



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAIBA
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
CURSO DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL
CAMPUS II — CAMPINA GRANDE

CAPACIDADE DE INTERSEÇÕES
COM CONTROLE POR PRIORIDADE

por

NILTON PEREIRA DE ANDRADE

CAMPINA GRANDE

JULHO - 1987

CAPACIDADE DE INTERSEÇÕES
COM CONTROLE POR PRIORIDADE

NILTON PEREIRA DE ANDRADE

**CAPACIDADE DE INTERSEÇÕES
COM CONTROLE POR PRIORIDADE**

Dissertação apresentada ao CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA EM ENGENHARIA CIVIL da Universidade Federal da Paraíba, em cumprimento às exigências para obtenção do Grau de Mestre em Ciências (M.Sc.).

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: TRANSPORTES

WALTER SANTA CRUZ

Orientador

**DIGITALIZAÇÃO:
SISTEMOTECA - UFCG**

CAMPINA GRANDE

JULHO - 1987

A minha querida mãe

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Walter Santa Cruz pela dedicação, assistência e orientação prestadas na elaboração deste trabalho.

À minha irmã Maria José Andrade Pereira (Zezé) e ao Dr. Ivan Rocha Neto pelo incentivo e apoio prestados, indispensáveis à realização deste curso.

Ao Professor Élio Santana Fontes pelas críticas, discussões e atenção dispensadas, de grande importância para este estudo.

Ao Professor Koshi Yamamoto pela gentileza em participar da banca examinadora na defesa final.

Aos funcionários Vandenberg dos Santos (Siriguela) e Josete de Souza Barros pelos valiosos serviços prestados.

A todos que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

CAPACIDADE DE INTERSEÇÕES
COM CONTROLE POR PRIORIDADE

NILTON PEREIRA DE ANDRADE

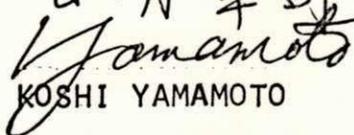
DISSERTAÇÃO APROVADA EM 20/07/87

Walter Santa Cruz
WALTER SANTA CRUZ

Orientador


ÉLIO SANTANA FONTES

Examinador Interno

山本幸司

KOSHI YAMAMOTO

Examinador Externo

CAMPINA GRANDE

JULHO - 1987

CAPACIDADE DE INTERSEÇÕES
COM CONTROLE POR PRIORIDADE

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

POR

NILTON PEREIRA DE ANDRADE

R E S U M O

Este trabalho tem como objetivo o estudo sobre capacidade de interseções com controle por prioridade.

São apresentados métodos de cálculo de capacidade para interseções com esse tipo de controle e realizadas aplicações e discussões dos resultados obtidos.

CAPACITY OF INTERSECTIONS
WITH PRIORITY CONTROL

M.Sc. DISSERTATION

BY

NILTON PEREIRA DE ANDRADE

ABSTRACT

The objective of this work is to study about the capacity of intersections with priority control.

It has been showed some methods to calculate the capacity of the intersections with this type of control as well as applications and discussions of the obtained results.

ÍNDICE

	Pág.
CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO	01
1.1 - Apresentação do Problema	01
1.2 - Justificativa do Trabalho	02
1.3 - Objetivos	03
1.4 - Estrutura do Trabalho	03
CAPÍTULO II - MÉTODOS DE CÁLCULO DE CAPACIDADE	05
2.1 - Introdução	05
2.2 - Considerações Gerais	05
2.2.1 - Controle Por Prioridade	05
2.2.2 - Capacidade	06
2.3 - O Método Alemão	08
2.3.1 - Capacidade Para um Fluxo de 2 ^a Or- dem	09
2.3.2 - Capacidade Para um Fluxo de 3 ^a Or- dem	11
2.3.3 - Capacidade Para um Fluxo de 4 ^a Or- dem	12
2.3.4 - Capacidade Para Fluxos Mistos	13
2.3.5 - Capacidade Prática	14
2.4 - O Método Inglês	15

	Pág.
2.4.1 - Volume Conflitante	17
2.4.2 - Intervalos Críticos	17
2.4.3 - Capacidade	17
2.5 - O Método Americano	17
2.5.1 - Intervalos Críticos	20
2.5.2 - Volume Conflitante	20
2.5.3 - Capacidade Básica	20
2.5.4 - Fator de Impedância	25
2.5.5 - Ajustamento da Capacidade Básica..	26
2.5.6 - Capacidade Para Faixas Mistas	26
2.5.7 - Níveis de Serviço e Atrasos	27
2.6 - Análise dos Métodos	28
 CAPÍTULO III - ESTUDO DO METODO ALEMÃO	 31
3.1 - Introdução	31
3.2 - Conceitos Básicos	31
3.2.1 - Fluxos nas Interseções	32
3.2.2 - Intervalo Crítico	35
3.2.3 - Intervalo de Sequência	36
3.2.4 - Distribuição de Intervalos	37
3.3 - Desenvolvimento de Fórmulas	38
3.3.1 - Fórmula Básica Para um Fluxo na Via Principal	39
3.3.2 - Fórmula Básica Para Mais de um Flu xo na Interseção	44
3.3.2.1 - Com Intervalos Iguais ..	44
3.3.2.2 - Com Intervalos Diferentes	46

	Pág.
3.3.3 - Capacidade Para Faixas Mistas	48
3.4 - Ação Conjunto de Fluxos Com Prioridades Di- ferentes	48
3.4.1 - Capacidade Para Fluxos de 2 ^a Ordem	50
3.4.2 - Capacidade Para Fluxos de 3 ^a Ordem	51
3.4.2.1 - Tratamento de Fila Para um Fluxo de 2 ^a Ordem ...	51
3.4.3 - Capacidade Para um Fluxo de 4 ^a Or- dem	53
3.4.3.1 - Tratamento de Fila Para um Fluxo de 3 ^a Ordem ...	53
3.4.4 - Capacidade Prática	54
 CAPÍTULO IV - ESTUDO DE CASO	 56
4.1 - Introdução	56
4.2 - Coleta de Dados	57
4.2.1 - Dados de Caracterização Geral das Interseções	57
4.2.2 - Dados de Tempo	57
4.2.2.1 - Intervalos Aceitos e Re- jeitados	57
4.2.2.2 - Intervalos Entre Veículos da Via Secundária	61
4.2.3 - Dados de Volume de Veículos da Via Principal Que Giram à Direita	62
4.3 - Determinação dos Intervalos Críticos	63
4.4 - Determinação dos Intervalos de Sequência .	67

	Pág.
4.5 - Determinação da "Influência do Giro à Direita".....	67
4.6 - Determinação da Capacidade	69
4.7 - Análise Comparativa dos Resultados	75
CAPÍTULO V - CONCLUSÕES E SUGESTÕES	79
5.1 - Conclusões	79
5.2 - Sugestões	80
REFERÊNCIAS	82

