente a curva referida como real mostrada na Figura 2.1. Na Figura 2.1 também estão representadas as curvas de três dentre várias funções propostas para representar o fenômeno real: função exponencial deslocada (curva 1), função trapezoidal (curva 2) e função degrau (curva 3).

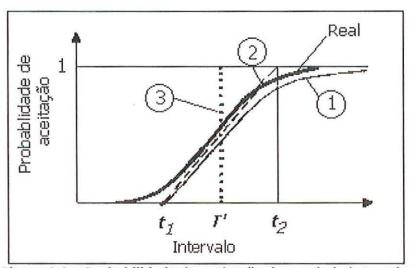


Figura 2.2 - Probabilidade de aceitação de um dado intervalo.

Alguns modelos mais sofisticados para a probabilidade de aceitação de intervalos mínimos levam em conta, inclusive, o tempo que o veículo já está esperando no cruzamento. Embora outras distribuições representem melhor a realidade, a função degrau tem se mostrado bastante satisfatória na modelagem da travessia de pedestres e da operação de veículos em interseções com parada obrigatória.

Quando se trata da função degrau (caso determinístico), é comum denominar-se o valor de "T" de *intervalo crítico*. O intervalo crítico corresponde ao valor médio dos intervalos mínimos aceitos pelos motoristas na travessia.

Ferraz et al. (1999) aponta que o intervalo crítico é determinado a partir de dados reais de duas formas distintas:

1º método: adota-se T correspondente ao ponto em que a probabilidade de aceitar é igual a probabilidade de não aceitar (ambas = 0,50).

2º método: adota-se T como a média ponderada dos intervalos mínimos aceitáveis.

No caso da travessia de veículos, o intervalo crítico varia, normalmente, entre 4 e 7 segundos, dependendo do tipo de manobra.

Teoricamente, o intervalo crítico é aproximadamente igual ao tempo que o veículo leva para atravessar a via, mais uma parcela de segurança. Assim, a seguinte expressão analítica pode ser utilizada para estimar o valor do intervalo crítico:

$$T = \sqrt{\frac{2.(L+C)}{a}} + S \tag{1}$$

Onde, T: intervalo crítico em s, L: largura do trecho de via a ser cruzado em m, C: comprimento do veículo em m (na prática 5 m é um valor razoável), a: aceleração do veículo partindo do repouso em m/s² (2m/s² é um valor razoável para fins práticos) e S: intervalo de segurança em s (1 a 2s é suficiente na prática).

Na tabela 2.1 são transcritos os valores do intervalo crítico recomendados em diversas situações pelas principais publicações da literatura técnica.

esquerda da

principal

HCM (1985)* CAPCAL (1995) **HCM** (2000)Velocidade na via principal (km/h) 48 88 50 70 90 5.7 PARE Conversão à direita 5.5 6.5 6.6 7.5 6.2 da secundária Dê a Preferência 5.0 5.5 5.0 5.9 6.9 7.5 7.6 Passagem direta da PARE 5.8 6.7 6.5 6.0 secundária 7.0 Dê a Preferência 6.5 5.1 6.0 5.6 7.6 PARE 8.0 5.8 6.7 7.1 Conversão à 6.5 esquerda da Dê a Preferência 7.0 7.0 6.0 5.1 6.0 secundária PARE Conversão à 5.0 5.5 4.8 5.7 6.7 4.1

Tabela 2.1: Valores de gaps críticos para vias com duas faixas

5.7

4.8

6.7

2.5. Operação nos Cruzamentos com Via Preferencial

Dê a Preferência

No Brasil, os motoristas utilizam o sinal de "pare" como se fosse um sinal de "dê a preferência". O que realmente diferencia a operação num cruzamento com via preferencial, é a existência ou não de uma distância de visibilidade dos fluxos conflitantes com antecedência à linha de parada.

A seguir são comentadas as formas de operação em cruzamentos sem e com visibilidade.

2.5.1. Operação em cruzamento sem visibilidade antecipada dos fluxos conflitantes

No caso de não haver fila, o veículo para junto ao cruzamento e se o motorista detectar um intervalo seguro até a passagem do primeiro veículo da via preferencial no local a passagem é imediata – utiliza um lag. Caso contrário, o motorista aguarda, somente entrando quando ocorrer um intervalo seguro entre a passagem pelo local de dois veículos consecutivos da via preferencial utiliza um *gap*.

Se já houver veículos esperando para entrar na interseção, o veículo que chega para na parte de trás da fila e vai se movimentando pouco a pouco

^{*} Para valores de velocidades entre a 48 km/h e 88 km/h, o HCM -1985 recomenda fazer interpolação.

junto com os demais, à medida que os primeiros da fila vão passando. Quando for o primeiro, isto é, linha de parada, tudo se passa como no caso em que ele chega sem encontrar fila.

Nos casos em que há formação de fila, após a passagem do veículo à frente o que estava em segundo lugar demora um certo tempo para avançar até o início do cruzamento e, então, tomar a decisão de entrar ou não. O tempo que o condutor do segundo veículo leva para avançar até a posição de atendimento, olhar e tomar a decisão de entrar ou não é denominado de "move-up time" ou "follow-up time" na literatura técnica em língua inglesa. Este intervalo, que na prática varia entre 3 e 5 segundos (4 segundos é o valor utilizado pelo HCM – 2000), corresponde ao intervalo mínimo entre veículos consecutivos em cada faixa da via secundária (headway mínimo).

2.5.2. Operação em cruzamento com visibilidade antecipada dos fluxos conflitantes

Se o motorista do veículo não encontrar fila à frente e não houver nenhum veículo próximo se aproximando na via preferencial, ele prossegue praticamente com a mesma velocidade com que se aproximou e entra na interseção. Se houver algum veículo próximo se aproximando na via preferencial, ele para esperando um intervalo adequado entre veículos da via preferencial para então entrar.

Se encontrar fila à frente ele pára e vai se movimentando pouco a pouco junto com os demais veículos, à medida que os primeiros da fila vão passando. Quando ele for o segundo veículo da fila e o primeiro iniciar a travessia, tudo se passa como se ele estivesse chegando sem fila à frente – sendo neste caso a velocidade menor, pois ele partiu do repouso.

A operação com visibilidade apresenta: uma maior capacidade e um menor atraso.

A maior capacidade deve-se ao fato do intervalo mínimo entre veículos da via secundária entrando na interseção ser significativamente menor em

relação à operação sem visibilidade. No caso da existência de visibilidade, os condutores dos veículos que estão na fila não necessitam se posicionar junto à interseção para, então, olhar e ter condições de tomar a decisão de entrar ou não. Quando o veículo que está à frente iniciou a travessia, os condutores dos veículos que estão atrás próximos, por terem visibilidade, já podem tomar a decisão de entrar, ensejando uma operação com intervalo de aceitação significativamente menores (o intervalo passa de 4 segundos para 2 e 3 segundos).

A maior capacidade e a possibilidade de muitas vezes passar sem parar, fazem com que os valores do atraso e do tempo de espera sejam menores nos cruzamento com visibilidade.

2.6. Avaliação dos Parâmetros de Desempenho de Cruzamentos com Via Preferencial

Diversos parâmetros são utilizados na avaliação do desempenho do tráfego das vias secundárias no cruzamento com vias preferenciais: atraso, tempo parado, capacidade, tamanho da fila, índice de acidentes, emissão de poluentes, consumo de combustível, etc.

Existem diversas formulações analíticas e programas de computador que permitem determinar os valores desses indicadores de desempenho em diferentes condições de operação.

Entre os simuladores de computador podem ser citados: CAPCAL, PICADY 2, MULATM, MICROASSIGMENT, SATURN, BRADFORD, WHIGHT, EVANS, AITKEN, TRANSYT, INTEGRATION, ETC.

No que concerne a avaliação do atraso, tempo parado e capacidade, parâmetros de interesse no escopo deste trabalho, dois métodos são de referência obrigatória: as expressões de Tanner e o modelo do HCM (2000). Ambos são comentados a seguir.

2.6.1. Expressões de Tanner

Tanner, J. C. (1964) foi o primeiro pesquisador a apresentar uma solução teoricamente exata para o problema das interseções com sinalização de parada obrigatória, considerando as seguintes hipóteses:

- a) O fluxo na via secundária é aleatório;
- b) Distribuição do fluxo na via principal similar ao fluxo de saída do posto de serviço de uma fila M/D/1 com tempo mínimo de atendimento entre veículos o que corresponde a considerar o fluxo da via principal poissoniano, respeitando-se, contudo o intervalo crítico mínimo entre veículos (hipótese válida no caso da via preferencial ter uma única faixa, pois, no caso de ter duas ou mais o intervalo crítico mínimo pode ser nulo);
- c) Intervalo mínimo aceitável e tempo de posicionamento constantes.

A expressão obtida por TANNER para o tempo médio de espera é a seguinte:

$$d = \frac{w/2 * y - \lambda y (\mu P e^{-\mu P} + e^{-\mu P} - 1) / \mu}{1 - \lambda y (1 - e^{-\mu P})}$$
(2)

$$z = \frac{e^{\mu(T-h)}}{\mu(1-\mu h)} - \frac{1}{\mu} \tag{3}$$

$$y = z + \frac{1}{\mu} \tag{4}$$

$$w = \frac{2e^{\mu(T-h)}}{\mu^2(1-\mu h)} \left[e^{\mu(T-h)} - \mu T(1-\mu h) - 1 + \mu h - \mu^2 h^2 + \frac{\mu^2 h^2}{2(1-\mu h)} \right]$$
 (5)

Sendo:

d: tempo médio de espera no sistema (s)

 μ : fluxo na via principal (veíc/s);

λ: fluxo na via secundária (veíc/s)

T: intervalo mínimo aceitável (s);

P: tempo de posicionamento (s);

h: headway mínimo na via principal (s)

Tanner também determinou que a capacidade de atendimento dos veículos da via secundária (que ocorre quando *d* tende ao infinito) é dada pela expressão:

$$C = \frac{\mu(1 - \mu h)}{e^{\mu(T - h)}(1 - e^{-\mu P})}$$
 (6)

Sendo,

C: Capacidade da via secundária (veic/s/faixa)

 μ , h, P, T: já definidos anteriormente.

No caso de duas ou mais faixas na via principal, quando o headway mínimo é igual a zero, a expressão de Tanner passa a ser a seguinte;

$$C = \frac{\mu}{e^{\mu T} \left(1 - e^{-\mu P}\right)} \tag{7}$$

2.6.2. Modelo do HCM - 2000

O HCM – 2000 apresenta uma metodologia para analisar a capacidade e o atraso dos veículos no cruzamento com vias preferenciais com parada obrigatória, em que considera as seguintes hipóteses:

 a) Tráfego próximo das interseções não interferem junto a interseção analisada;

- b) Uma faixa separada é fornecida exclusivamente para movimentos na via secundária;
- c) A sinalização antes da interseção não deve afetar a capacidade da via principal.

A expressão apresentada pelo HCM – 2000 para obtenção da capacidade na via é a seguinte:

$$c = v \frac{e^{vt_c/3600}}{1 - e^{-vt_f/3600}} \tag{8}$$

Sendo,

 $c={
m capacidade}$ na via secundária de um determinado movimento (veíc/h)

v = fluxo conflitante de um determinado movimento (veíc/h)

 t_c = intervalo mínimo aceitável (s)

 t_f = tempo de posicionamento (s)

O HCM - 2000 apresenta as curvas mostradas nas Figuras 2.4 e 2.5 expressando a aplicação da equação (7) para a avaliação da capacidade da via secundária nas interseções onde a operação é realizada com parada obrigatória (sinal de "pare").

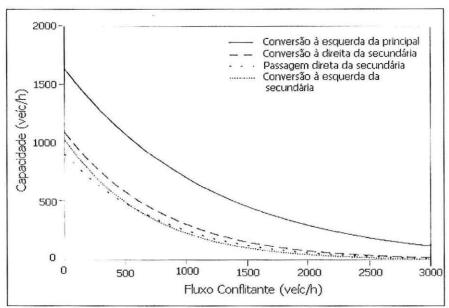


Figura 2.4 – Capacidade para a via principal com duas faixas. Fonte: HCM (2000)

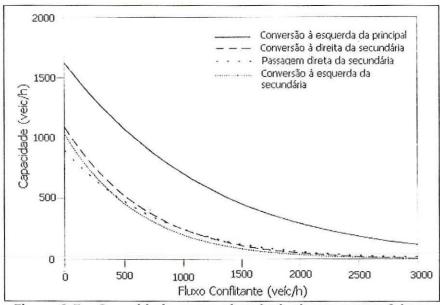


Figura 2.5 – Capacidade para a via principal com quatro faixas.

Fonte: HCM (2000)

Para a avaliação do atraso, o HCM – 2000 apresenta as curvas mostradas na figura 2.6.

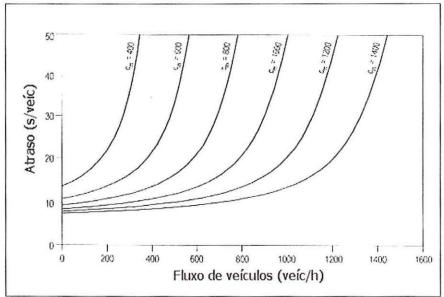


Figura 2.6 - Fluxo médio de veículos por atraso

Em função do valor do atraso dos veículos na via secundária, o HCM -2000 classifica o nível de serviço conforme indicado na tabela 2.3.

O HCM - 2000 tem como conceito de atraso o tempo adicional que o veículo demora para fazer um percurso em situações de fluxo livre. Este conceito será utilizado neste trabalho.

Tabela 2.3 - Nível de Serviço para cruzamentos com vias preferenciais.

Fonte: Highway Capacity Manual - HCM (2000)

Nível de Serviço	Atraso na via secundária (seg/veic)
Α	0 - 10
В	10 - 15
C	15 – 25
D	25 – 35
E	35 - 50
F	>50

3. TIPOS DE DISPOSITIVOS RODOVIÁRIOS

3.1. Considerações Iniciais

A AASHTO (1994) define interseção como uma área comum onde duas ou mais vias se encontram ou cruzam.

Muitas vezes, a interseção é bastante simples: um mero cruzamento entre duas ou mais vias. Outras vezes pode ser mais complexa: um dispositivo viário composto de um conjunto de canalizações e ordenamento de tráfego em nível. Existem ainda interseções mais complexas com canalizações e com os tramos de maior movimento se cruzando em desnível.

O tipo de interseção a ser utilizado depende do volume do tráfego de veículos, da disponibilidade de espaço e da disponibilidade de recursos.

Os três tipos de dispositivos rodoviários em nível tipo rotatória ou semi rotatória empregados no Brasil são: semi-rotatória com prioridade para via principal, rotatória com prioridade para a via principal e rotatória com prioridade para a via circular ou simplesmente rotatória.

A seguir são comentadas as principais características de cada um desses dispositivos.

3.2. Características dos Principais Tipos de Rotatórias

3.2.1. Semi-rotatória com prioridade para a via principal

O dispositivo tipo semi-rotatória com prioridade para via principal é comumente denominada de rotatória vazada. Apresenta fluxos canalizados com ilhas e semicírculos para conversões, como pode ser observado na Figura 3.1.