LISTA DE QUADROS

QUADRO	Pág.
2.1 - Intervalos Críticos e de Sequência Utilizados Pelo Método Alemão	10
2.2 - Intervalos Críticos Utilizados Pelo Método Inglês	18
2.3 - Intervalos Críticos Utilizados Pelo Método Americano	21
2.4 - Conversão do Tráfego em Veículos Por Hora Para Unidade de Cursos de Passeio por Hora	26
2.5 - Níveis de Serviço e Atrasos nas Interseções ..	28
4.1 - Caracterização Geral da Interseção 1	58
4.2 - Caracterização Geral da Interseção 2	59
4.3 - Intervalos Aceitos e Rejeitados para a Interseção 1 ...	60
4.4 - Intervalos Aceitos e Rejeitados para a Interseção 2 ...	61
4.5 - Intervalos Entre Veículos da Via Secundária ..	62
4.6 - Veículos da Via Principal Que Giram à Direita.	63
4.7 - Intervalos Aceitos Acumulados e Intervalos Rejeitados Acumulados Para a Interseção 1	64
4.8 - Intervalos Aceitos Acumulados e Intervalos Rejeitados Acumulados Para a Interseção 2	66
4.9 - Capacidade das Interseções 1 e 2	70
4.10 - Capacidade em Função do Volume Conflitante Para a Interseção 1	71
4.11 - Capacidade em Função do Volume Conflitante Pa-	

QUADRO

Pág.

ra a Interseção 2	71
4.12 - Capacidade em Função do Volume Conflitante Para os Valores dos Intervalos Críticos e de Sequência	73
4.13 - Cálculo das Capacidades das Interseções 1 e 2, Segundo os Métodos Alemão, Inglês e Americano..	75
4.14 - Comparação dos Resultados em Termos de Porcentagem	76
4.15 - Capacidades das Interseções 1 e 2 Segundo os Métodos Inglês e Americano, Utilizando-se os Parâmetros Locais	77

LISTA DE FIGURAS

FIGURA	Pág.
2.1 - Fluxos em Uma Interseção de Quatro Acessos Com Todos os Movimentos Possíveis	09
2.2 - Volumes Conflitantes Segundo o Método Inglês..	16
2.3 - Capacidade de Interseções Com Controle Por Prioridade Segundo o Método Inglês	19
2.4 - Volumes Conflitantes Segundo o Método Americano	23
2.5 - Capacidade Básica de Interseções Com Controle Por Prioridade, Segundo o Método Americano ...	24
2.6 - Redução da Capacidade Básica Devido ao Congestionamento	25
2.7 - Ajustamento da Capacidade Básica	27
3.1 - Fluxos em Interseções - Situação 1	33
3.2 - Fluxos em Interseções - Situação 2	34
3.3 - Fluxos em Interseções - Situação 3	35
3.4 - Representação Gráfica do Conceito de Intervalo Crítico	36
3.5 - Ajustamento dos Intervalos por Uma Curva Exponencial Negativa	38
3.6 - Situação Considerada na Fórmula Básica Para um Fluxo na Via Principal	39
3.7 - Representação Gráfica da Frequência Relativa em Função da Duração dos Intervalos.....	40

FIGURA

Pág.

3.8 - Tráfego da Via Principal Composto Por Dois Fluxos Com Intervalos Iguais	44
3.9 - Tráfego da Via Principal Composto Por Dois Fluxos Com Intervalos Diferentes	46
4.1 - Representação da Interseção 1	49
4.2 - Representação da Interseção 2	49
4.3 - Determinação do Intervalo Crítico Para a Interseção 1	65
4.4 - Determinação do Intervalo Crítico Para a Interseção 2	66
4.5 - Representação Gráfica da Capacidade em Função do Volume Conflitante Para as Interseções 1 e 2	72
4.6 - Representação Gráfica da Capacidade em Função do Volume Conflitante Para os Valores Médios dos Intervalos Críticos e de Sequência	74

CAPÍTULO I

I N T R O D U Ç Ã O

1.1 - Apresentação do Problema

A busca frequente pela satisfação das suas necessidades econômicas e sociais faz com que o homem procure os aglomerados urbanos, que, à medida que vão se desenvolvendo, tendem a atrair mais ainda, pessoas da zona rural e de aglomerados menores.

Com a evolução, esses aglomerados passam a exigir um aparelhamento urbano adequado, capaz de contribuir para melhoria do padrão de vida de seus habitantes. Como parte desse aparelhamento encontra-se o sistema de transportes, que é utilizado nos deslocamentos de pessoas e cargas e que constantemente sofre alterações face ao aumento do número de veículos e pedestres que circulam através do seu complexo conjunto de vias interrelacionadas, que se denomina malha viária. Nessa malha viária, os locais onde ocorrem com maior frequência os conflitos entre veículos são os cruzamentos e as convergências de vias, ou seja, as interseções.

Essas interseções, são elementos determinantes na performance global do sistema viário, se constituem em um mesmo espaço físico a ser utilizado por diferentes correntes de

tráfego em movimentos conflitantes, provocando congestionamentos, atrasos, acidentes, etc.

1.2 - Justificativa do Trabalho

Nas cidades brasileiras, os dispositivos de controle de tráfego empregados amplamente nas interseções são o semáforo, os sinais "Pare" e "Dê a Preferência". O primeiro é um dispositivo que controla o direito de passagem das correntes de tráfego através de focos luminosos. O segundo e o terceiro dispositivos são chamados de controle por prioridade e se caracterizam por estabelecer que a via na qual escoar o tráfego de maior volume, geralmente denominada via principal, tem prioridade no uso da interseção.

Dos dispositivos acima citados, o semáforo é o que requer um maior investimento inicial e maior custo de manutenção. Por estas razões, sua implantação em alguns casos tem se tornado proibitivo, face às restrições econômicas.

Por outro lado, as interseções com controle por prioridade são dotadas de elementos simples e de baixo custo, e esse tipo de controle têm prevalecido na maioria das interseções urbanas brasileiras.

Entretanto, não obstante a quantidade de interseções urbanas com controle por prioridade, não se tem realizado grande número de estudos acerca da capacidade dessas interseções, levando-se em consideração a realidade brasileira. Portanto, estudos sobre esse assunto se fazem necessários para possibilitar um maior conhecimento do nível operacional

dessas interseções, assim como a elaboração de projetos lógicos, econômicos e funcionais.

1.3 - Objetivos do Trabalho

Este trabalho tem como objetivos:

- Realizar um estudo de capacidade de interseções com controle por prioridade, através dos métodos Alemão, Inglês e Americano;

- Analisar a concepção e o desenvolvimento do Método Alemão;

- Fazer um estudo de caso baseado em pesquisas realizadas na cidade de João Pessoa-PB, na qual foram coletados dados para a determinação dos parâmetros utilizados nesses métodos; e

- Realizar uma análise comparativa dos resultados dos cálculos das capacidades, obtidos através dos métodos Alemão, Inglês e Americano.

1.4 - Estrutura do Trabalho

O conteúdo deste trabalho é formado por cinco capítulos, que são apresentados resumidamente a seguir.