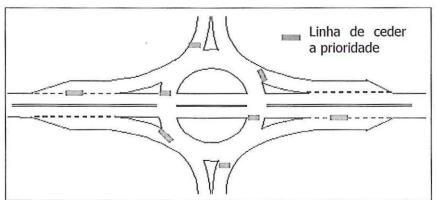


Figura 3.1 – Dispositivo tipo semi-rotatória com prioridade para a via principal.

O fluxo da via principal tem prioridade nos cruzamentos; e as travessias dos veículos da via secundária cruzam os dois fluxos da via principal em ser feitas em uma única etapa.

As conversões à direita são bem protegidas, pois tem acesso direto com faixas canalizadas. As conversões à esquerda sempre fazem o giro em torno da ilha central, tendo que atravessar o fluxo da via principal.

A sinalização é feita em todas as aproximações que tem fluxo conflitante. Emprega-se, comumente, o sinal de parada obrigatória nas interseções em que é necessário cruzar simultaneamente dois fluxos e o sinal de dê a preferência quando se cruza apenas um fluxo.

3.2.2. Rotatória com prioridade para a via principal

A rotatória com prioridade para a via principal, como mostrada na Figura 3.2, também tem fluxos canalizados com canteiros e uma ilha central.

O fluxo da via principal também é prioritário, porém, como ocorre mudança da trajetória no dispositivo, a velocidade dos veículos da via principal

é significativamente menor em relação a semi-rotatória com prioridade para a via principal.

Outra característica que diferencia este tipo de dispositivo do dispositivo vazado é que os veículos da via secundária atravessam os fluxos da via principal separadamente, ou seja, um de cada vez.

Considerando que as velocidades dos veículos da via principal são menores e que a travessia dos fluxos da via principal são realizados um de cada vez (a decisão do motorista é tomada observando apenas um lado), esse tipo de dispositivo apresenta, em geral, maior segurança que os dispositivos vazados.

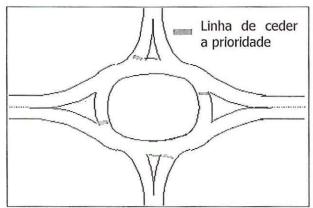


Figura 3.2 - Dispositivo tipo rotatória com prioridade para a via principal.

3.2.3. Rotatória com prioridade para a via circular

Na rotatória com prioridade para a via circular, ou simplesmente rotatória, são utilizados ilha central e canteiros para separar os fluxos, e os veículos trafegam no sentido anti-horário ao redor da ilha, como mostrado na Figura 3.3.

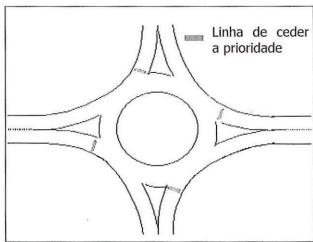


Figura 3.3 – Dispositivo tipo rotatória com prioridade para a via circular.

Nesse tipo de dispositivo, o tráfego que está circulando na rótula tem prioridade sobre o que está entrando; isto é válido tanto para a via principal quanto para a via secundária.

A rotatória tem a grande vantagem de propiciar uma circulação contínua com controle auto-ajustável do fluxo. Nela, os veículos trafegam com baixa velocidade, propiciando grande segurança.

4. SIMULAÇÃO DO TRÁFEGO

4.1. Considerações Iniciais

Uma importante ferramenta hoje bastante utilizada nos estudos de trânsito é a simulação, pois proporciona aos engenheiros de transportes condições para avaliar o desempenho do tráfego em um elemento ou num conjunto de elementos (sistema), como, também, muitas vezes, fazer a otimização da operação do sistema.

A simulação permite a análise dos fenômenos sem a intervenção direta no sistema real, sendo possível, dessa forma, simular uma grande diversidade de condições e analisar o impacto de diferentes composições e volumes de tráfego em diferentes configurações geométricas. DEMARCHI (2000).

A utilização dos modelos de simulação vem aumentando devido ao número de soluções que podem ser dadas nos problemas da engenharia de tráfego, pois pode analisar novos projetos que ainda não foram utilizados na prática e avaliar situações já existentes que apresentam problemas, sem que interfiram no funcionamento.

Os simuladores de tráfego são hoje de uso constante pelos engenheiros de tráfego no processo de avaliação de alternativas de operação de uma interseção, de uma via ou de um conjunto de vias e interseções.

Inúmeros simuladores de tráfego já foram desenvolvidos por diferentes pesquisadores em diferentes países. Alguns se prestam à análise de situações específicas, enquanto outros são mais genéricos, permitindo o emprego num

número maior de situações. Alguns dos simuladores mais citados na literatura técnica são: NETFLO, NETSIM, FRESIM, CORSIM, DRÁCULA, PARAMICS, KRONOS, KWAVES, CORFLO, FREFLO, FREQ, TEXAS, TRANSYT, INTEGRATION, DYNAMIT, DYNEMO e DYNASMART.

O uso de programas de computador permite examinar uma solução real, impossível de ser analisada através de modelos analíticos.

Na Engenharia de Transportes, a simulação de sistemas torna possível avaliar e prever o impacto de alterações operacionais no sistema real (sem que seja necessário parar a operação do mesmo), além de estudar o desempenho de sistemas durante a fase de projeto (antes da sua construção). Simulando-se o sistema, pode-se coletar dados sobre o seu estado; esses dados podem ser então usados para estimar suas medidas de desempenho. SETTI (1997).

Simuladores podem representar vários fenômenos que ocorrem em um fluxo de tráfego, tais como: comportamento dos veículos em uma mesma faixa e na mudança de faixa, forma como os veículos aceleram ou desaceleram, impacto da geometria da via no desempenho veicular, comportamento dos veículos em interseções, entre outros aspectos.

4.2. Classificação dos Modelos de Simulação

Na engenharia, um modelo é uma representação da realidade. Os modelos podem ter várias formas, tais como experimentos controlados, analogias físicas ou funções matemáticas. EGAMI (2000).

Modelo matemático é o conjunto de uma ou mais equações que são construídas para representar um sistema lógico e relações quantitativas de uma parte da realidade. LAW & KELTON (2000).

SETTI (1994) classifica os modelos de simulação em três diferentes dimensões:

 Estáticos ou dinâmicos: o modelo de simulação estático representa um sistema em um dado instante. Por um outro lado, o modelo de simulação dinâmico reproduz as mudanças que o sistema sofre no decorrer do tempo.

- Determinísticos ou estocásticos: Para modelos determinísticos, um mesmo conjunto de dados de entrada gera sempre o mesmo conjunto de dados de saída. Isso não ocorre com os modelos estocásticos, que contêm variáveis aleatórias como dados de entrada e, com isso, geram variáveis aleatórias como dados de saída;
- Discretos ou contínuos: Em um modelo discreto, as variáveis de estado alteram pontualmente no decorrer do tempo. Modelos contínuos possuem variáveis contínuas, ou seja, seus valores variam continuamente ao longo do tempo.

4.3. Simuladores de Tráfego

MCLEAN (1989) considera que os programas de simulação de tráfego procuram representar detalhadas maneiras do tráfego como códigos computacionais e valores numéricos. Para isto, é incluído:

- Uma consideração explícita de características determinísticas e aleatórias para cada unidade em veículo/motorista simulada;
- Um método de nomear estas características para cada veículo de forma que esta distribuição corresponda ao tráfego real;
- Um conjunto de decisões lógicas aleatórias, representando as formas de decisão do motorista e as restrições físicas da via;
- Um procedimento de processamento do tempo de simulação e a posição correspondente ao estado de cada veículo (scanning);
- Um sistema para armazenamento e atualização de valores numéricos correspondentes o cada veículo (book-keeping);
- Rotinas de observação e registros dos dados de tráfego que irão proporcionar os resultados de saída do programa de simulação.

Os modelos de simulação podem ser ainda classificados, dependendo do nível que o fluxo do tráfego é representado. BOXILL & YU (2000) classifica esses modelos como macroscópicos, microscópicos e mesoscópicos.

Os *modelos microscópicos* representam o movimento individual dos veículos, como a velocidade e posição do veículo. SABRA *et al.* (2000) consideram NETFLO e FRESIM como modelos microscópicos. BOXILL & YU (2000) citam: CORSIM, DRÁCULA e PARAMICS.

Os *modelos macroscópicos* consideram as relações entre as características da corrente de tráfego, tais como fluxo, densidade e velocidade. Como exemplo desses modelos, PREVEDOUROS e LI (2000) citam: KRONOS e KWAVES. BOXILL & YU (2000) citam: CORFLO, FREFLO, FREQ e TEXAS.

Os *modelos mesoscópicos* têm aspectos dos modelos microscópicos e macroscópicos; é um meio termo entre esses dois tipos de modelo, representando os veículos e incorporando equações para indicar como esses veículos interagem. ROBERTSON (1986) classifica o simulador Transyt-7F como mesoscópico, PREVEDOUROS e LI (2000) têm a mesma visão do Integration. BOXILL & YU (2000) citam: DYNAMIT, DYNEMO e DYNASMART.

A seguir, é feita uma breve descrição dos principais programas de simulação encontrados na literatura.

CORSIM

É um programa microscópico estocástico, desenvolvido nos Estados Unidos da América, dividido em dois módulos que podem ser usados simultaneamente: NETSIM para redes e FRESIM para vias expressas. SABRA *et al.* (2000).

Seus arquivos de saídas apresentam comprimento de fila, tempo de atraso, parada, tempo de viagem, velocidade, consumo de combustível, entre outros dados.

As limitações de simulação para o NETSIM são de 250 nós, 500 tramos, 100 controles de movimentos, 99 paradas de ônibus, sete faixas por aproximações, 60 interseções e 10.000 veículos. Para o FRESIM, as limitações são de 10.000 veículos, 200 tramos, 120 nós e 20 segmentos de pistas rápidas.

DRÁCULA

Este modelo foi desenvolvido no Instituto de Estudos de Transportes da University of Leeds no Reino Unido. Representa as escolhas e experiências individuais dos motoristas e os movimentos individuais dos veículos na rede, ou seja, ele é um simulador microscópico e considerado estocástico. BOXILL & YU (2000).

FREQ

De acordo com SABRA *et al.* (2000), FREQ é um simulador determinístico e macroscópico. Este modelo é norte-americano e foi desenvolvido em 1968. Possui dois módulos: um usado para simulações de rodovias (FREQPL) e o outro para rampas (FREQPE).

Os mais recentes aperfeiçoamentos do programa permitem obter os seguintes resultados: consumo de combustível e emissão de gases. Os dados de saída são: atraso na viagem, fila, velocidade e taxa de volume/capacidade.

TEXAS

É um programa de simulação macroscópica, útil para fornecer detalhes na demonstração individual de cada veículo em interseções ou em vias de uma rede.

O programa Texas é usado para efeitos de operação de várias demandas de tráfego, tipos de controle de tráfego e interseções isoladas. Ele pode ser aplicado na mudança ou em propostas de projeto de interseções e para a avaliação dos efeitos da alteração na geometria de uma via, motoristas ou características de veículos, condições de fluxos, controle de interseções, controle de faixa e planos de semáforos. SABRA *et al.* (2000).

SYNCHRO

É um modelo macroscópico, desenvolvido nos Estados Unidos da América. Para sincronização de semáforos, com capacidade de otimização.

As características principais do programa incluem análise de capacidade, coordenação, modelagem simulada do semáforo e diagramas de tempo-espaço.

O programa analisa e otimiza as redes de cruzamentos semaforizados. Ele fornece um relatório de resumo detalhado sobre a capacidade, nível de serviço, volume de pistas, sincronismos, comprimento de fila, atrasos, número de paradas, consumo de combustível e níveis de emissão. JAGANNATHAN e KHAN (2001).

TRANSYT-7F

Este simulador foi desenvolvido para otimizar sistema de semáforos para redes ou artérias. O programa aceita a entrada de tempo de semáforos e seqüência de fases, condições geométricas, parâmetros operacionais e volumes de tráfego.

Os dados de saída podem fornecer tamanho do ciclo, redução no tempo de atraso, paradas e consumo de combustível, redução no custo total de operação ou uma combinação de todos estes itens.

INTEGRATION

Este programa foi desenvolvido no Canadá em 1984, aplicável para redes e vias expressas. Ele pode representar o movimento individual do veículo e a relação de fluxo-velocidade entre veículos. Este modelo é dinâmico e estocástico.

Em particular, o simulador Integration permite analisar diversos cenários de forma global e agregada, e é capaz de representar diversos elementos componentes em uma rede de tráfego, tais como vias expressas,

mudanças de faixas, interseções semaforizadas ou não, trechos de convergência, divergência e fluxo de entrelaçamento, entre outros aspectos. Constitui, assim, uma ferramenta capaz de representar de forma bastante realista todo o sistema. Este simulador foi desenvolvido por Michel Van Aerde, no Canadá, na década de 1980.

Uma característica interessante do Integration é a possibilidade de visualização durante a simulação, possibilitando a identificação dos fenômenos que nele ocorrem, tais como formação de filas e escolha na rota. Essa característica facilita detectar possíveis erros na validação. Além disso, o programa tem uma alta flexibilidade em simular cenários, podendo ser ajustado para qualquer geometria de interseção.

O INTEGRATION tem a capacidade de simular seções de entrelaçamento e dispositivos do tipo "PARE" e "Dê a Preferência". O programa requer para a simulação: capacidade em cada tramo, relação de fluxo-velocidade no tramo, plano semafórico, comprimento do ciclo, tempo de verde, tempo de observação, volume de tráfego, dados de origem e destino e configuração da geometria da via.

A versão de nível menor deste programa é capaz de simular uma rede com 10.000 veículos, 100 tramos, 50 nós, e 10 zonas. A versão de nível superior tem capacidade para simular 1.000 tramos, 500 zonas e aproximadamente 500.000 veículos.

4.4. Vantagens e Desvantagens da Simulação

A princípio um simulador pode ser utilizado na representação de diversos sistemas. É necessário, porém, considerar suas vantagens e desvantagens antes de sua utilização.

SETTI (1994) apresenta as principais vantagens e desvantagens do uso da simulação de tráfego.

As principais vantagens são:

- Uma vez que o modelo esteja pronto, ele pode ser usado repetidamente para analisar propostas de alterações no funcionamento e na estrutura do sistema;
- A simulação pode ser usada para analisar um sistema proposto mesmo quando os dados de entrada sejam um tanto imprecisos;
- Enquanto os modelos analíticos exigem um grande número de hipóteses simplificadoras para torná-los matematicamente tratáveis, os modelos de simulação não possuem essa restrição;
- Em muitos casos, a simulação é o único meio de resolver um problema.

As principais desvantagens são:

Os modelos podem ser caros, consumindo um longo tempo para a sua elaboração e validação;

Necessitam de um grande número de simulações para garantir a qualidade dos dados de saída do modelo, o que pode significar custos elevados em alguns casos;

Em certos casos, as técnicas analíticas podem ser mais adequadas para análise de um problema.

4.5. Critério de Escolha do Simulador

Com o estudo de diversos simuladores, pode-se perceber que não há um único tipo de programa para determinada situação. Por isso, a escolha é feita através dos dados disponíveis (entrada requerida) e em função dos resultados que deseja alcançar e os aspectos de maior interesse em uma simulação. As colocações a seguir mostram as entradas requeridas e as saídas disponibilizadas, baseadas no trabalho de MAIOLINO e PORTUGAL (2001).

4.5.1. Dados de Entrada Requeridos

Os simuladores devem contemplar os seguintes elementos:

- Tamanho da rede viária: número máximo de ligações, de nós e de zonas a serem modelados;
- Geometria das interseções: as características físicas das interseções com faixas adicionais para giro, o raio de giro das esquinas e rotatórias;
- Controle das interseções: com sinais de prioridade ou semafórico;
- Características físicas das ligações: número máximo de faixas por sentido;
- Modelagem de via expressa: número máximo de faixas por sentido, geometria e controle das rampas e faixas auxiliares.

Quanto à demanda, os elementos que devem ser considerados são:

- Tipo de veículo: número máximo de classes representadas (automóveis, ônibus, caminhões);
- Uso da rede: número máximo de veículos simultaneamente na rede;
- · Comportamento do motorista;
- Modelagem de incidentes e eventos de curta ou longa duração.

4.5.2. Resultados Disponibilizados

Os resultados disponibilizados incluem, geralmente, atraso de viagem, número de paradas, consumo de combustível, tamanho de fila, volumes de veículos alocados em cada ligação e emissão de poluentes. Programas mais avançados podem otimizar sequência de fase semafórica e comprimento de ciclo e atuar no controle dos tempos de semáforos. Alguns programas são ainda providos de animação e visualização da simulação.

Nas aplicações práticas, é importante que as saídas contemplem os seguintes elementos:

- Volume, velocidade média e densidade alocada para cada ligação, para rede e por classe de veículos;
- · Tempo médio de viagem;
- Atraso médio;
- Emissão de poluentes por ligação e para rede;
- Nível de ruído;
- Consumo de combustível para a rede;
- Fluxo de veículo por hora de viagem;
- Veículo por quilômetro de viagem para rede e por classe de veículos.

4.5.3. Demais aspectos

Na escolha de um simulador, devem ser considerados outros aspectos, como os que seguem:

- A plataforma computacional necessária para a execução do programa, incluindo a configuração computacional e o sistema operacional;
- A possibilidade de ajustes nos programas visando a sua adequação aos padrões locais, já que a maioria é estrangeira e calibrada segundo a realidade do local de origem;
- O custo da aquisição, treinamento e suporte.

4.6. Modelo Escolhido

O INTEGRATION foi o modelo escolhido para simular os dispositivos estudados neste trabalho, pois satisfaz os critérios estabelecidos por MAIOLINO e PORTUGAL (2001) para a escolha do modelo de simulação.

Além disso, vários estudos realizados com simulador INTEGRATION comprovam a sua eficiência como modelo de simulação de tráfego; HELLINGA & VAN AERDE (1994); HALL *et al.* (2000); AI-KAISY *et al.* (1999); RAKHA *et al.* (2002); PREVEDOUROS E WANG (1999); ARAÚJO (2001); TAPIA (2003); XEREZ (2002).

5. PROGRAMA INTEGRATION

5.1. Considerações Iniciais

O Integration é um programa de simulação que permite a análise de diversos fenômenos de uma forma global e agregada, e é capaz de representar diversos elementos componentes em uma rede de tráfego, tais como vias expressas, mudanças de faixas, interseções semaforizadas ou não, trechos de convergência, divergência e fluxo de entrelaçamento, entre outros aspectos. Constitui uma ferramenta capaz de representar de forma bastante realista todo o sistema. Este simulador foi desenvolvido por Michel Van Aerde, no Canadá, na década de 1980.

Uma característica interessante no programa é a possibilidade de visualização durante a simulação, possibilitando a identificação dos fenômenos que nele ocorrem, tais como formação de filas e escolha na rota. Essa característica facilita detectar possíveis erros na validação.

Este capítulo está baseado no estudo realizado por Demarchi (2000) e Rakha (2001).

5.2. Estrutura do Programa

Uma interseção pode-se dizer que é uma pequena rede de tráfego, em que o Integration modela através de *nós* e *tramos* e *elementos de tráfego*.

Os *nós* representa o início, o final e as interseções entre duas vias ou quaisquer outros pontos onde ocorra mudança nas características das vias, tais

como mudança no número de faixas e na magnitude do greide. Como neste estudo foi considerada apenas situação topográfica plana, portanto não há mudança na magnitude do greide.

O tramo ou link promove a ligação entre os nós e representam as vias por onde os veículos trafegam. Cada tramo é definido por sua origem e destino. Ao tramo associa-se à relação fluxo-velocidade e os elementos de controle de tráfego.

Os *elementos de controle do tráfego* são os dispositivos utilizados para controlar onde há prioridade de movimento nas interseções, tais como semáforos, placas do tipo "PARE" ou "Dê a Preferência".

Os dados fundamentais para a simulação são armazenados em arquivos ditos como imprescindível, que são mestre, de nós, de tramos, de demanda, de semáforos e de incidentes. Os dois últimos arquivos podem ou não conter dados. Existem ainda os arquivos opcionais que permitem a simulação de aspectos diferentes dos padrões adotados pelo simulador, tais como a simulação de veículos diferentes do que considerado padrão pelo modelo e o arquivo de gap.

Os arquivos obrigatórios são descritos resumidamente abaixo:

- Arquivo mestre: contém as informações sobre os nomes dos arquivos de dados, sua localização, e o tempo de simulação;
- Arquivo de nós: contém as coordenadas cartesianas dos nós da rede;
- Arquivo de tramos: contém os comprimentos dos tramos, o número de faixas de cada tramo e os parâmetros que definem a relação fluxovelocidade, ou seja, a velocidade de fluxo livre, a velocidade na capacidade, a capacidade e a densidade de congestionamento;
- Arquivo de demandas: contém a matriz de origem/destino, indicando a magnitude de cada demanda, o instante de início e fim de sua geração, o padrão de geração das viagens e a composição veicular;

- Arquivos de semáforos: contém informações sobre programação semafórica, mas na simulação de vias de fluxo ininterrupto, não deve conter nenhum tipo de dado. Entretanto, é necessário que esse arquivo exista para a execução das simulações.
- Arquivos de incidentes: contém informações que permitem simular a ocorrência de incidentes, tais como o fechamento temporário de uma faixa de tráfego. Mesmo que nenhum incidente seja simulado, um arquivo vazio é necessário para rodar o simulador.

Os arquivos opcionais que foram utilizados neste trabalho são descritos resumidamente abaixo:

- Arquivo de parâmetros veiculares: este arquivo contém os parâmetros relacionados a características dos veículos, tais como peso, potência, área frontal, coeficiente eficiência da transmissão e coeficiente de atrito aerodinâmico.
- Arquivo de gap: este arquivo é opcional e permite ao usuário a mudança do intervalo crítico em um tramo específico.

Todos os dados são introduzidos nos arquivos em forma de tabela, que são descritos em particular para cada arquivo em capítulos subseqüentes. As tabelas devem ser escritas em forma de texto e os números são separados através de espaços. No trabalho em que foi desenvolvido foram utilizadas tabelas confeccionadas no Excel e salvas posteriormente em formato texto.

O programa gera em todos os casos de simulação arquivos com os dados dos resultados que são *runerr, output, assign, en-route, summary* entre outros arquivos opcionais como, por exemplo, o *file 11*.

- Arquivo runerr: Contém o tamanho da rede que pode ser construída pela versão utilizada e erros apresentados na simulação se houver.
- Arquivo output: Contém a lista dos arquivos de entrada, o total de número de veículos e demandas, fluxos, tempo e total de viagens,

taxa de volume/capacidade, número de paradas, número de veículos em cada tramo.

 Arquivo summary: número de veículos e pessoas por viagem e por quilometro, tempo total de atraso, tempo de atraso parado, tempo de aceleração e desaceleração, consumo de combustível total, emissão de poluentes, taxa de acidentes e custo com pedágio.

Arquivo opcional gerado para os dados de saída:

 Arquivo 11: S\u00e3o computados os dados num total e feito uma m\u00e9dia pelo tempo de dura\u00e7\u00e3o da simula\u00e7\u00e3o e apresentados neste arquivo, dados como m\u00e9dia do tempo de atraso no tramo, fila m\u00e9dia, n\u00eamero m\u00e9dio de paradas, emiss\u00e3o de poluentes e expectativa de acidentes.

5.3. Lógicas Fundamentais

O movimento dos veículos em qualquer segmento de via é governado por lógicas distintas, as quais são:

- relação interveicular ("car-following");
- mudança de faixas;
- aceleração em função do desempenho;
- geração de veículos;
- escolha de rota;
- filas;
- sinalização

A velocidade, a aceleração e o posicionamento longitudinal e transversal de cada veículo presente na rede são analisados e atualizados a cada décimo de segundo, de acordo com as lógicas analisadas a seguir.

5.3.1. Relação interveicular

Em cada tramo da rede, veículos em uma mesma faixa de tráfego movem-se segundo um padrão definido através de um modelo combinado de fluxo e "car-following". VAN AERDE (1997). O modelo é microscópico na medida em que o comportamento de cada veículo é modelado individualmente. Porém, os parâmetros do modelo são calibrados macroscopicamente, de forma que o comportamento agregado do fluxo de tráfego, em condições de equilíbrio, possa ser representado através da relação entre fluxo, velocidade e densidade definida para o tramo. DEMARCHI (2000).

A relação interveicular também leva em conta situações como a ilustrada pela Figura 5.1. O fato do espaçamento s_{12} ser maior que o espaçamento s_{23} , não significa necessariamente que a velocidade do veículo 1 seja maior que a velocidade do veículo 2, pois o veículo 1 ocupa mais espaço que os outros veículos, portanto, a relação entre velocidade e espaçamento deve ser modificada para compensar o fato do veículo 1 ser mais longo.

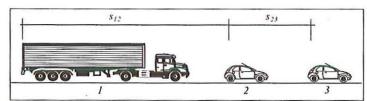


Figura 5.1 – Relação entre espaçamentos de um caminhão e um automóvel. Fonte: DEMARCHI (2000).

5.3.2. Mudança de faixa

A mudança de faixa pode ser de dois tipos: *obrigatórias* ou *desejáveis*. As *mudanças obrigatórias* são determinadas pela geometria da via e pela rota utilizada pelo veículo e ocorrem em locais próximos a locais de saída ou em conversões.

As *mudanças desejáveis* acontecem apenas para aumentar a velocidade do veículo ou para ocupar a faixa de tráfego onde existe o maior espaçamento, de forma que possa trafegar com maior velocidade.

O simulador calcula as velocidades a cada décimo de segundo que o veículo poderia desenvolver na faixa da direita ou da esquerda. O veículo 1 decide mudar de faixa se a velocidade que ele pode atingir na faixa da direita ou da esquerda for maior da qual ele está, caso contrário ele continua na mesma faixa. Outro aspecto verificado no processo de escolha da faixa é o espaçamento s_{41} : se seu tamanho for insuficiente para a manobra, o veículo 1 permanece na faixa em que está. A figura 5.2 representa a mudança de faixa e ultrapassagens.

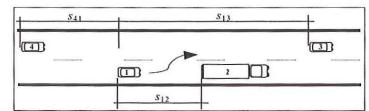


Figura 5.2 - Lógica de mudança de faixa e ultrapassagens. Fonte: DEMARCHI (2000).

Para impedir que várias mudanças de faixa sejam realizadas num intervalo de tempo muito curto, o que seria um comportamento irreal, outra manobra só é permitida depois de transcorrido um certo tempo.

O manual do Integration não fornece maiores detalhes sobre o valor desse tempo, mas menciona que a princípio, ele é suficiente para que a manobra de ultrapassagem possa ser completada e uma nova ultrapassagem não seja imediatamente iniciada.

5.3.3. Aceleração em função do desempenho

A velocidade dos veículos pode ser alterada de acordo com os fatores envolvidos no tráfego como, por exemplo, ultrapassagem e espaçamento interveicular.

O espaçamento interveicular é um fator importante para a variação da velocidade, pois quando o veículo se depara com um espaço suficiente para ocorre o aumento da velocidade enquanto ele trafega em baixa velocidade, este veículo faz a transição da velocidade de forma gradativa até chegar na desejada ou permitida.

O Integration utiliza um modelo de desempenho que é função da interação entre forças de tração e de resistência ao movimento. É descrito em mais detalhes por DEMARCHI & SETTI (2000).

5.3.4. Geração de veículos

A geração individual de veículos ocorre de uma maneira que satisfaz o processo de partidas especificado pelo usuário nos arquivos de entrada de dados, esta geração é realizada antes mesmo de iniciar o carregamento de veículos na rede de tráfego.

O modelo desagrega os veículos especificados no arquivo de demanda e gera a partida individualmente antes de iniciar a simulação. Esta partida poderá ser em tempos totalmente aleatórios, parcialmente aleatórios e constantes ou totalmente constantes, determinado pelo usuário.

Cada partida gerada contém para cada veículo o horário de partida, origem e destino da viagem, tipo do veículo e número identificador do veículo. Este número pode ser utilizado para traçar seu caminho através da rede. Quando o relógio da simulação atinge o horário de partida de um veículo, uma chamada é feita para aquele veículo entrar na rede, em sua zona de origem. Deste ponto o veículo irá prosseguir, de tramo em tramo até o destino final.

5.3.5. Escolha de rota

A escolha da rota do veículo é determinada pela lógica interna do programa.

O tráfego nos tramos da rede é gerado a partir de demandas, originadas em um ou mais nós da rede, que tem como destino um ou mais nós. A demanda é caracterizada por uma distribuição temporal de viagens, que define os instantes de entrada dos veículos na rede e o tipo de veículo gerado.

A escolha de uma rota que um veículo deve percorrer é feita através de uma lista, definida pelo programa, que abrange cada veículo desde sua origem até o seu destino. Para isto o veículo consulta uma lista, que contém a seqüência a ser percorrida, para saber qual o próximo tramo que deve utilizar para alcançar o seu destino de forma mais eficiente e rápida. Quando seu percurso neste tramo está completo, o processo é repetido até alcançar o tramo cujo nó é o destino.

Assim que se aproxima do final de um link, a lógica da mudança de faixa em função da geometria assegura que os veículos migrem automaticamente para aquelas faixas que dão acesso direto para o próximo tramo desejado.

A entrada do veículo em um próximo tramo depende da possibilidade do tramo subseqüente em acomodar o veículo sem violar a densidade de congestionamento estabelecida pelo usuário para este tramo. Caso o tramo esteja congestionado o veículo deverá esperar no seu tramo até que ocorra um espaço em que o veículo possa entrar sem prejudicar a densidade de congestionamento. Conseqüentemente, o congestionamento de um tramo pode se propagar para tramos seguintes.

5.3.6. Fila

A representação da fila é feita através da diferença entre as taxas de chegada e partida em um tramo, o programa mostra os veículos parados ao longo de um tramo ou de vários, sendo que a representação visual é feita de forma que demonstra como realmente ocorre, e não verticalmente como em alguns simuladores como, por exemplo, no *Transyt*.

As filas podem propagar-se para os tramos a montante ("back-propagation"), isso ocorre se o número de veículos na fila exceder a capacidade do tramo.

A capacidade do tramo é calculada para cada faixa de tráfego como o produto entre a densidade de congestionamento e o comprimento do tramo.

5.3.7 Sinalização

Para a representação de sinalização em interseções o modelo permite utilizar sinais de "PARE", "Dê a Preferência" e semáforos.