CAPÍTULO 1 - Neste capítulo encontram-se a apresentação do estudo, suas justificativas e seus objetivos;

CAPÍTULO 2 - Contém uma abordagem geral sobre o controle por prioridade, capacidade de interseções e suas aplicações, além de apresentar três métodos de cálculo de capa-

cidade;

CAPÍTULO 3 - Apresenta a formulação matemática do Método Alemão;

CAPÍTULO 4 - Contém um estudo de capacidade de interseções com controle por prioridade na cidade de João Pessoa, utilizando-se o Método Alemão; e

CAPÍTULO 5 - Apresenta uma síntese conclusiva dos resultados obtidos e algumas sugestões para estudos futuros.

CAPÍTULO II

MÉTODOS DE CÁLCULO DE CAPACIDADE

2.1 - Introdução

O estudo de interseções com controle por prioridade é de tal importância, que instituições de transportes de muitos países vem se empenhando consideravelmente em pesquisas sobre o assunto.

São várias as técnicas existentes de estimativa da capacidade, entretanto, neste capítulo encontram-se apenas três dos métodos mais utilizados no exterior, além de algumas considerações sobre o controle por prioridade, a capacidade de interseções e suas aplicações.

2.2 - Considerações Iniciais

2.2.1 - Controle por prioridade

O controle por prioridade caracteriza-se por estabelecer que o tráfego da via principal tem prioridade no uso da interseção em relação ao tráfego da via secundária. Este controle é feito mediante a utilização de placas e marcação no pavimento com as indicações Pare ou Dê a Preferência, e a escolha de uma delas depende também das condições de visibilidade

de locais. O sinal Dê a Preferência é utilizado quando as condições de visibilidade são favoráveis e permitem os veículos da via secundária entrarem na interseção com uma determinada velocidade, exigindo um menor tempo para a manobra. Quando as condições de visibilidade forem precárias o sinal utilizado é o Pare, que exige do motorista uma parada obrigatória para analisar a situação. A velocidade de partida dos veículos é zero e seu desempenho é mais crítico do que o das interseções com sinal Dê a Preferência.

Trata-se portanto, de um controle passivo, estático, onde nenhuma informação é apresentada indicando o instante em que o tráfego não prioritário pode usar a interseção, tendo o próprio motorista que decidir sobre quando realizar a manobra desejada, de forma segura, sem cometer possíveis erros de julgamento. Por isso, torna-se importante se conhecer bem o comportamento dos motoristas nessas situações e os parâmetros envolvidos em tal processo de decisão, que são elementos fundamentais na performance das interseções.

2.2.2 - Capacidade

O principal objetivo em um estudo de capacidade na Engenharia de Tráfego, é a obtenção da maior quantidade de veículos que uma via consegue liberar na unidade de tempo, dentro das condições prevaletentes de tráfego, via e ambiente. Em interseções com controle por prioridade, o fluxo da via principal não sofre atraso e, por isso, a capacidade é expressa em termos de veículos provenientes da via secundária que podem entrar na interseção, para um certo fluxo na via

principal.

Assim sendo, à medida que cresce o fluxo na via principal, os intervalos de tempo entre seus veículos são reduzidos, o escoamento do tráfego da via secundária através da interseção diminui, e os veículos da via secundária que aguardam sua oportunidade para entrar na interseção tem seu tempo de espera tendendo para valores elevados, formando assim extensas filas que podem interferir no escoamento nas vias adjacentes. Esses veículos passam a aceitar intervalos menores do que seria aceito em condições mais favoráveis, aumentando assim a probabilidade de ocorrência de acidentes.

Para que isto seja evitado, são estabelecidos valores admissíveis para o volume de tráfego na via secundária com base na capacidade da interseção, visando proporcionar condições de escoamento aceitáveis e seguros. Outras aplicações do estudo de capacidade são (3):

- Previsão das possíveis consequências resultantes de mudanças na circulação do tráfego;
- Identificação das manobras que estão operando em condições críticas;
- Estabelecimento do desempenho global da interseção em termos de reserva de capacidade e possíveis níveis de atraso sofrido pelo tráfego secundário;
- Verificação da adequação do controle por prioridade em função da magnitude do problema existente; e
- Estabelecimento de uma hierarquia entre as interseções com base nas necessidades de melhorias.

2.3 - O Método Alemão

Este método, publicado originalmente em 1972 (2), foi desenvolvido para interseções de quatro acessos, onde todos os movimentos são possíveis e realizados a partir de faixas exclusivas, seguindo uma regra de prioridade do direito de passagem entre os fluxos na interseção. Essa regra estabelece que os fluxos de via principal que seguem direto e os que giram à direita, tem prioridade sobre todos os outros. Em seguida, e em ordem decrescente de prioridade, tem-se os fluxos que giram à esquerda partindo da via principal e à direita partindo da via secundária, os fluxos da via secundária que cruzam a interseção, e, finalmente, os fluxos da via secundária que giram à esquerda. Tem-se pois, uma classificação de fluxos em 1^a, 2^a, 3^a e 4^a ordem. A Figura 2.1 mostra os fluxos numa interseção de quatro acessos.

Como elementos determinantes da capacidade, o Método Alemão considera o volume conflitante, o intervalo crítico e o intervalo de sequência. O volume conflitante é o volume do fluxo que conflita com o fluxo de veículos que estão executando a manobra e que tem prioridade sobre estes; o intervalo crítico é o menor intervalo de tempo entre os veículos do fluxo prioritário que pode ser aceito por qualquer veículo do fluxo não prioritário; e o intervalo de sequência é o intervalo de tempo médio entre os veículos do fluxo não prioritário que aceitam um mesmo intervalo de tempo entre os veículos do fluxo prioritário. No Quadro 2.1 estão apresentados alguns valores dos intervalos críticos e de sequência,

recomendados pelo Método Alemão.

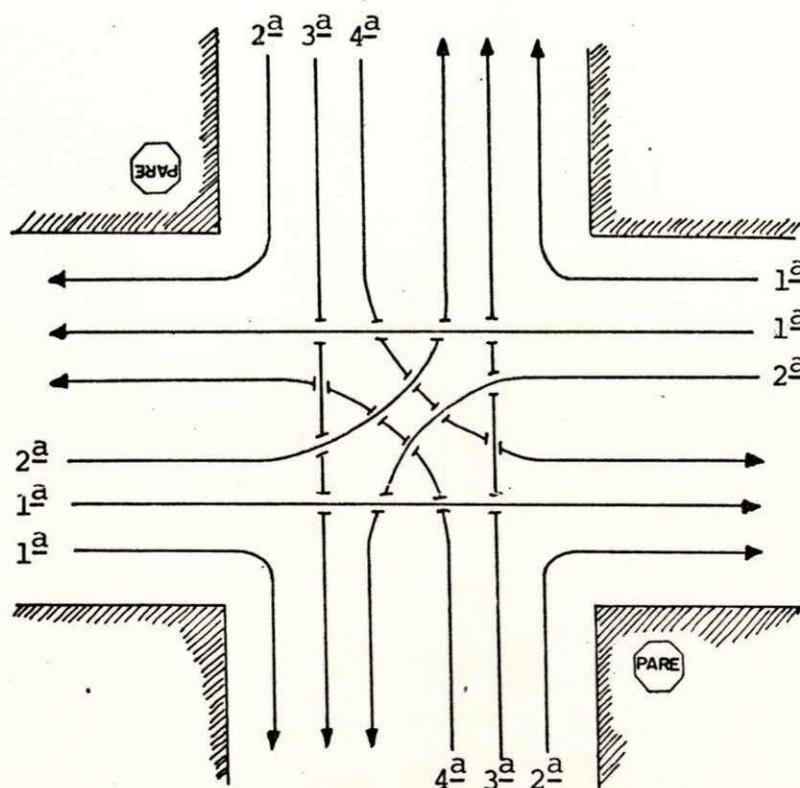


Figura 2.1 - Fluxos em uma Interseção de Quatro Acessos
com Todos os Movimentos Possíveis