Estes sinais são utilizados em locais que existem impactos com fluxos, conversão à esquerda ou à direita, sendo que a rota prioritária de via deve ser estabelecidas pelo programador.

Para sinais do tipo "PARE", a lógica interna do programa necessariamente faz com que os veículos param na interseção durante três segundos e decide se pode continuar a trajetória dependendo do fluxos conflitantes de veículos da via oposta.

Para sinais do tipo "Dê a Preferência" nem sempre o veículo pára, isso só ocorre quando há necessidade, nesse caso o simulador utiliza o intervalo de tempo necessário para fazer o cruzamento.

O programa permite que faça a alteração do intervalo crítico para o cruzamento através de um arquivo opcional, o arquivo de gap.

6. TESTES PRELIMINARES DA LÓGICA DO INTEGRATION

6.1. Considerações Iniciais

Neste capítulo são apresentados e analisados os resultados obtidos com o simulador Integration em alguns casos particulares de interseções não semaforizadas (com sinal de parada obrigatória ou dê a preferência).

São dois os propósitos deste capítulo. Primeiro, verificar a validade e a consistência dos resultados fornecidos pelo simulador INTEGRATION em alguns casos particulares de interseções simples não semaforizadas, através da comparação entre valores fornecidos pelo simulador e do confronto com resultados obtidos com outros métodos de avaliação do desempenho de cruzamentos não semaforizados.

Segundo, investigar sobre alguns aspectos relevantes da lógica utilizada pelo simulador *Integration*, através da análise do comportamento de resultados fornecidos pelo mesmo.

6.2. Tempo de Simulação

A distância dos pontos onde são gerados os fluxos das duas vias até a interseção, na simulação, foi fixada no estudo em 500 metros — valor considerado adequado para representar a situação real dos fluxos de veículos quando os mesmos chegam a uma interseção ou dispositivo viário.

Com base nessa premissa, resta investigar qual o tempo de simulação necessário para que os valores dos parâmetros de avaliação do desempenho do tráfego se estabilizem.

Para isso foi analisada a situação mostrada na Figura 6.1, considerando os seguintes parâmetros: densidade de congestionamento = 125 veic/km, capacidade das vias = 1.300 veíc/h/faixa e intervalo crítico = 5s. Foram analisados dois cenários. O primeiro com velocidade livre de 72 km/h e velocidade na capacidade de 54 km/h. O segundo com velocidade livre de 30km/h e velocidade na capacidade de 29,99 km/h.

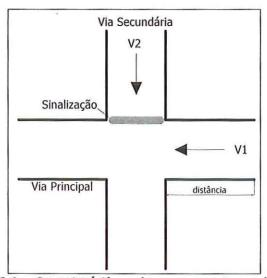


Figura 6.1 - Características do cruzamento analisado.

Na tabela 6.1 e na Figura 6.2 são mostrados os resultados do atraso dos veículos da via secundária em função do tempo de simulação para os dois casos analisados.

Tabela 6.1 – Atraso n	via secundária x ter	npo de simulação.
-----------------------	----------------------	-------------------

Tempo de simulação (min)		médio eg)
simulação (min)	V=72 km/h	V=30 km/h
15	6,6	2,7
30	8,0	4,1
60	7,6	3,8
90	7,4	3,4
120	7,9	3,6
150	7,6	3,7

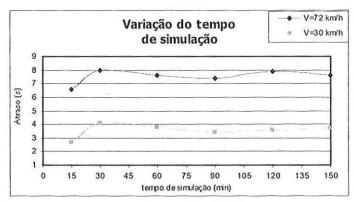


Figura 6.2 – Tempo de simulação em função do atraso na via secundária.

Como se pode observar, a partir de um tempo de 30 minutos de simulação os valores do atraso médio dos veículos da via secundária, e certamente dos outros parâmetros, se estabilizam.

Como foram analisados apenas dois casos simples, por segurança foi utilizado no trabalho um tempo de simulação de 2 horas.

6.3. Comprimento Mínimo do Tramo Anterior ao Cruzamento

Na análise de cruzamentos não semaforizados através de simulação, é importante estar atento à necessidade do tramo imediatamente anterior à interseção ter um comprimento mínimo igual a distância percorrida pelos veículos num intervalo de tempo igual ao intervalo crítico. Caso este comprimento seja menor, devido à lógica do processo de simulação, o intervalo crítico realmente acaba sendo utilizado pelo simulador corresponde ao tempo de percurso dos veículos no tramo imediatamente anterior - o que acontece é que o programa não leva em conta os veículos que estão nos tramos que se localizam antes do tramo imediatamente anterior.

No caso das vias de sentido duplo, é necessário que os tramos imediatamente anteriores do dois lados tenham comprimento maior que a distância de percurso.

Diversas possibilidades foram investigadas para tentar contornar essa limitação no caso do simulador Integration, como, por exemplo, explicitar na simulação a interferência dos fluxos que se localizam antes do tramo anterior

na operação do cruzamento, utilizando intervalos críticos diferentes. Contudo, não se obteve êxito com nenhuma das possibilidades analisadas.

O fato de se ter que utilizar comprimentos acima de um determinado valor para os tramos vizinhos à interseção não semaforizada constitui, sem dúvida, uma limitação ao emprego do simulador INTEGRATION na análise de dispositivos viários compostos de cruzamentos próximos. Assim, o simulador não serve, a princípio, para analisar dispositivos de dimensões muito reduzidas.

Para ilustrar a questão, considere a o caso mostrado na figura 5.2, com os seguintes parâmetros: velocidade de fluxo livre = 80 km/h, velocidade na capacidade = 60 km/h, densidade de congestionamento = 125 veíc/km, capacidade = 1.300 veíc/h/faixa, volume da via principal = 200 veic/h, volume da via secundária = 200 veic/h, operação com sinal "dê a preferência" e intervalo crítico = 4 s.

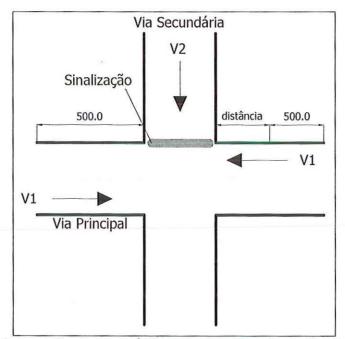


Figura 6.3 - Características do cruzamento analisado.

Nesse caso, o comprimento mínimo do tramo imediatamente anterior à interseção, para que o intervalo crítico considerado na análise da operação do cruzamento seja efetivamente de 4s, é de 88,89 metros. Se o comprimento for menor que 88,89 metros, o intervalo crítico considerado na análise da operação

passa automaticamente a ser igual ao tempo de percurso no tramo, alterando os valores teoricamente reais dos parâmetros de desempenho.

Isso fica claro quando se analisam, por exemplo, os valores fornecidos pelo simulador Integration para o atraso médio dos veículos da via não preferencial - que se encontram relacionados na tabela 6.2 e na Figura 6.4.

Tabela 6.2 – Atraso na via secundária x comprimento do tramo anterior.

Distâncias (m)	Atraso médio(s)	
25	1,9	
50	2,4	
88,89	3,3	
100	3,3	
200	3,3	

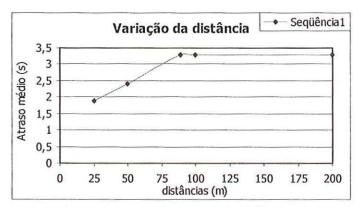


Figura 6.4 - Comprimento do tramo anterior em função do atraso na via secundária.

Como se pode observar, os valores do atraso crescem com o aumento do comprimento do trecho anterior ao cruzamento até o comprimento atingir o valor de 88,89 metros, a partir de onde, então, o valor do atraso permanece constante. Isso porque o intervalo crítico considerado pelo Integration é igual ao tempo de percurso no tramo anterior enquanto o mesmo for menor que 88,89 metros.

6.4. Comparação de Valores do Atraso em Cruzamentos com Via Preferencial

Para o caso da interseção da Figura 6.1 foi determinado o atraso médio dos veículos da via secundária para diferentes volumes, considerando o volume da via principal fixo igual a 500 veíc/h e variando-se o intervalo crítico.

Na tabela 6.3 e na Figura 6.5 são mostrados os valores obtidos para o caso de operação sem parada obrigatória (sinal de "dê a preferência").

Tabela 6.3 - Valores de atraso médio na via secundária para variação do intervalo

		crítico		
V1	V2	T=4s	T=5s	T=6s
	100	4,7	7,1	9,4
500	300	6,2	10	13,7
	500	12,1	21,4	34,9

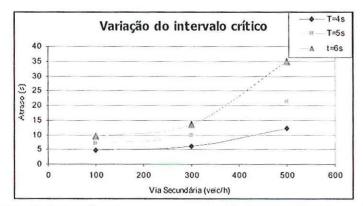


Figura 6.5 – Valores do atraso em função do fluxo e do intervalo crítico para operação sem parada obrigatória.

Como se pode observar, os resultados são coerentes, pois, para um mesmo intervalo crítico, aumentando os volumes da via secundária crescem os valores do atraso. Da mesma forma, para iguais valores do volume da via secundária, os valores do atraso aumentam quando os valores do intervalo crítico tornam-se maiores.

Na tabela 6.4 e na Figura 6.6 são mostrados os valores obtidos para um volume na via secundária de 100 veíc/h e diferentes valores do intervalo crítico, para operação com parada obrigatória (sinal de "pare") e sem parda obrigatória (sinal de "dê a preferência").

Tabela 6.4 –Atraso na via secundária em função do tipo de operação e do intervalo crítico.

Intervalo Crítico (seg)	Dê a Preferência	PARE
4	4,7	21,7
5	7,1	23,7
6	9,4	29,0

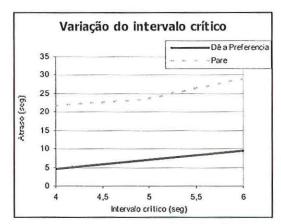


Figura 6.6 – Valores do atraso em função do intervalo crítico para operação com e sem parada obrigatória.

Os valores fornecidos pelo Integration também neste caso são coerentes, pois os valores do atraso na operação com parada obrigatória são maiores que valores com operação sem parada obrigatória. Mais: ambos aumentam quando se utilizam valores maiores para o intervalo crítico.

6.5. Comparação dos Valores do Atraso para Vias de Sentido Único e Sentido Duplo

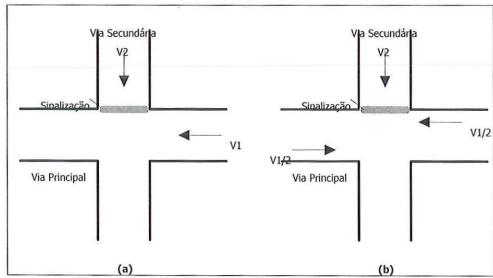


Figura 6.7 - Características do caso analisado.

Nessa análise foram adotados os seguintes parâmetros: velocidade de fluxo livre = 80 km/h, velocidade na capacidade = 60 km/h e densidade de



congestionamento = 125 veic/km, capacidade das vias = 1.300 veíc/h/faixa, operação com sinal "dê a preferência" (parada não obrigatória dos veículos da via não preferencial).

Na tabela 6.5 e nas Figuras 6.8, 6.9 e 6.10 são mostrados os valores obtidos para o atraso médio dos veículos da via não preferencial para os dois casos, variando-se os valores dos fluxos nas duas vias.

Tabela	6.5 -	Resultados	do	atraso	médio

Volumes de veículos (veic/h)		Atraso médio (s)		
V1	V2	Um	Dois	
		sentido	sentidos	
	200	1,9	1,6	
200	400	2,6	2,7	
	600	4,1	3,8	
	200	3,4	3,7	
400	400	5,5	4,8	
	600	9,5	8,9	
	200	10,2	12,1	
800	400	22,6	21,2	
	600	207,1	205,3	

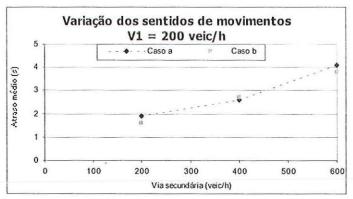
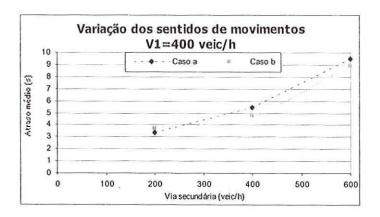


Figura 6.8 – Atraso em função do volume na via secundária para um volume na via preferencial de 200 veíc/h.



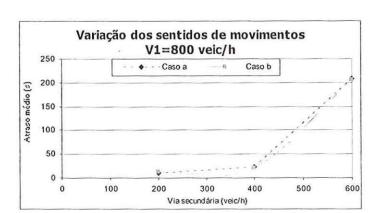


Figura 6.9 – Atraso em função do volume na via secundária para um volume na via preferencial de 400 veíc/h.

Figura 6.10 – Atraso em função do volume na via secundária para um volume na via preferencial de 800 veíc/h.

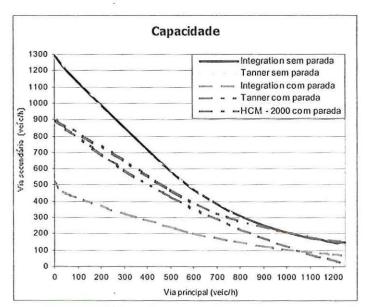
Como se pode observar os valores obtidos nos dois casos são praticamente os mesmos. As pequenas diferenças ocorrem devido às oscilações naturais dos valores obtidos em simulações.

6.4. Comparação das Capacidades

Para verificar (comprovar) a validade dos resultados fornecidos pelo INTEGRATION, foram comparadas as capacidades de entrada num cruzamento com via preferencial, em função do fluxo na via principal, utilizando valores obtidos com o simulador INTEGRATION, valores fornecidos pelo HCM-2000 e valores fornecidos pela expressão de Tanner.

Essa análise foi realizada para as seguintes condições: intervalo crítico de 6,5 segundos (valor utilizado pelo HCM –2000); headway mínimo de entrada no cruzamento dos veículos da via secundária no caso de operação sem parada obrigatória = 2,77s (que corresponde a capacidade de 1300 veíc/h quando não há fluxo na via principal); headway mínimo de entrada no cruzamento dos veículos da via secundária no caso de operação com parada obrigatória = 4s (que corresponde a capacidade de 900 veíc/h quando não há fluxo na via principal) – valor utilizado pelo HCM – 2000; headway mínimo entre veículos na via principal igual a zero.

Cabe fazer as seguintes observações: o HCM – 2000 não fornece valores para a capacidade com operação sem parada obrigatória; o modelo utilizado no simulador Integration considera um tempo de parada de todos os veículos de 3 segundos aos junto ao cruzamento, quando a operação é realizada com parada obrigatória.



Na figura 5.6 são mostradas as curvas obtidas.

Figura 6.5 – Valores da capacidade de entrada no cruzamento em função do tipo de operação e do volume na via preferencial.

No caso da operação sem parada obrigatória, as curvas da capacidade obtidas com os valores fornecidos pelo simulador Integration e pela fórmula Tanner praticamente coincidem, exceto para valores do fluxo na via preferencial acima de 900 veíc/h quando elas começam a se afastar.

No caso da operação com parada obrigatória, os valores do HCM – 2000 e de Tanner são próximos e os do Integration significativamente abaixo. Isso se explica pelo fato do Integration considerar todos os veículos da via secundária sendo obrigados a efetuar uma parada de, no mínimo 3s, ao atingir a posição de atendimento. Isso, somado a um tempo para avançar até a posição de atendimento - que se imagina algo em torno de 4s -, leva a um intervalo entre veículos de 7s e uma capacidade de 514 veíc/h quando não há fluxo na via principal — valor muito abaixo dos valores reais observados na realidade do país e dos valores fornecidos por outros métodos.

Conclusão: o simulador Integration representa bem a realidade no caso de cruzamentos com via preferencial com operação sem parada obrigatória. Contudo, não representa bem a operação com parada obrigatória.

7. RESULTADOS OBTIDOS COM O INTEGRATION

7.1. Considerações Iniciais

O desempenho da operação do tráfego num cruzamento ou dispositivo viário (composto de um conjunto de cruzamentos), pode ser avaliado, como visto no capítulo 2, utilizando distintos critérios: índice de acidentes, distância de percurso, tempo de percurso, atraso global, atraso crítico, emissão de poluentes, consumo de combustível, etc.

Como o objetivo deste trabalho é avaliar a qualidade da operação (comodidade/conforto dos condutores e passageiros), ou seja, o nível de serviço, foram utilizados como parâmetros que expressam o nível de serviço (qualidade da operação) o atraso crítico e o atraso global.

O atraso médio denominado crítico corresponde ao maior valor dos atrasos observados em cada um dos cruzamentos dos dispositivos, à exceção do dispositivo tipo rotatória com prioridade para a via principal, onde foi considerado o maior valor da soma dos atrasos na travessia dos dois cruzamentos da via principal contíguos.

Ao passar nos dispositivos tipo semi-rotatória com prioridade para a via principal e rotatória com prioridade para a via circular, os veículos cruzam apenas um cruzamento "crítico". Contudo, no caso da rotatória com prioridade para a via principal, os veículos cruzam dois cruzamentos "críticos" contíguos bastante próximos. Por essa razão, neste caso foi considerada na avaliação do desempenho a soma dos atrasos dos dois cruzamentos "críticos".

O atraso denominado global corresponde a média dos valores dos atrasos dos veículos observados em todos os cruzamentos do dispositivo.

Esses dois parâmetros atraso crítico e atraso global são expressos em segundos por veículo (seg/veíc).

No capítulo 3 foram mencionados os três principais tipos de dispositivos rodoviários em nível empregados no país, de uso bastante frequente em rodovias de pista simples.

Esses dispositivos foram denominados de semi-rotatória com prioridade para via principal (rotatória vazada), rotatória com prioridade para a via principal e rotatória com prioridade para a via circular, ou simplesmente rotatória.

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos, utilizando o simulador Integration, dos dois parâmetros considerados representativos do nível de serviço (qualidade da operação): atraso crítico e atraso global.

7.2. Dados de Entrada

A distância do ponto de geração do fluxo de veículos até o início do dispositivo foi de 500 metros e o tempo de simulação de 2 horas, conforme discutido no capítulo 6.

Para a simulação utilizando o simulador Integration também são necessários os seguintes dados: geometria dos dispositivos, tipo de operação em cada uma das interseções (parada obrigatória ou dê a preferência), intervalo crítico aceitável, porcentagem dos diversos tipos de veículos, características de cada tipo de veículo e características dos fluxos de tráfego: capacidade, velocidade em fluxo livre, velocidade na capacidade, densidade de congestionamento, etc.

A seguir são apresentadas as principais hipóteses adotadas.

7.2.1. Características geométricas dos dispositivos

Nas Figuras 7.1, 7.2 e 7.3 são mostradas as características geométricas dos dispositivos. As dimensões dos mesmos foram fixadas à luz de dois aspectos: representar as configurações geométricas mais comuns utilizadas na prática e atender as restrições da lógica de simulação do Integration discutidas no capítulo 6.

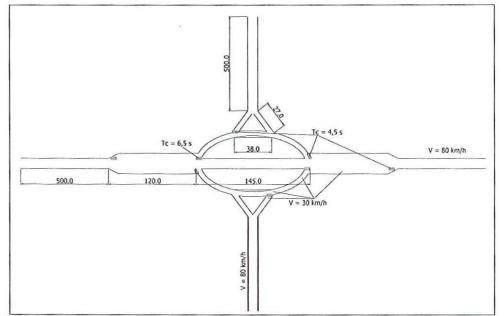


Figura 7.1 – Características da semi-rotatória com prioridade para a via principal.

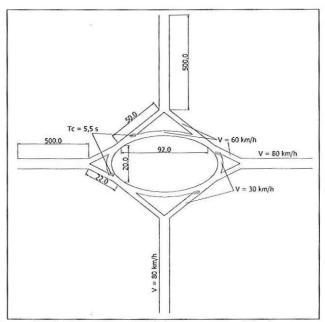


Figura 7.2 - Características da rotatória com prioridade para a via principal.

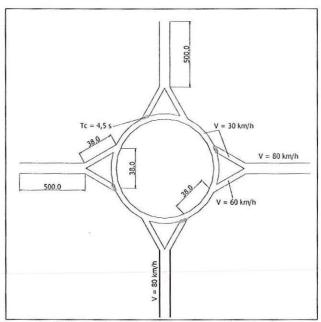


Figura 7.3 – Características da rotatória com prioridade para a via circular.

7.2.2. Características dos veículos

No estudo foi considerado apenas um tipo de veículo, o automóvel. Primeiro por ser o tipo de veículo com maior participação no tráfego rodoviário (em geral acima de 80%). Segundo, por ser mais fácil adaptar os resultados obtidos no estudo para condições reais, onde se observam diferentes

porcentagens dos diversos tipos de veículos (caminhões, ônibus, motocicleta, etc.), bastando utilizar o conceito de veículo equivalente.

O automóvel utilizado como referência foi o modelo Gol 1.6, marca Volkswagen. As principais características desse veículo são mostradas na tabela 7.1.

Tabela 7.1 - Características do veículo padrão utilizado na simulação.

Parâmetros	Valores
Massa do veículo(m)	1.180 kg
Coeficiente estático de atrito pneu-pavimento (µ)	0,6
Potência nominal do motor (P)	68,0 kW
Coeficiente de transmissão (η)	0,8
Comprimento (L)	4,0 m
Coeficiente de atrito aerodinâmico (C_d)	0,3
Área frontal (A)	2,0 m ²
Coeficiente de Rolamento (C _r)	1,2
Constante para tipo de pneu (C_2)	0,0125
Constante para tipo de pneu (C_3)	7,6

7.2.3. Características do tráfego

Nas simulações foram admitidos os seguintes valores para os parâmetros do tráfego: velocidade nos trechos em tangente = 80km/h, velocidade nos trechos em curva de grande raio = 60km/h, velocidade nos trechos em curva de pequeno raio e nos trechos que antecedem cruzamentos com via preferencial = 30km/h, capacidade = 1300 veíc/h/faixa, velocidade na capacidade = 75% da velocidade em fluxo livre, densidade de congestionamento = 125 veíc/km.

De acordo com os resultados de pesquisas de campo realizadas por DEMARCHI (2002) e, mais recentemente, pela empresa AUTOBAHN em pesquisa ainda não divulgada, a velocidade na capacidade situa-se em torno de 75% da velocidade em fluxo livre – valor adotado neste trabalho.

Nas figuras 7.1, 7.2 e 7.3 encontram-se assinalados os valores das velocidades nos vários tramos dos dispositivos.

7.2.4. Características da operação dos veículos nos cruzamentos

Considerando que na grande maioria dos dispositivos rodoviários a visibilidade é boa, foi admitido que a operação nos cruzamentos ocorre sem a obrigatoriedade de parada dos veículos da via não preferencial, se não houver veículos próximos se aproximando na via preferencial, independente do tipo de sinalização utilizada (parada obrigatória ou dê a preferência).

Os intervalos críticos adotados para cada tipo de cruzamento são comentados a seguir.

Nos cruzamentos com velocidade baixa na via preferencial (30km/h) e tomada de decisão por parte do condutor olhando apenas para um lado, foi admitido um intervalo crítico de 4,5 segundos.

Nos cruzamentos com velocidade média na via preferencial (60km/h) e tomada de decisão por parte do condutor olhando apenas para um lado, foi admitido um intervalo crítico de 5,5 segundos.

Nos cruzamentos com velocidade alta na via preferencial (80km/h) e tomada de decisão necessitando observar os dois lados, foi admitido um intervalo crítico de 6,5 segundos.

Nas Figuras 7.1, 7.2 e 7.3 encontram-se assinalados os valores do intervalo crítico adotado em cada cruzamento dos dispositivos.

7.2.5. Distribuição dos veículos

Foi admitido que os veículos chegam ao sistema – a entrada, como visto, é considerada ocorrer 500 metros antes do início dos dispositivos – de forma aleatória, isto é seguindo uma distribuição de Poisson (intervalo entre veículos seguindo uma distribuição exponencial negativa).

7.2.6. Cenários analisados

Foram analisados no estudo dois cenários distintos.

No primeiro cenário, os veículos da via principal e da via secundária passam direto pelo dispositivo, isto é, não fazem nenhum tipo de conversão.

No segundo cenário, 60% dos veículos de ambas as vias passam direto, 20% convergem à direita e 20% convergem à esquerda.

7.3. Procedimento para a Obtenção dos Parâmetros de Desempenho

Para a obtenção dos parâmetros caracterizadores do desempenho, as simulações foram realizadas fixando-se o volume da via principal e variando-se o volume da via secundária.

Os valores admitidos para a via principal foram: 50 a 1200 veic/h. Na via secundária foram: 50 a 1300 veic/h, ou até que o valor do atraso fosse de aproximadamente 80 segundos – valor indicativo de via praticamente saturada.

7.4. Resultados Obtidos

7.4.1. Atraso crítico

Nas figuras 7.4, 7.5, 7.6, 7.7, 7.8 e 7.9 são mostradas as curvas do atraso médio crítico construídas com base nos valores fornecidos pelo simulador INTEGRATION.

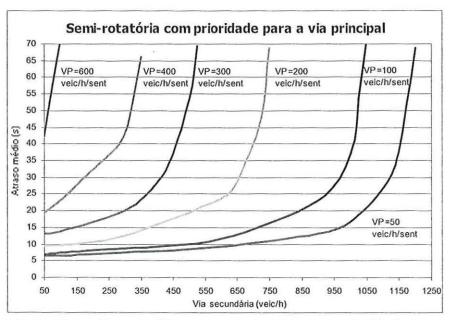


Figura 7.4 – Atraso crítico na semi-rotatória com prioridade para a via principal, distribuição dos fluxos: 100%, 0%, 0%.

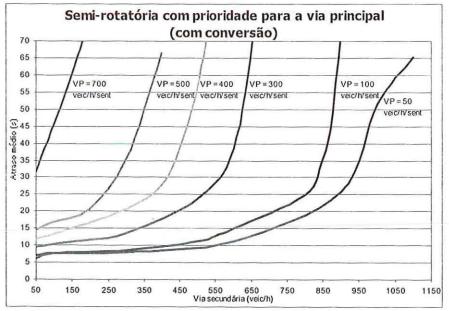


Figura 7.5 – Atraso na semi-rotatória com prioridade para a via principal, distribuição dos fluxos: 60%, 20%, 20%.

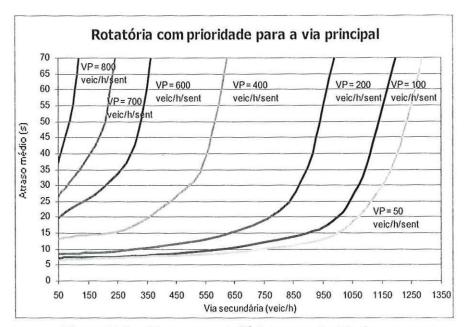


Figura 7.6 – Atraso na rotatória com prioridade para a via principal, com distribuição do fluxo: 100%, 0%, 0 %.

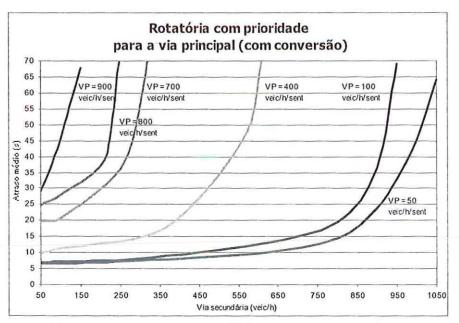


Figura 7.7 – Atraso na rotatória com prioridade para a via principal, com distribuição do fluxo: 60%, 20%, 20%.

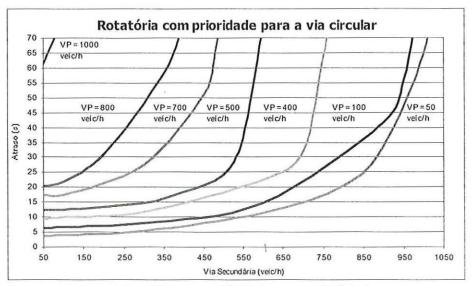


Figura 7.8 – Atraso na rotatória com prioridade para a via circular, com distribuição do fluxo: 100%, 0%, 0 %.

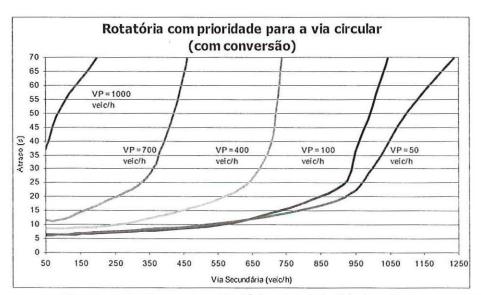


Figura 7.9 – Atraso na rotatória com prioridade para a via circular, com distribuição do fluxo: 60%, 20%, 20%.

7.3.2. Atraso global

Nas Figuras 7.10, 7.11, 7.12, 7.13, 7.14 e 7.15 são mostradas as curvas do atraso global construídas com base nos valores fornecidos pelo simulador INTEGRATION.

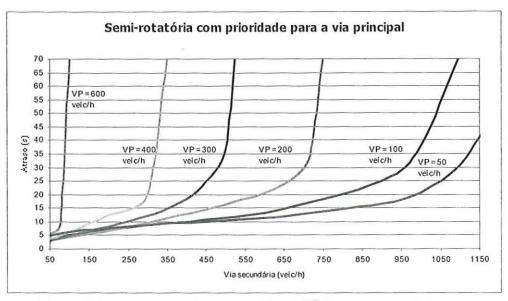


Figura 7.10 – Atraso global na semi-rotatória com prioridade para a via principal, com distribuição do fluxo: 100%, 0%, 0 %.

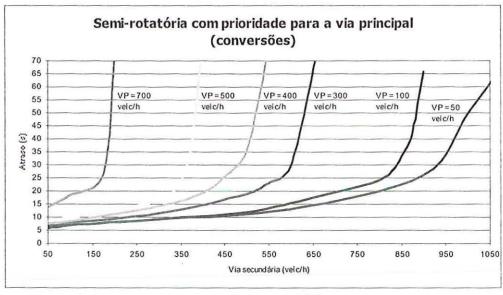


Figura 7.11 – Atraso global na semi-rotatória com prioridade para a via principal, com distribuição do fluxo: 60%, 20%, 20%.