A seguir serão apresentadas as expressões para o cálculo da capacidade dos movimentos de 2ª, 3ª e 4ª ordens, ilustrados na Figura 2.1.

2.3.1 - Capacidade Para Um Fluxo de 2ª Ordem

Um fluxo de 2ª ordem, isto é, aquele que gira à esquerda partindo da via principal ou à direita partindo da via secundária, depende, apenas, dos fluxos de 1ª ordem, e a sua capacidade é dada por:

Quadro 2.1 - Intervalos Críticos e de Sequência Utilizados no Método Alemão

MANOBRA		OPERAÇÃO NA PRINCIPAL	DÊ A PREFERÊNCIA		PARE	
			INT. CRÍT.	INT. SEQ.	INT. CRÍT.	INT. SEQ.
Convergência	A Partir da Secund.	Mão Única	5.2	2.7	6.2	4.0
Cruzamento	A Partir da Secund.	Mão Única	5.2	2.7	6.2	4.0
	A Partir da Princ.	Mão Dupla	5.2	2.7	6.0	3.5
Cruzamento e Convergência	A Partir da Secund.	Mão Dupla	6.0	3.2	7.3	4.0

$$C_2 = \frac{e^{-\beta}}{e^{\alpha} - 1} \cdot V \quad (2.1)$$

$$\text{sendo: } \alpha = \frac{V}{3600} \cdot I_S; \text{ e} \quad (2.2)$$

$$\beta = \frac{V}{3600} \cdot (I_C - I_S) \quad (2.3)$$

onde: C_2 = capacidade para um fluxo de 2ª ordem (veic/h);

I_C = intervalo crítico para movimentos de 2ª ordem (seg);

I_S = intervalo de seqüência para movimentos de 2ª ordem (seg); e

V = volume conflitante do fluxo de 2ª ordem (veic/h).

2.3.2 - Capacidade Para um Fluxo de 3ª Ordem

Fluxos de 3ª ordem são fluxos da via secundária que cruzam a interseção. Eles dependem dos de 1ª e 2ª ordens e da não ocorrência de fila nos fluxos de 2ª ordem que giram à esquerda, partindo da via principal.

A capacidade para um fluxo de 3ª ordem é expressa por:

$$C_3 = P_2 \cdot \frac{e^{-\beta}}{e^{\alpha} - 1} \cdot V \quad (2.4)$$

onde: C_3 = capacidade para um fluxo de 3ª ordem (veic/h);

V = volume conflitante com fluxo de 3ª ordem (veic/h);

α, β = conforme foram definidos pelas expressões (2.2) e (2.3) tomando-se para I_C e I_S , os valores corres-

pondentes aos movimentos de 3ª ordem;

P_2 = probabilidade de não haver fila no fluxo de 2ª ordem que interfere no de 3ª ordem, dada por:

$$P_2 = \frac{C_2 - v_2}{C_2 - e^{-\frac{(V_1 \cdot I_C + v_2 \cdot I_S)}{3600}} \cdot v_2} \quad (2.5)$$

sendo: C_2 = capacidade para o fluxo de 2ª ordem que conflita com o de 3ª ordem (veic/h); e

v_2 = volume do fluxo de 2ª ordem que conflita com o de 3ª ordem (veic/h).

V_1 = volume do fluxo de 1ª ordem que conflita com o de 2ª ordem (veic/h); e

I_C, I_S = intervalos críticos e de sequência, respectivamente, para os movimentos de 2ª ordem (seg).

2.3.3 - Capacidade para um Fluxo de 4ª Ordem

Os fluxos de 4ª ordem são os que giram à esquerda a partir da via secundária. Eles dependem dos fluxos de 1ª, 2ª e 3ª ordens e da não formação de filas nos fluxos de 2ª e 3ª ordens. Sua capacidade é calculada pela expressão:

$$C_4 = P_2 \cdot P_3 \cdot \frac{e^{-\beta}}{e^{\alpha} - 1} \cdot V \quad (2.6)$$

onde: C_4 = capacidade para um fluxo de 4ª ordem (veic/h);

V = volume conflitante do fluxo de 4ª ordem (veic/h);

α, β = conforme foram definidos pelas expressões (2.2) e (2.3), tomando-se para I_C e I_S , os valores corres-

pondentes aos fluxos de 4ª ordem;

P_2 = já definido anteriormente;

P_3 = probabilidade de não haver fila no fluxo de 3ª ordem que interfere no de 4ª ordem, dada por:

$$P_3 = \frac{C_3 - v_3}{C_3 - P_2 \cdot e^{-\frac{(V \cdot I_c + v_3 \cdot I_s)}{3600}} \cdot v_3} \quad (2.7)$$

sendo: C_3 = capacidade do fluxo de 3ª ordem (veic/h);

v_3 = volume do fluxo de 3ª ordem que conflita com o de 4ª ordem (veic/h);

V_1 = volume do fluxo de 1ª ordem que conflita com o de 3ª ordem (veic/h); e

I_c, I_s = intervalos críticos e de sequência, respectivamente para o movimento de 3ª ordem (seg).

Os fluxos de 1ª ordem que giram à direita, apesar de não conflitarem com os fluxos provenientes da via secundária, interferem nestes inibindo, em alguns casos, a realização da manobra. Esta influência é considerada adicionando-se, ao volume conflitante, 50% do volume da via principal que gira à direita.

2.3.4 - Capacidade Para Faixas Mistas

Quando as manobras partirem de faixas não exclusivas, ou seja, quando os movimentos de giro à direita, giro à esquerda e cruzamento da interseção partirem de uma mesma faixa da via secundária, denominada de faixa mista, a capacidade

de correspondente a esta faixa será dada por:

$$C_m = \frac{v_2 + v_3 + v_4}{\frac{v_2}{C_2} + \frac{v_3}{C_3} + \frac{v_4}{C_4}} \quad (2.8)$$

Onde: C_m = capacidade para a faixa mista (veic/h);

C_2, C_3, C_4 = capacidade para os fluxos de 2^a, 3^a e 4^a ordens, respectivamente, provenientes da via secundária (veic/h); e

v_2, v_3, v_4 = volumes dos fluxos de 2^a, 3^a e 4^a ordens, respectivamente, provenientes da via secundária (veic/h).

2.3.5 - Capacidade Prática

As expressões apresentadas para o cálculo da capacidade de fornecem o número máximo de veículos que podem cruzar e/ou convergir na interseção, na unidade de tempo. O nível operacional, nessas condições, torna-se indesejável. Por isso se estabelece um valor máximo para o volume que possa assegurar condições aceitáveis de tráfego. Este volume máximo permitido chama-se capacidade prática, e é determinado por:

$$C_{pi} = C_i - \frac{3600}{\max t_e} \quad (2.9)$$

onde: C_{pi} = capacidade prática para um fluxo de ordem i (veic/h);

$\max t_e$ = maior valor admissível para o tempo de espera (seg.); e

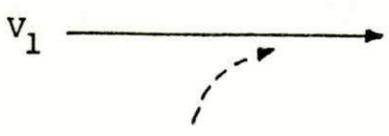
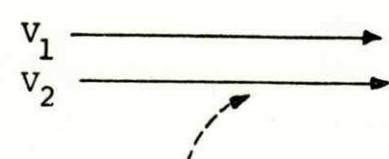
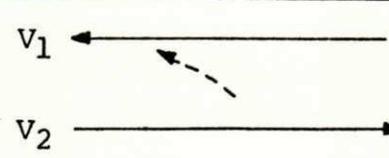
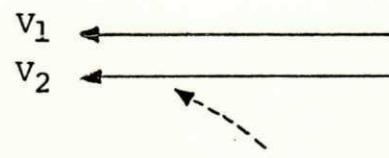
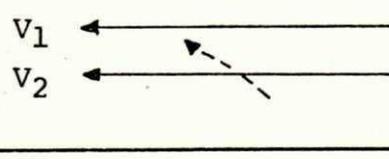
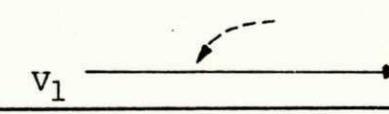
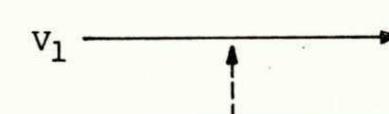
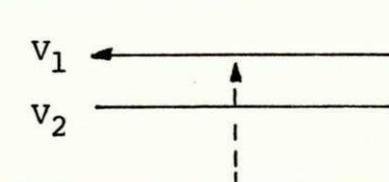
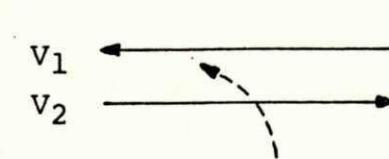
C_i = capacidade básica para um fluxo de ordem i (veic/h).

Os valores recomendados para o tempo de espera máximo admissível são de 18 seg. para períodos fora de pico, e de 24 seg. para períodos de pico.

2.4 - O Método Inglês

A capacidade determinada por este método (3) baseia-se apenas no intervalo crítico e no volume conflitante. São vários os fatores que influenciam no estabelecimento do intervalo crítico, porém este método considera apenas o tipo de manobra, o número de faixas e a velocidade de projeto na via principal.

Os tipos de manobras consideradas são a convergência, o cruzamento, e o cruzamento e convergência. O primeiro tipo envolve os movimentos de junção dos fluxos a partir da secundária (giro à direita) ou do canteiro central com o fluxo da via principal que passa direto; o segundo tipo é aquele que cruza o fluxo da via principal, seja pelo fluxo da via secundária que segue direto, seja pelo fluxo da via principal que gira à esquerda; e o terceiro tipo é realizado pelos veículos da via secundária que giram à esquerda. Nesta última manobra são realizados os movimentos de cruzamento do fluxo principal adjacente e de convergência com o fluxo oposto da via principal. Considera-se, neste caso, que a via principal opera em mão dupla, sem canteiro central e com largura insuficiente para permitir a realização da manobra em duas etapas. A Figura 2.2 representa esquematicamente essas manobras.

MANOBRA	VOLUME CONFLITANTE	ILUSTRAÇÃO
Convergência a partir da via secundária	$V = V_1$	
	$V = 0.40 (V_1 + V_2)$	
Convergência a partir do canteiro central	$V = V_1$	
	$V = 0.60 (V_1 + V_2)$	
	$V = V_1 + V_2$	
Cruzamento a partir do canteiro central	$V = V_1$	
Cruzamento a partir da via secundária	$V = V_1$	
	$V = V_1 + V_2$	
Cruzamento e convergência a partir da via secundária	$V = V_1 + V_2$	

OBS.: No caso do fluxo da via principal que gira à esquerda conflitar com os fluxos provenientes da via secundária, deve-se adicionar ao volume conflitante, o produto de 1,667 pelo volume da via principal que gira a esquerda.

Figura 2.2 - Volume Conflitante Segundo o Método Inglês.

2.4.1 - Volume Conflitante

Quando o fluxo que realiza a manobra sofrer interferências de correntes de tráfego próximas ao fluxo que será cruzado e/ou entrelaçado, fazem-se necessárias algumas correções no volume conflitante. A determinação do volume conflitante assim como suas eventuais correções estão representados na Figura 2.2.

2.4.2 - Intervalos Críticos

Os intervalos críticos em função do tipo de manobra, do número de faixas e da velocidade de projeto na via principal, encontram-se no Quadro 2.2.

2.4.3 - Capacidade

De posse do intervalo crítico e do volume conflitante, determina-se a capacidade de cada um dos movimentos através da Figura 2.3. Se os movimentos não se realizarem em faixas exclusivas, a capacidade da faixa mista é calculada pela equação (2.8). Em ambos os casos, a capacidade prática é considerada como sendo 85% do valor encontrado.

2.5 - O Método Americano

Assim como no Método Inglês, a capacidade estimada através do Método Americano (1) se baseia também no intervalo crítico e no volume conflitante. Entretanto, existem uma sé

Quadro 2.2 - Intervalos Críticos Utilizados no Método Inglês

MANOBRA			NÚMERO DE FAIXAS	INTERVALO CRÍTICO		
				VELOCIDADE DE PROJETO (Km/h)		
				< 65	> 65	
C O N V E R G Ê N C I A	a partir da via se cundária	pista simples	1	4 seg. Curva A	6 seg. Curva C	
		pista dupla	1			
	A partir do cantei ro cen tral	1 faixa por sentido		1	-	6 seg. Curva C
		2 fai xas por sen tido	Con ver gên cia na 1ª fai xa	1	8 seg. Curva C	8 seg. Curva E
			Con ver gên cia na 2ª fai xa	2	8 seg. Curva D	12 seg. Curva G
		CRUZA- MENTO	a partir da via secundária e do canteiro central		1	4 seg. Curva A
2	6 seg. Curva B				8 seg. Curva D	
CRUZAMEN- E CONVER- GÊNCIA	pista operando em mão dupla - 1 faixa por sentido		2	8 seg. Curva D	10 seg. Curva F	