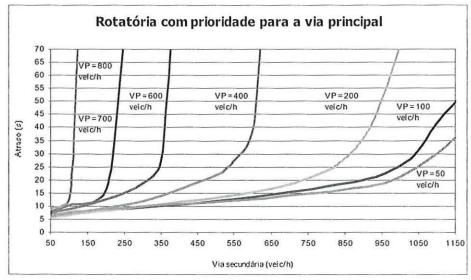


Figura 7.12 – Atraso global rotatória com prioridade para a via principal, com distribuição do fluxo: 100%, 0%, 0 %.

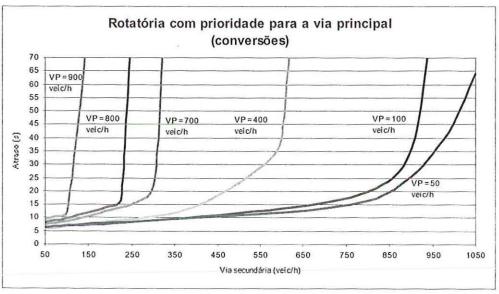


Figura 7.13 – Atraso global na rotatória com prioridade para a via principal, com distribuição do fluxo: 60%, 20%, 20%.

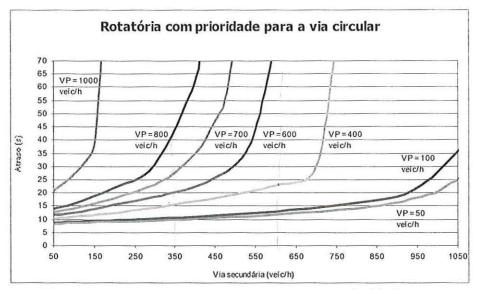


Figura 7.14 – Atraso global na rotatória com prioridade para a via circular, com distribuição do fluxo: 100%, 0%, 0%.

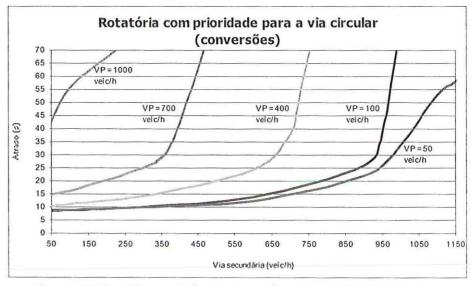


Figura 7.15 – Atraso global na rotatória com prioridade para a via circular, com distribuição do fluxo: 60%, 20%, 20%.

8. AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DOS DISPOSITIVOS

8.1. Níveis de Serviço Baseado no Atraso Crítico

Com base nas curvas do atraso crítico, apresentadas no capítulo 7, e nos valores do atraso correspondentes aos vários níveis de serviço estabelecidos pelo HCM – 2000, indicadas no capítulo 2, foram construídas, para os três dispositivos, as curvas que delimitam a região associada a cada um dos níveis de serviço.

Essas curvas encontram-se nas figuras de 8.1 a 8.6.

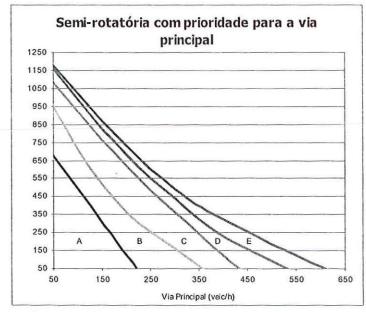


Figura 8.1 — Níveis de serviço baseado no atraso crítico, semi-rotatória com prioridade para a via principal, distribuição dos fluxos: 100%, 0%, 0%.



Figura 8.2 – Níveis de serviço baseado no atraso crítico, semi-rotatória com prioridade para a via principal, distribuição dos fluxos: 60%, 20%, 20%.

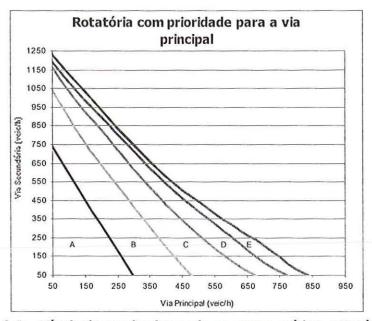


Figura 8.3 – Níveis de serviço baseado no atraso crítico, rotatória com prioridade para a via principal, distribuição dos fluxos: 100%, 0%, 0%.

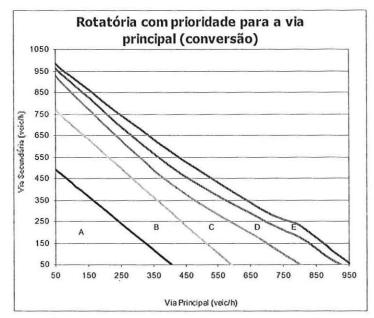


Figura 8.4 – Níveis de serviço baseado no atraso crítico, rotatória com prioridade para a via principal, distribuição dos fluxos: 60%, 20%, 20%.



Figura 8.5 – Níveis de serviço baseado no atraso crítico, rotatória com prioridade para a via circular, distribuição dos fluxos: 100%, 0%, 0%.

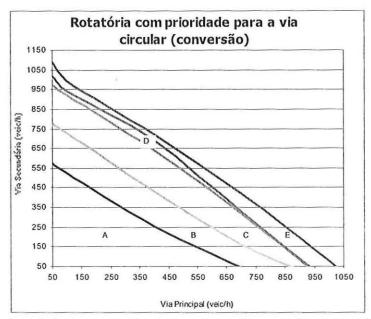


Figura 8.6 – Níveis de serviço baseado no atraso crítico, rotatória com prioridade para a via circular, distribuição dos fluxos: 60%, 20%, 20%.

8.2. Níveis de Serviço Baseados No Atraso Global

Com base nas curvas do atraso global, apresentadas no capítulo 7, e nos valores do atraso correspondentes aos vários níveis de serviço estabelecidos pelo HCM – 2000, indicadas no capítulo 2, foram construídas, para os três dispositivos, as curvas que delimitam a região associada a cada um dos níveis de serviço.

Essas curvas encontram-se nas figuras de 8.7 a 8.12.

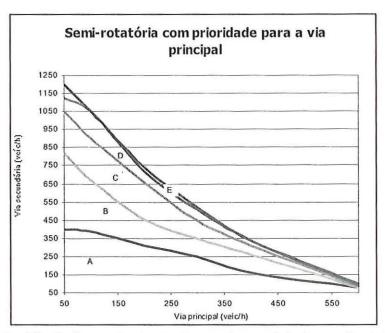


Figura 8.7 – Níveis de serviço baseado no atraso global, ,semi-rotatória com prioridade para a via principal, distribuição dos fluxos: 100%, 0%, 0%.

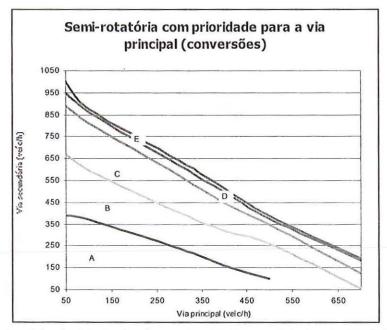


Figura 8.8 – Níveis de serviço baseado no atraso global, semi-rotatória com prioridade para a via principal, distribuição dos fluxos: 60%, 20%, 20%.

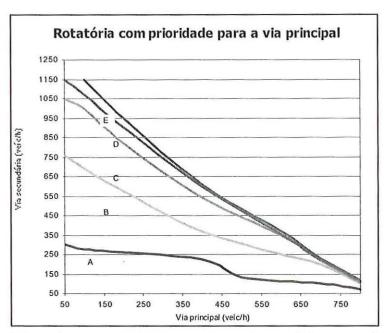


Figura 8.9 – Níveis de serviço baseado no atraso global, rotatória com prioridade para a via principal, distribuição dos fluxos: 100%, 0%, 0%.

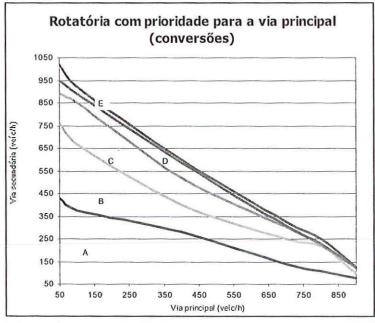


Figura 8.10 – Níveis de serviço baseado no atraso global, rotatória com prioridade para a via principal, distribuição dos fluxos: 60%, 20%, 20%.

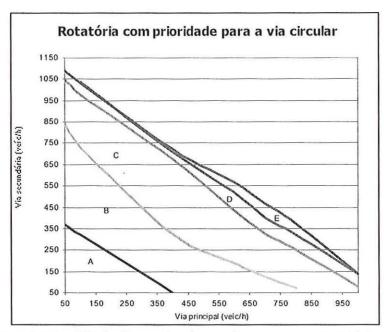


Figura 8.11 — Níveis de serviço baseado no atraso, rotatória com prioridade para a via circular, distribuição dos fluxos: 100%, 0%, 0%.

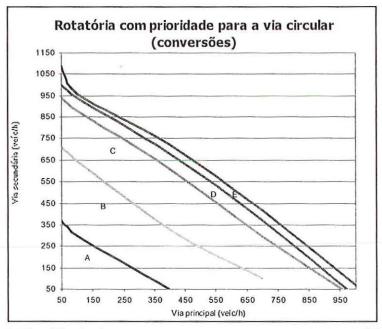


Figura 8.12 – Níveis de serviço baseado no atraso global, rotatória com prioridade para a via circular, distribuição dos fluxos: 60%, 20%, 20%.

8.3. Comparação do Desempenho dos Dispositivos

8.3.1. Sob o critério do atraso crítico

As figuras de 8.13 a 8.18 mostram os gráficos comparativos considerando os níveis de serviço A, C e E (capacidade), sob o critério do atraso crítico.

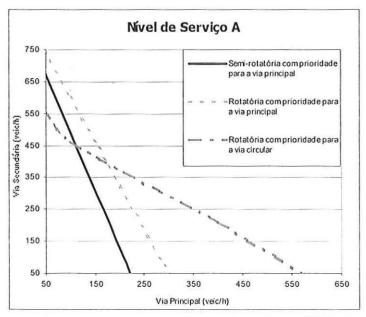


Figura 8.13 – Comparação do desempenho sob o critério do atraso crítico para nível de serviço A, distribuição dos fluxos: 100%, 0%.

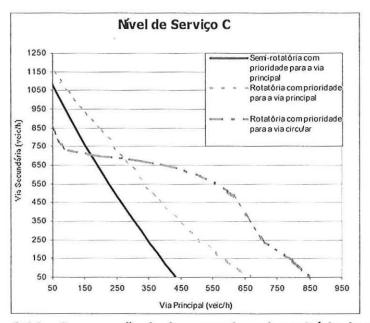


Figura 8.14 – Comparação do desempenho sob o critério do atraso crítico para nível de serviço C, distribuição dos fluxos: 100%, 0%, 0%.

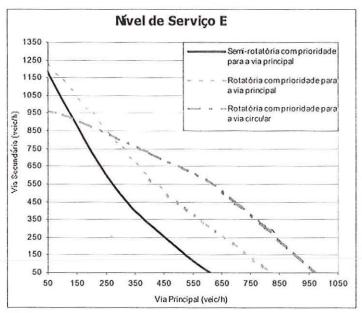


Figura 8.15 – Comparação do desempenho sob o critério do atraso crítico para nível de serviço E, distribuição dos fluxos: 100%, 0%, 0%.

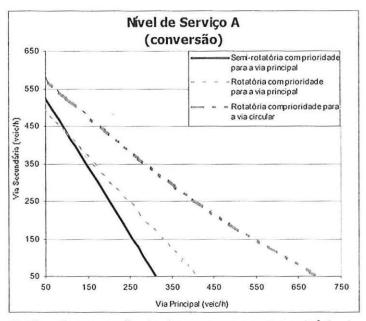


Figura 8.16 – Comparação do desempenho sob o critério do atraso crítico para nível de serviço A, distribuição dos fluxos: 60%, 20%, 20%.

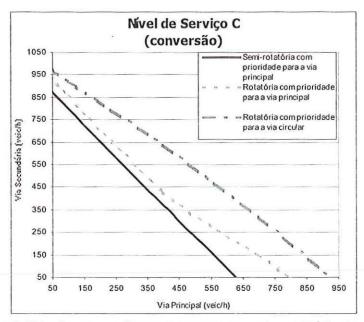


Figura 8.17 – Comparação do desempenho sob o critério do atraso crítico para nível de serviço C, distribuição dos fluxos: 60%, 20%, 20%.

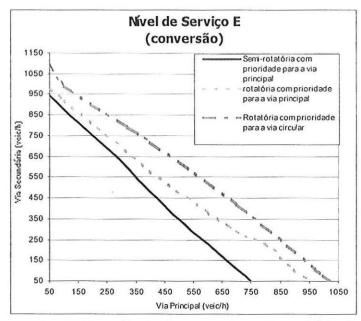


Figura 8.18 – Comparação do desempenho sob o critério do atraso crítico para nível de serviço E, distribuição dos fluxos: 60%, 20%, 20%.

8.3.2. Sob o critério do atraso global

As figuras de 8.19 a 8.24 mostram os gráficos comparativos considerando os níveis de serviço A, C e E (capacidade), sob o critério do atraso global.

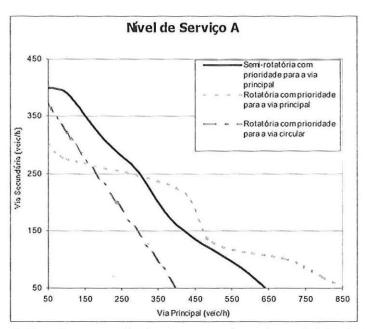


Figura 8.19 — Comparação do desempenho sob o critério do atraso global para nível de serviço A, distribuição dos fluxos: 100%, 0%, 0%.

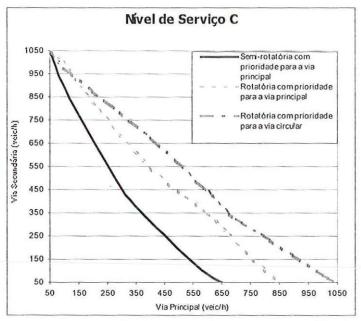


Figura 8.20 — Comparação do desempenho sob o critério do atraso global para nível de serviço C, distribuição dos fluxos: 100%, 0%, 0%.

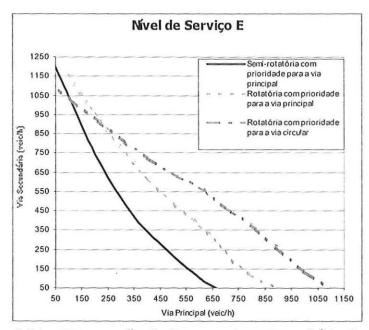


Figura 8.21 – Comparação do desempenho sob o critério do atraso global para nível de serviço E, distribuição dos fluxos: 100%, 0%, 0%.