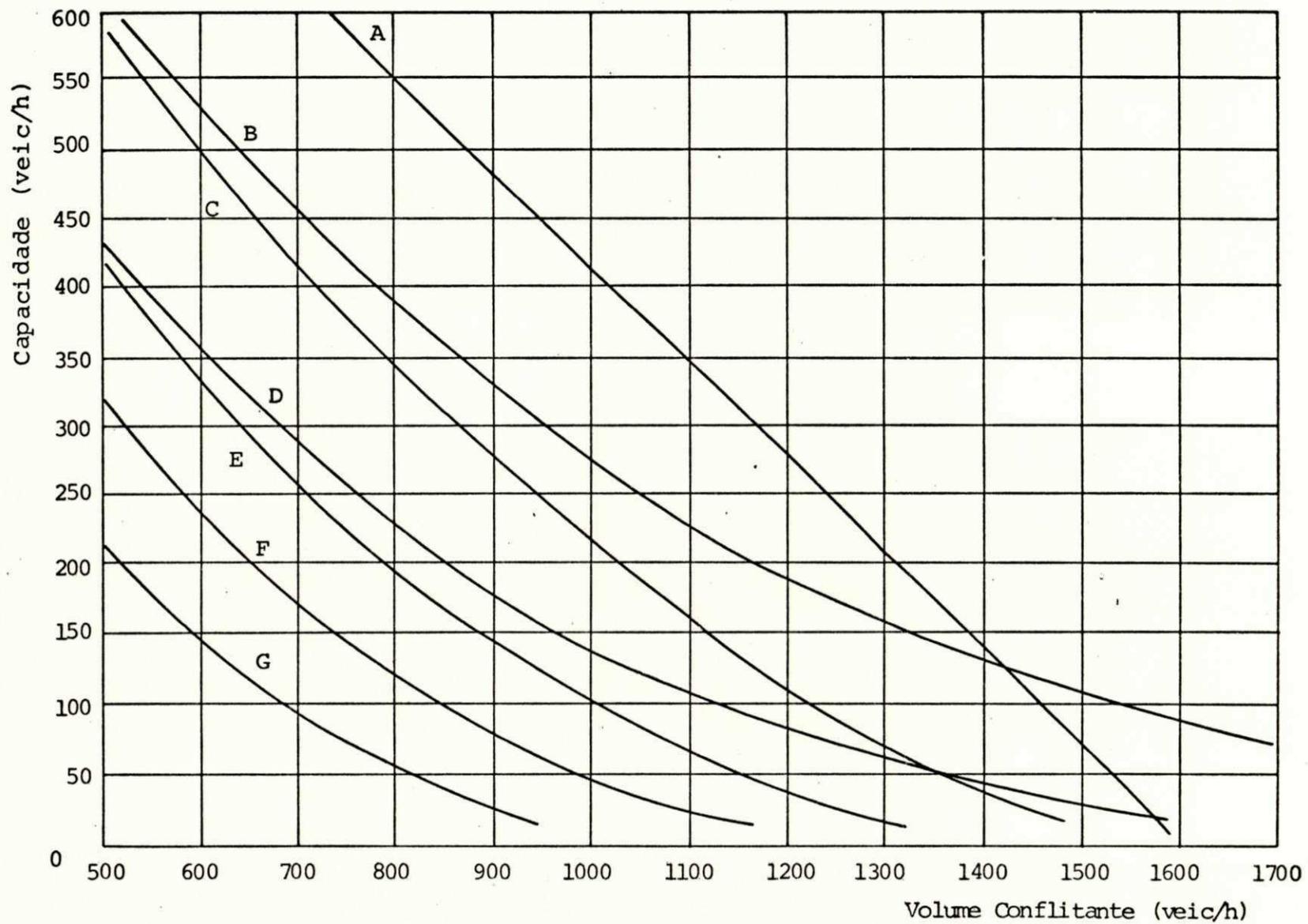


Figura 2.3 - Capacidade de Interseção com Controle por Prioridade Segundo o Método do Inglês.

rie de ajustamentos e modificações que são feitas na capacidade, no intervalo crítico, e no volume conflitante, devido as condições físicas e operacionais das interseções.

2.5.1 - Intervalos Críticos

Os fatores considerados no estabelecimento do intervalo crítico são o tipo de controle e de manobra, velocidade de projeto na via principal e o número de faixas, porém alguns ajustamentos se fazem necessários para computar a influência do raio da curva, da faixa de aceleração, da população e da visibilidade. A população foi incorporada porque pesquisas mostraram que os motoristas das grandes cidades, já acostumados com o tráfego intenso, tendem a aceitar intervalos menores do que os das pequenas cidades. Os valores dos intervalos crítico e suas modificações estão no Quadro 2.3.

2.5.2 - Volume Conflitante

No estabelecimento do volume conflitante, Figura 2.4, o fluxo que gira à direita a partir da principal, apesar de não conflitar com os fluxos da via secundária, exerce uma influência sobre estes. Por isso, 50% do volume que gira à direita a partir da principal é adicionado ao volume conflitante para considerar essa influência.

2.5.3 - Capacidade Básica

Com o volume conflitante e o intervalo crítico, deter

Quadro 2.3 - Intervalos Críticos Utilizados no Método Americano

TIPO DE MANOBRA E DE CONTROLE	VELOCIDADE DE PROJETO (Km/h)			
	50		90	
	2 FAIXAS	4 FAIXAS	2 FAIXAS	4 FAIXAS
Giro à Direita da Via Secundária				
PARE	5,5	5,5	6,5	6,5
DÊ A PREFERÊNCIA	5,0	5,0	5,5	5,5
Giro à Esquerda da Via Principal	5,0	5,5	5,5	6,0
Cruzamento da Via Principal				
PARE	6,0	6,5	7,5	8,0
DÊ A PREFERÊNCIA	5,5	6,0	6,5	7,0
Giro à Esquerda da Via Secundária				
PARE	6,5	7,0	8,0	8,5
DÊ A PREFERÊNCIA	6,0	6,5	7,0	7,5
AJUSTAMENTOS E MODIFICAÇÕES PARA O INTERVALO CRÍTICO (seg.)				
CONDIÇÃO		AJUSTAMENTO		
Giro à Direita da via Secundária	Raio da curva > 15 m	- 0,5		
	Angulo de giro < 60°	- 1,0		
Todos os movimentos: população > 250.000		- 0,5		
Visibilidade restrita		+ 1,0		

OBS.: Decréscimo máximo em um intervalo crítico: 1,0 seg.
Intervalo crítico máximo = 8,5 seg.
Para velocidades entre 50 e 90 Km/h, fazer interpolação.

mina-se a capacidade básica a partir da Figura 2.5. Esta capacidade é a maior taxa de escoamento que pode ser alcançada por um movimento não prioritário, numa interseção onde o tráfego não bloqueia a via principal; não há interferências de congestionamentos nas interseções próximas; há uma faixa exclusiva para cada movimento; e não há interferência dos outros movimentos da interseção.