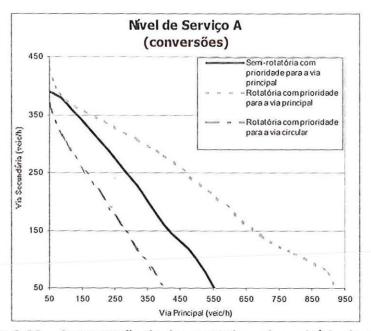


Figura 8.22 – Comparação do desempenho sob o critério do atraso global para nível de serviço A, distribuição dos fluxos: 60%, 20%, 20%.

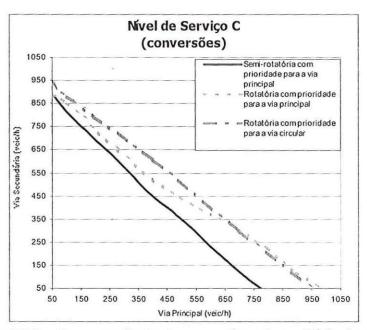


Figura 8.23 – Comparação do desempenho sob o critério do atraso global para nível de serviço C, distribuição dos fluxos: 60%, 20%, 20%.

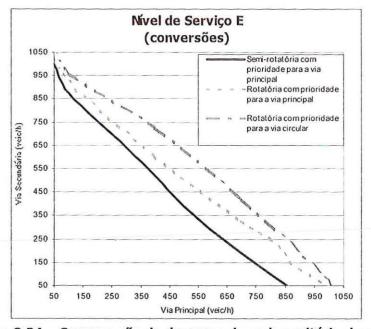


Figura 8.24 – Comparação do desempenho sob o critério do atraso global para nível de serviço E, distribuição dos fluxos: 60%, 20%,20%.

8.4. Análise comparativa do desempenho dos dispositivos

A análise comparativa do desempenho foi realizada para os nível de serviço "E", que corresponde à capacidade, e para o nível de serviço "C", que corresponde á operação com qualidade regular e é o nível recomendado como referência para o dimensionamento de componentes do sistema viário nos períodos de pico.

Para permitir o confronto entre os valores relativos ao atraso crítico e ao atraso global, nas análises efetuadas os valores correspondentes ao atraso global foram colocados entre parênteses após os valores do atraso crítico.

Cabe colocar que o critério do atraso crítico expressa a qualidade da operação para os veículos da via secundária; enquanto o critério do atraso global expressa a qualidade da operação para todos os veículos, estejam eles na via secundária ou na principal.

8.4.1. Nível de serviço E (capacidade)

Para a situação sem conversões, até um fluxo total na via principal de 540 (500) veíc/h o dispositivo mais indicado é a rotatória com prioridade para a via principal; a partir daí a rotatória com prioridade para a via circular. Para a situação com conversões, a rotatória com prioridade para a via circular é a mais indicada para qualquer valor do fluxo total na via principal.

Para um fluxo total de 100 veíc/h na via principal (valor bastante baixo), os valores limites do fluxo por sentido na via secundária para operação com nível de serviço E (capacidade) são os seguintes: 1180 (1180) veíc/h sem conversões e 940 (870) veíc/h com conversões na semi-rotatória com prioridade para a via principal; 950 (1250) veíc/h sem conversões e 970 (880) veíc/h com conversões na rotatória com prioridade para a via principal; 1230 (1070) veíc/h sem conversões e 1080 (950) veíc/h com conversões na rotatória com prioridade para a via circular.

Para permitir a passagem de 50 veíc/h por sentido na via secundária, os valores limites do fluxo total na via principal são os seguintes: 1200 (1340) veíc/h sem conversões e 1500 (1720) veíc/h com conversões na semi-rotatória com prioridade para a via principal; 1700 (1800) veíc/h sem conversões e 1900 (1960) veíc/h com conversões na rotatória com prioridade para a via principal; 1940 (2200) veíc/h sem conversões e 2060 (2000) veíc/h com conversões na rotatória com prioridade para a via circular.

Considerando um fluxo total na via principal de 1000 veíc/h, os valores limites do fluxo por sentido na via secundária para operação com nível de serviço E (capacidade) são: 180 (210) veíc/h sem conversões e 350 (370) veíc/h com conversões na semi-rotatória com prioridade para a via principal; 450 (470) veíc/h sem conversões e 460 (510) com conversões na rotatória com prioridade para a via principal; 650 (640) veíc/h sem conversões e 630 (630) com conversões na rotatória com prioridade para a via circular.

8.4.2. Nível de serviço C

Sob o critério do atraso crítico, ocorre o seguinte: para a situação sem conversões, até um fluxo total na via principal de 560 veíc/h o dispositivo mais indicado é a rotatória com prioridade para a via principal e a partir daí a rotatória com prioridade para a via circular; para a situação com conversões, a rotatória com prioridade para a via circular é a mais indicada para qualquer valor do fluxo total na via principal.

Sob o critério do atraso global, ocorre o seguinte: para a situação sem conversões, até um fluxo total na via principal de 260 veíc/h o dispositivo mais indicado é a rotatória com prioridade para a via principal e a partir daí a rotatória com prioridade para a via circular; para a situação com conversões, a rotatória com prioridade para a via circular é a mais indicada para qualquer valor do fluxo total na via principal.

Para um fluxo total de 100 veíc/h na via principal (valor bastante baixo), os valores limites do fluxo por sentido na via secundária para operação com nível de serviço C são os seguintes: 1070 (1030) veíc/h sem conversões e 870 (880) veíc/h com conversões na semi-rotatória com prioridade para a via principal; 1160 (1050) veíc/h sem conversões e 910 (880) veíc/h com conversões na rotatória com prioridade para a via principal; 850 (1000) veíc/h sem conversões e 970 (950) veíc/h com conversões na rotatória com prioridade para a via circular.

Para permitir a passagem de 50 veíc/h por sentido na via secundária, os valores limites do fluxo total na via principal para nível de serviço C são os seguintes: 860 (1280) veíc/h sem conversões e 1260 (1400) veíc/h com conversões na semi-rotatória com prioridade para a via principal; 1320 (1700) veíc/h sem conversões e 1600 (1900) veíc/h com conversões na rotatória com prioridade para a via principal; 1700 (2100) veíc/h sem conversões e 1880 (1900) veíc/h com conversões na rotatória com prioridade para a via circular.

Considerando um fluxo total na via principal de 800 veíc/h, os valores limites do fluxo por sentido na via secundária para operação com nível de serviço C são: 150 (320) veíc/h sem conversões e 360 (450) veíc/h com conversões na semirotatória com prioridade para a via principal; 430 (560) veíc/h sem conversões e 430 (510) com conversões na rotatória com prioridade para a via principal; 660 (680) veíc/h sem conversões e 630 (630) com conversões na rotatória com prioridade para a via circular.

8.4.3. Conclusões

Nas análises feitas, os valores relativos ao atraso crítico e ao atraso global, na maioria dos casos, não apresentam diferenças significativas.

Qualquer que seja o critério adotado, as análises realizadas e os gráficos comparativos dos níveis de serviço "C" e "E" mostram os seguintes aspectos genéricos:

- Exceto para fluxos muito baixos na via principal e movimento sem conversões, a rotatória com prioridade para a via circular apresenta desempenho superior às demais. Para fluxos altos na via principal, a diferença de desempenho é extremamente grande.
- Exceto para fluxos baixos na via principal e movimento sem conversões, a rotatória com prioridade para a via principal apresenta desempenho superior ao da semi-rotatória com prioridade para a via principal. Para fluxos altos na via principal, a diferença de desempenho é bastante significativa.
- Como na maioria dos casos reais, os fluxos na via principal nos horários de pico são relativamente altos e os movimentos de conversão são significativos, o desempenho da rotatória com prioridade para a via principal é superior aos das demais; e o desempenho da rotatória com prioridade para a via principal superior ao da semi-rotatória com prioridade para a via principal.

9. CONSIDERAÇÕES FINAIS

9.1. Sobre o Emprego de Simuladores de Tráfego

Os simuladores de tráfego constituem uma ferramenta extremamente útil no processo de avaliação de alternativas de operação de um cruzamento, de um dispositivo viário, de um trecho de via ou de um conjunto de trechos de vias.

Contudo, a geração de cenários adequados depende do conhecimento e da experiência do engenheiro de tráfego.

No planejamento e no projeto da operação do sistema viário ambos são fundamentais: o engenheiro de tráfego competente e o ferramental técnico adequado (onde se incluem os simuladores de tráfego).

9.2. Sobre o Uso do Simulador Integration na Simulação de Dispositivos Viários

O simulador Integration mostrou ser uma ferramenta computacional bastante útil na simulação da operação de dispositivos viários.

Apresenta, contudo, a restrição de que os comprimentos dos tramos devem ser superiores a um valor mínimo definido em função da velocidade e do intervalo crítico.

A análise dos casos simples realizada no capítulo 6 mostra que os resultados obtidos com o simulador Integration são similares aos apresentados

por modelos analíticos de avaliação do desempenho de cruzamentos não semaforizados (com sinal de "parada obrigatória" ou "dê a preferência").

Essas constatações permitem recomendar o emprego do simulador INTEGRATION na prática, como uma importante ferramenta para os engenheiros de tráfego na busca de cenários que proporcionem maior fluidez no trânsito de veículos e, via de conseqüência, o uma melhor qualidade da operação (comodidade os usuários).

9.3. Sobre a Comparação do Desempenho dos Principais Dispositivos Rodoviários

Os resultados do estudo comparativos permitem destacar os seguintes aspectos genéricos:

Exceto para fluxos muito baixos na via principal e movimento sem conversões, a rotatória com prioridade para a via circular apresenta desempenho superior às demais. Para fluxos altos na via principal, a diferença de desempenho é extremamente grande.

Exceto para fluxos baixos na via principal e movimento sem conversões, a rotatória com prioridade para a via principal apresenta desempenho superior ao da semi-rotatória com prioridade para a via principal. Para fluxos altos na via principal, a diferença de desempenho é bastante significativa.

Como na maioria dos casos reais, os fluxos na via principal nos horários de pico são relativamente altos e os movimentos de conversão são significativos, o desempenho da rotatória com prioridade para a via principal é superior aos das demais; e o desempenho da rotatória com prioridade para a via principal superior ao da semi-rotatória com prioridade para a via principal.

9.4. Sobre Novas Pesquisas Acerca do Tema

Neste trabalho a comparação do desempenho dos principais dispositivos rodoviários em nível ficou restrita à qualidade da operação (nível de serviço) e à capacidade.

Contudo, diversos outros aspectos são importantes na avaliação do desempenho desses dispositivos, como a segurança (índice global de acidentes e índice de acidentes graves), o impacto no meio ambiente (emissão de poluentes e consumo de combustível), o custo de implantação e manutenção, etc. Esses são aspectos de grande relevância que se recomenda sejam abordados em outros estudos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AASHTO (1994). *A Policy on Geometric Design of Highways and Streets*.

 American Association of State Highway and Transportation Officials,

 Washigton, D. C. p. 627 803.
- Al-Kaisy, A. F.; Stewart, J. A.; Van Aerde, M. (1999). *Microscopic Simulation of Lane Changing Behaviour at Freeway Weaving Section*. Canadian Journal of Civil Engineering, v. 26 p 197-207.
- Araújo, J. J. (2001). *Características Operacionais de Praças de Arrecadação de Pedágio*. Dissertação (Mestrado). EESC USP. São Carlos, SP.
- Boxill, S. A.; Yu, L. (2000). *An Evaluation of Traffic Simulation Models fo Supporting ITS Devolopment* (http://swutc.tamu.edu/reports.html acessado em 18/11/02).
- Brasil, Leis (1997). Código de Trânsito Brasileiro. Lei n.º 9.503 de 23 de setembro de 1997.
- Demarchi, S. H. (2002). *Uma Nova Formulação para o Modelo Fluxo-Velocidade- Densidade de Van Aerde*. In: Anais do XVI Congresso Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes. v.1, p. 313-324.
- Demarchi, S. H. (2000). *Influência dos veículos pesados na capacidade e nível de serviço de rodovias de pista dupla*. Tese (Doutorado). EESC USP. São Carlos, SP.

- Demarchi, S. H.; Setti, J. R. A. (2000). *Desempenho de Caminhões em Rampas Ascendentes*. In: Transporte em Transformação, ed. 1, São Paulo, Makron Books, v.3, p. 79-94.
- Egami, C. Y. (2000). Recalibração de um Modelo para Simulação do Tráfego em Rodovias de Pista Simples. Dissertação (Mestrado). EESC USP. São Carlos, SP.
- Ferraz, A. C. P.; Fortes, F. Q.; Simões F. A. (1999). *Engenharia de Tráfego*. Fundamentos Práticos. EESC USP, São Carlos, SP.
- Françoso, M. T. (1990). *Estudo sobre Semáforos Isolados com Tempos Fixos*.

 Dissertação (Mestrado). EESC USP. São Carlos, SP.
- Hellinga, B.; Van Aerde, M. (1994) *An Overview of a Simulation Study of the Highway 401 Freeway Traffic Management System*. Canadian Journal of Civil Engineering, v. 21 p 439-454.
- Jagannathan, R. e Khan, A. M. (2001). Methodology for the Assessment of Traffic Adaptive Control Systems. Journal of Transportation Engineering, Vol. 71, No. 6, 2001, p. 28-33.
- Law, A. M.; Kelton, W. D. (2000). Simulation Modeling & Analysis. New York, McGraw-Hill, Inc.
- Maiolino, C. E. G. e Portugal, L. D. S. (2001) Simuladores de Tráfego para Análise do Desempenho de ônibus e de sua Área de Influência. Anais do XV ANPET, Campinas – SP, v.1, p. 257-264.
- McLean, J. R. (1989) *Two-Lane Highway Traffic Operations Theory and Practice*. New York, Gorodon and Breach Science Publishers.

- Prevedouros, P. D. e Li, H. (2000). *Comparison of freeway simulation with INTEGRATION, KRONOS, and KWaves.* Transportation Research Circular E-C018 (http://nationalacademies.org/trb/publications/ec018/ec018.pdf, acessado em 10/06/2002).
- Robertson, D. I. (1986). *Research on the Transyt and Scoot Methods of Signal Coordination*. Journal of Transportation Engineering, p. 36-40.
- Rakha, H. (2001). INTEGRATION Release 2.30: User's Guide Volume I e II: Fundamental Model Features. 18 Kenwoods Circle, Kingston, Ontario-Canada.
- Rakha, H. *et al* (2002). *Estimating Vehicle Consumption and Emissions Based on Instantaneous Speed and Acceleration Levels*. Journal of Transportation Engineering. v. 128 n.2 p182-190
- Sabra, Z; Wallace, C. E.; Lin, F.(2000) *Traffic Analysis Software Tools,*Transportation Research Circular *E-C014,*(http://nationalacademies.org/trb/publications/circulars/ec014.pdf,
 acessado em: 10/06/2002)
- Setti, J. R. A. (1994). *Introdução à Simulação Discreta de Sistemas*. EESC USP. São Carlos, SP.
- Setti, J. R. A. (1997). *Capacidade e Nível de Serviço de Rodovias de Pista Simples*. Tese (Livre-Docência), EESC USP. São Carlos, SP.
- Setti, J. R. A. (2001). *Fluxo de veículos e capacidade viária.* EESC, USP. São Carlos, SP.

- Sektion Trafik (1995). CAPCAL 2: Model description of Intersection without signal control. Swedish National Road Administration. Borlänge, Sweden.
- Silveira, A. (1992). *Um modelo para simulação das alternativas viárias de conversão à esquerda.* Tese (Doutorado). EESC USP. São Carlos, SP.
- Tanner, J. C. (1962). *A theoretical analysis of delay at an uncontrolled intersection*. Biometrika, n.° 49, p. 163-170
- Tapia, S. C. L (2003). Avaliação de Alternativas de Operação de um Trecho de Via Semaforizado Utilizando o Simulador Integration. Dissertação (Mestrado). EESC USP. São Carlos, SP.
- TRB (1985) *Highway Capacity Manual*. Special Report 209, Tranportation Research Board, National Research Council. Washington, DC, EUA., 2^a edição.
- TRB (2000). *Highway Capacity Manual*. Special Report 210, 4^a edição, Tranportation Research Board, National Research Council. Washington, DC, EUA. Chapter 17 & 24.
- Van Aerde, M. (1997). INTEGRATION Realease 2.10: User's Guide Volume I e

 II: Fundamental Model Features. 18 Kenwoods Circle, Kingston, OntarioCanada.
- Xerez, R. M.(2002). Método Comparativo de Desempenho para Interseções em Interseções em Nível de Rodovia de Pista Simples. Dissertação (Mestrado). EESC – USP. São Carlos, SP.

Anexo A -Integration

A.1. Arquivo mestre

O arquivo mestre contém a listagem do tempo de simulação, dos nomes dos arquivos principais, o nome do arquivo de resultados e diretórios onde se localizam os arquivos.

Rotator	ia			
7200	1800	0	1	0
1				
output\	i.			
file1.da	t			
file2.da				
file3.da				
file4.da				
file5.da	t			
none				
none				
none			4	
none				
output.				
file11.o	ut			
none				
none				

Linha	Coluna	Descrição					
1	1	Identificação do cenário simulado (até 40 caracteres)					
	1	Tempo total de simulação (s)					
	2	Frequência de geração dos resultados para o arquivo de resultados (s) (0 < x < tempo de simulação)					
	Frequência de geração dos resultados para arquivos 12 – 14 (0 < x < tempo de simulação)						
2	4	Opção de escolha de rota (1, 2 ou 3) x = 1: modelo de alocação dinâmica do tráfego x = 2: alocação baseada no formato de versões anteriores a 2.30 x = 3: alocação baseada em formato expandido (opção recomendada: x = 1)					
	5	variável para fim de simulação (recomendado x = 1)					
3	1	Diretório em que estão os arquivos de entrada de dados					
4	1	Diretório em que são gerados os arquivos de resultados					
5	1	Nome do arquivo 1 (nós)					
6	1	Nome do arquivo 2 (tramos)					
7	1	Nome do arquivo 3 (semáforos)					
8	1	Nome do arquivo 4 (demandas)					
9	1	Nome do arquivo 5 (incidentes)					
14	1	Nome do arquivo de resultados					
15 - 27	1	Nomes de arquivos opcionais ou utilizar "none"					

A.2. Arquivo de nós

Este arquivo contém as coordenadas dos nós da rede simulada, definindo quais nós constituem origem ou destinos das demandas geradas.

file1-	Arquivo	de Nos					
16	1	1					
1	0.1	0.6	1	-1	0	0	
2	0.6	0.1	1	-2	0	0	
3	0.6	1.1	1	-3	0	0	
4	1.1	0.6	1	-4	0	0	
3 4	200 (67		1	-	0	0	
ante do arquivo n	arguivo n	1	ão apre	sentad	0		

Tabela A.1: Descrição dos dados contidos no arquivo de nós

Linha	Coluna	Descrição
1	1	Nome do arquivo (até 40 caracteres)
	1	Número de nós no arquivo
2	2	Fator de conversão das coordenadas x
	3	Fator de conversão das coordenadas y
	1	Número identificador do nó
	2	Coordenada x (x > 0)
	3	Coordenada y (y > 0)
3 e restantes	4	Tipo de nó 1: nó de origem e destino 2: nó de destino somente 3: nó de origem somente 4: nó intermediário
	5	Identificador de macro-zonasn para nós do tipo 1 e 2 (n é o número identificador do nó) 0 para nós dos tipos 3 e 4
	6	
	7	Descrição alfanumérica do nó (opcional)

Arquivo de tramos

Este arquivo contém as informações sobre os tramos, tais como seu comprimento, os nós de origem e destino e os parâmetros que definem a relação fluxo-velocidade.

Tabela A.2: Descrição dos dados contidos no arquivo de tramos

		2: Descrição dos dados contidos no arquivo de tramos						
Linha		Descrição						
1	1	Nome do arquivo (até 40 caracteres)						
	1	Número de tramos no arquivo						
2		Fatores de conversão para comprimento do tramo, velocidade de						
	2 - 6	fluxo livre, capacidade, velocidade na capacidade e densidade de						
		congestionamento						
		Número identificador do tramo. Se o número for negativo, os						
	1	resultados referentes ao tramo não serão impressos no arquivo de						
	2	resultados						
		Nó inicial ou de origem do tramo (codificado no arquivo de nós)						
	3	Nó final do tramo (codificado no arquivo de nós) Comprimento do tramo (km)						
	1							
	1	(comprimento mínimo $\le x \le 6$)						
		comprimento mínimo = 0,010 × número de faixas no tramo						
	5	Velocidade de fluxo livre (km/h) $(10 \le x \le 200)$						
Linha C 1 1 2 3 3 4 5 6 7 8 9 1 1 1 1 1 1 1 1 1								
	6	Fluxo correspondente à capacidade (veíc/h/faixa) $(100 \le x \le 10000)$						
		Número de faixas						
	7	$(1 \le x \le 7)$						
	Ω	Coeficiente de variação (desvio-padrão/média) da velocidade						
	0	Velocidade na capacidade (km/h)						
	9							
	10	(10 ≤ x ≤ velocidade de fluxo livre) Densidade de congestionamento (veíc/km/faixa)						
	10	Proibição de conversões						
	11	x = 0: sem proibição de conversões						
	11	x > 0: conversões são proibidas do tramo atual para o tramo x						
3.6	12	tempo de simulação em que a proibição na coluna 11 é ativada						
	13	tempo de simulação em que a proibição na coluna 12 é desativada						
restarres	13	número do primeiro tramo com prioridade de movimento sobre o						
		tramo em questão						
	14	x = 0: nenhum tipo de prioridade é definida						
		x > 0: veículos no tramo x têm prioridade de movimento						
		número do segundo tramo com prioridade de movimento sobre o						
		tramo em questão						
	15	x = 0: nenhum tipo de prioridade é definida						
		x > 0: veículos no tramo x têm prioridade de movimento						
		Sinal de tráfego que controla a saída dos veículos do tramo						
3 e restantes		x = 0: nenhum sinal é utilizado						
		x > 0: o semáforo x controla a saída do tramo						
	16	x < 0: o semáforo x controla a saída do tramo e os veículos podem						
		fazer conversões à direita com o sinal vermelho						
		x = 10001: modela um sinal do tipo PARE						
		x = 10002: modela um sinal do tipo DÊ A PREFERÊNCIA						
	17	número da primeira fase do semáforo utilizada pelo fluxo de veículos						
	18	número da segunda fase do semáforo utilizada pelo fluxo de veículos						
	19	indicador de proibição de classes veiculares no tramo						
		(ex: 10100 proíbe o tráfego dos veículos das classes 1 e 5 no tramo)						
	20							
		Descrição alfanumérica do tramo (opcional)						

A.3. Arquivo de Semáforos

O arquivo de semáforos é necessário para a simulação, mas não contém dados. A linha 1 pode conter uma identificação do arquivo e a linha 2 deve conter somente um "0".

file3-Arquivo de Semaforos	
0	****

Tabela A.3: Descrição dos dados contidos no arquivo de semáforos

Та	bela A.3:	Descrição dos dados contidos no arquivo de semaforos						
Linha	Coluna	Descrição						
1	1	Nome do arquivo (até 40 caracteres)						
	1	Número de semáforos na rede						
2	2	Número de planos para cada semáforo						
2	3	Duração de cada plano						
2	3	$(x \ge 60$, sendo x um múltiplo de 60)						
3	 (x ≥ 60, sendo x um múltiplo de 60) Número do plano semafórico Número identificador do semáforo Tempo de ciclo a ser utilizado no início da simulação (s) Tempo mínimo de ciclo permitido, no caso do ciclo ser otimizado durante a simulação 							
	1	Número identificador do semáforo						
	2	Tempo de ciclo a ser utilizado no início da simulação (s)						
	3	Tempo mínimo de ciclo permitido, no caso do ciclo ser otimizado						
	4	Tempo máximo de ciclo permitido, no caso do ciclo ser otimizado durante a simulação						
20	5	Tempo de início da primeira fase (defasagem), em segundos						
4 e		Número de fases do semáforo						
restantes	6	$(2 \le x \le 8)$						
	Para cad	a uma das fases especificada na coluna 6, duas colunas são						
	necessár	ias						
		Tempo de verde efetivo da fase (s)						
		Tempo perdido na fase (s)						
	última	Intervalo de tempo correspondente à otimização semafórica						
	ultilla	$(x \ge 60$, sendo x um múltiplo de 60)						

A.4. Arquivo de demanda

Este arquivo contém os fluxos horários de cada veículo a ser gerado durante o período de simulação e os espaçamentos equivalentes dos veículos.

-1	2	-	0		0		1			1		1			1			1	1	
1	1	2	50	1	0	7	200	1	0	0	0	0	1	1	1	1				
2	1	4	110	00	1	0	72	00	1	0	0	0	0	1	1	1	1			
3	1	3	501	10	0	1	0	720	0	1	0	0	0	0	1	1	1	1		

Tabela A.4: Descrição dos dados contidos no arquivo de demandas

Linha	Coluna	Descrição dos dados contidos no arquivo de demandas Descrição
1	1	Nome do arquivo (até 40 caracteres)
2	1	Número de demandas geradas. Se um sinal negativo for utilizado, as demandas são associadas aos parâmetros veiculares listados no arquivo "maxi_acc.dat"
	2	número do primeiro par O-D utilizado na simulação se $x = 0$, $x = 1$
	3	número do último par O-D utilizado na simulação se $x = 0$, $x =$ último par listado no arquivo
	4	Fator global de conversão das demandas
	5 – 9	Fatores individuais de conversão de demandas, para veículos das categorias 1 a 5
	1	Número identificador da demanda
	2	Nó de origem da demanda
	3	Nó de destino da demanda
	4	Valor da demanda (veíc/h)
	5	Porcentagem de headways com distribuição exponencial
	6	Tempo (s) de início da demanda
3 e	7	Tempo (s) de término da demanda
restantes	8 – 12	Porcentagem da demanda composta por veículos da categoria <i>i.</i> Sinais negativos indicam que o veículo tem uma cor distinta. Sinais positivos indicam que a cor do veículo varia com sua velocidade
	13	Porcentagem da demanda total atuando como veículos "sonda", de forma a gerar os resultados nos arquivos opcionais 15 e/ou 16
	14	Fator de equivalência entre espaçamentos $(0,5 \le x \le 10,0)$
	15	Número de passageiros por veículo. Parâmetro utilizado para o cálculo do atraso aos passageiros
	16	Indentificador utilizado para associar cada demanda com o tipo de veículo listado no arquivo de parâmetros veiculares

A.5. Arquivo de Incidentes

O arquivo de incidentes, assim como o arquivo de semáforos, é necessário para a simulação, mas não precisa conter dados.

Arquivo de incidentes	.0.
0	

Tabela A.5: Descrição dos dados contidos no arquivo de incidentes

Linha	Coluna	Descrição
1	1	Nome do arquivo (até 40 caracteres)
2	1	Número de incidentes simulados
	1	Número identificador do incidente
	2	Número do tramo em que o incidente ocorre
	3	Local de início do incidente, medido a partir do nó a montante do tramo (km)
	4	Local de término do incidente, medido a partir do nó a montante do tramo (km)
3 e	5	Instante de início do incidente (s)
restantes	6	Instante de término do incidente (s)
	7	número de faixas bloqueadas. Número binário referente às faixas de tráfego (do canteiro central para o acostamento) 0: faixa livre 1: faixa bloqueada (ex: 011 indica faixa próxima ao canteiro central livre, faixa central bloqueada e faixa próxima ao acostamento bloqueada)

A.6. Arquivo de Parâmetros Veiculares (maxi_acc.dat)

Neste arquivo devem ser colocados os parâmetros que permitem a modelagem do desempenho de cada categoria de veículos. A identificação dos veículos deve estar associada à numeração adotada no arquivo de demandas.

m	axi_aco	0									
1	1										
1	1180	4	0.5	0.6	68	0.87	0.3	21.2	0.0125	7.6	

Tabela A.6: Descrição dos dados do arquivo de parâmetros veiculares

Linha	Coluna	Descrição
1	1	Nome do arquivo (até 40 caracteres)
P112,	1	Número de veículos definidos no arquivo
2	Percentual da Se $a = 0.5$, se	Percentual da aceleração efetivamente utilizada pelo veículo. Se $a=0.5$, somente 50% da aceleração calculada pelo modelo de desempenho é utilizada pelo veículo
3 e restantes	1	Número identificador do veículo (deve corresponder aos números listados na coluna 16 do arquivo de demandas)
	2	Massa do veículo (kg)
	3	Comprimento (m)
	4	Porcentagem da massa veicular no(s) eixo(s) trator(es)
	5	Coeficiente estático de atrito pneu-pavimento
	6	Potência nominal do motor (kW)
	7	Coeficiente de eficiência da transmissão
	8	Coeficiente de atrito aerodinâmico
	9	Área frontal (m²)
	10	Coeficiente de rolamento
	11	Constante para tipo de pneu (C ₂)
	12	Constante para tipo de pneu (C ₃)

A.7. Arquivo de intervalo crítico

Este arquivo permite o usuário especificar o intervalo crítico.

Tabela A.7: Descrição dos dados do arquivo de intervalo crítico

Linha	Coluna	Descrição
1	1	Nome do arquivo (até 40 caracteres)
2	1	Número intervalos críticos definidos no arquivo
	2	Valor base de intervalo crítico (seg)
	3	Tempo de término (seg)
	4	Coeficiente de variação
3 e restantes	1	Número identificador do tramo com intervalo crítico
	2	Número do primeiro tramo oposto
	3	Primeiro valor de intervalo crítico (seg)
	4	Número do segundo tramo oposto
	5	Segundo valor de intervalo crítico (seg)
	6	Número do terceiro tramo oposto
	7	Terceiro valor de intervalo crítico (seg)
	8	Número do quarto tramo oposto
	9	Quarto valor de intervalo crítico (seg)
	10	Número do quinto tramo oposto
	11	Quinto valor de intervalo crítico (seg)

A.8. Arquivo de Resultados

Este arquivo apresenta os resultados detalhados das estatísticas dos tramos, viagens, incidentes, otimização de sinais. Contudo neste trabalho fez-se o uso do seguinte arquivo adicional de resultado: arquivo 11 (Condições médias de tráfego em cada tramo).

Tabela A.8: Descrição dos dados do arquivo de intervalo crítico

Linha	Coluna	Descrição
1	1	Tempo de simulação (seg)
	2	Número de identificação do veículo
	3	Classe veicular
	4	Número do tramo
	5	Tempo decorrido (seg)