MANOBRA	VOLUME CONFLITANTE	ILUSTRAÇÃO
1. Convergência a partir da via secundária	$V = \frac{1}{2} V_1 + V_2$	
2. Cruzamento a partir da via principal	$V = V_1 + V_2$	
3. Cruzamento a partir da via secundária	$V = \frac{1}{2} V_1 + V_2 + V_3 + V_1' + V_2' + V_3'$	
4. Cruzamento e convergência a partir da via secundária	$V = \frac{1}{2} V_1 + V_2 + V_3 + V_3' + V_2' + \frac{1}{2} V_1' + V_4 + V_5$	

- Nos movimentos 1, 3 e 4 quando o giro à direita da via principal for provido de faixa exclusiva, o fluxo V_1 pode ser omitido; e
- Nos movimentos 2 e 3, quando o raio da curva for grande, os fluxos V_1' e V_1 podem ser omitidos.

Figura 2.4 - Volume Conflitante Segundo o Método Americano.

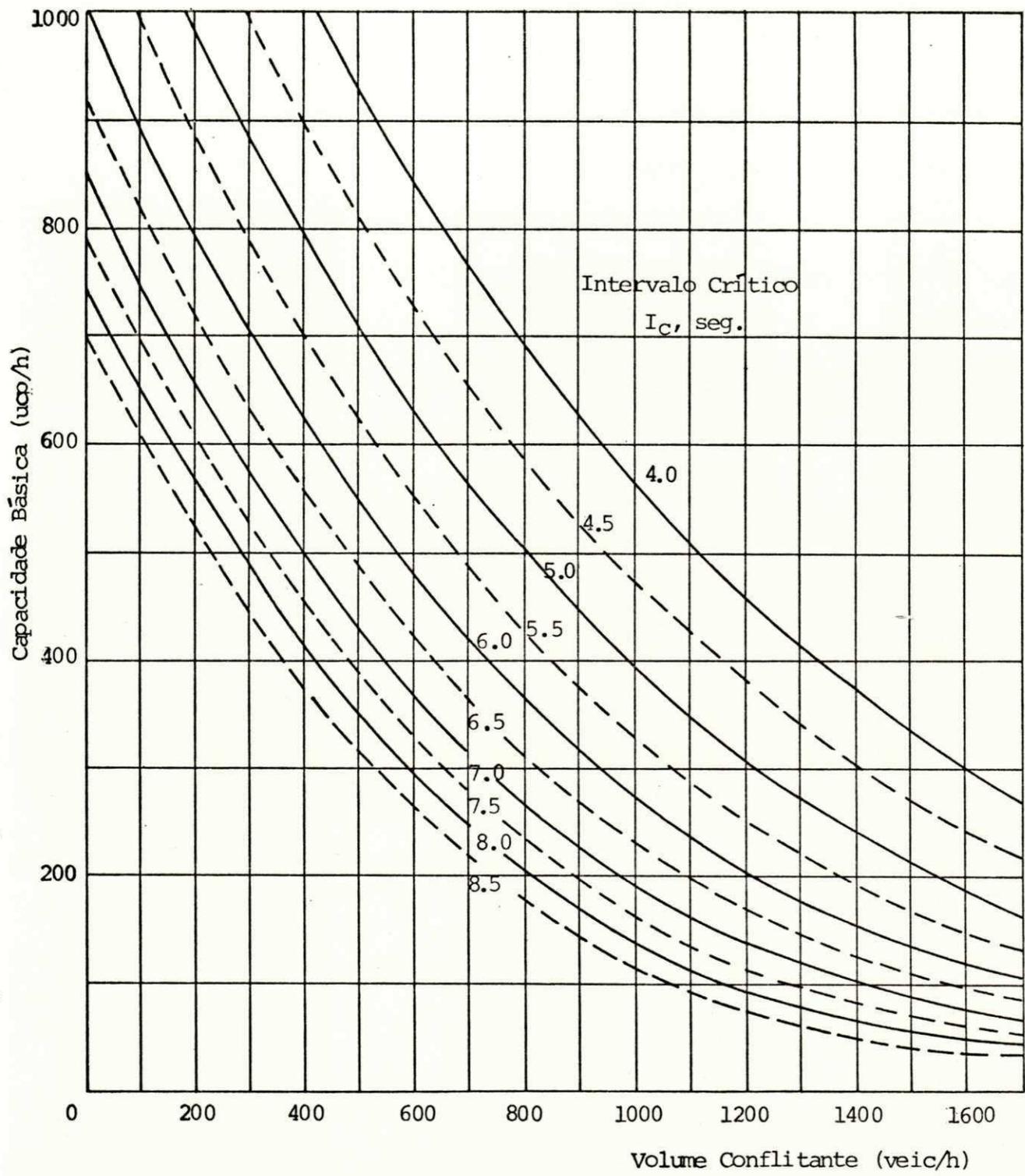


Figura 2.5 - Capacidade Básica de Interseções com Controle por Prioridade, Segundo o Método Americano

2.5.4 - Fator de Impedância

Quando a interseção analisada possuir todas as condições citadas anteriormente, a capacidade para os movimentos de giro à direita da via secundária e giro à esquerda da via principal será igual à capacidade básica. Porém, para os movimentos de giro à esquerda da via secundária e cruzamento da via principal serem realizados, mesmo em tais condições, é necessário que não haja congestionamentos nos fluxos não prioritários e conflitantes. Para considerar essa possibilidade, faz-se um ajustamento da capacidade básica a partir da Figura 2.6, de onde se obtém um fator de impedância (I) para cada fluxo não prioritário que conflita com o fluxo estudado. Este parâmetro representa a probabilidade de não haver fila para executar a manobra e é determinado como função da taxa de utilização da capacidade.

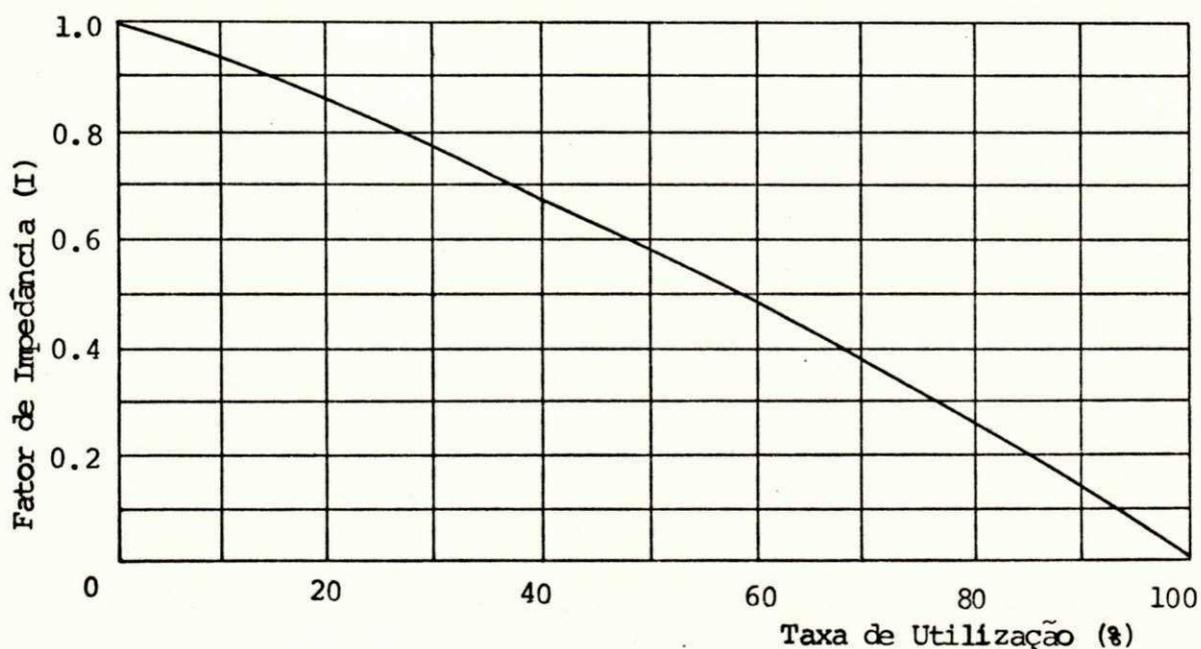


Figura 2.6 - Redução da Capacidade Básica Devido ao Congestionamento.

A taxa de utilização da capacidade é a relação entre a demanda e a capacidade básica de cada movimento. Como a unidade da demanda é veíc/h, a conversão para ucp/h é feita utilizando-se o Quadro 2.4.

Quadro 2.4 - Conversão do Tráfego em veículos por hora (veíc/h) para unidade de carros de passeio por hora (ucp/h).

TIPO DE VEÍCULO	GREIDE				
	-4%	-2%	0%	+2%	+4%
Motocicletas	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7
Automóveis	0,8	0,9	1,0	1,2	1,4
Caminhões/ônibus	1,0	1,2	1,5	2,0	3,0
Reboques	1,2	1,5	2,0	3,0	6,0
Veículo motorizado*	0,9	1,0	1,1	1,4	1,7

* Valores aproximados para o caso de não ser conhecida a composição do tráfego.

2.5.5 - Ajustamentos da Capacidade Básica

As configurações e as equações utilizadas no ajustamento da capacidade básica às interferências causadas pelos possíveis congestionamentos, estão representadas na Figura 2.7.

2.5.6 - Capacidade para Faixas Mistas

Se a aproximação da via secundária possuir uma única faixa para a realização de todos os movimentos, a capaci-

de para faixa mista será dada pela expressão (2.8).

TIPO DE MOVIMENTO	CONFIGURAÇÃO	EQUAÇÃO
Giro à esquerda da via secundária numa interseção em "T"		$C_{GE} = C \cdot I_1$
Cruzamento da via principal numa interseção de quatro acessos		$C_D = C_b \cdot I_1 \cdot I_2$
Giro a esquerda da via secundária numa interseção de quatro acessos		$C_{GE} = C_b \cdot I_1 \cdot I_2 \cdot I_3 \cdot I_4$

Onde: C_{GE} , C_D = capacidades dos movimentos de giro à esquerda e que segue direto, respectivamente (ucp/h);

C_b = capacidade básica do fluxo considerado (ucp/h); e

I_1, I_2, I_3, I_4 = fatores de impedância.

Figura 2.7 - Ajustamento da Capacidade Básica

2.5.7 - Níveis de Serviço e Atrasos

Após determinar a capacidade, o Método Americano oferece condições de se analisar a performance das interseções através do conceito de nível de serviço, que indica as con-

dições operacionais da interseção, baseado nos atrasos sofridos pelos veículos dos fluxos não prioritários para cada faixa de reserva de capacidade (Quadro 2.5). A reserva de capacidade é a diferença entre a capacidade da faixa e o volume que a utiliza.

Quadro 2.5 - Níveis de Serviço e Atrasos nas Interseções.

RESERVA DE CAPACIDADE (ucp/h)	NÍVEL DE SERVIÇO	ATRASO ESPERADO
≥ 400	A	Pouco ou nenhum
300 - 399	B	Pequeno
200 - 299	C	Médio
100 - 199	D	Longo
0 - 99	E	Muito Longo
*	F	*

(*) Quando o volume excede a capacidade da faixa, extensas filas e tempos de espera ocorrem na interseção causando congestionamentos e afetando o tráfego de outras interseções.

2.5.8 - Análise dos Métodos

O método Alemão foi desenvolvido para interseções com quatro acessos com todos os movimentos possíveis, porém, como as capacidades são calculadas através de expressões, é possível adaptá-los aos casos onde o número de acessos é menor que quatro; sua utilização em outros países é possível, desde que sejam utilizados intervalos críticos e de sequên-

cia específicos desses países; a utilização de fórmulas, apesar de fornecer resultados mais precisos, torna o cálculo da capacidade mais trabalhoso; a determinação dos intervalos críticos e de sequências baseia-se no tipo de operação da via principal, no tipo de sinal utilizado e no tipo de manobra a ser realizada; considera a influência da formação de filas nos fluxos conflitantes e a influência dos veículos da via principal que giram à direita nas manobras provenientes da via secundária; e permite o cálculo da capacidade prática em função do tempo de espera máximo aceitável.

No Método Inglês são apresentadas todas as situações possíveis numa interseção com quatro acessos, inclusive quando as manobras tiverem início no canteiro central; apenas o controle por parada obrigatória é utilizado; não se usa o intervalo de sequência, e o intervalo crítico é definido em função da velocidade na via principal, do número de faixas a serem cruzadas e do tipo de manobra; considera-se a influência do fluxo próximo ao fluxo sobre o qual está sendo executado a manobra, embora não seja considerada a influência dos veículos da via principal que giram à direita; o tratamento na formação de filas é feito apenas para o fluxo da via principal que gira à esquerda, e mesmo assim, de forma genérica; sua metodologia é simples e fácil de ser aplicada.

O Método Americano é uma adaptação do Método Alemão, baseado em estudos de validações deste método nos Estados Unidos; envolve todas as situações possíveis em interseções com até quatro acessos; não utiliza o intervalo de sequência, e o intervalo crítico baseia-se na velocidade e número de fai

xas da via principal, no tipo de sinal e de manobra, além de sofrerem ajustamentos e modificações devidos às interferências locais; São consideradas as possibilidades de ocorrências de congestionamentos em alguns fluxos e é o único método que permite analisar a performance das interseções, através de níveis de serviço e atrasos sofridos pelos fluxos não prioritários.

Pelo exposto neste sub-ítem, percebe-se facilmente que o Método Americano é o mais completo dos três apresentados, e, por ter sido desenvolvido voltado para a realidade americana, é de se esperar que a sua utilização no Brasil produza resultados incompatíveis com as necessidades locais, face às diferentes condições existentes nos dois países. Entretanto, como se trata de uma adaptação do Método Alemão aos Estados Unidos, seria conveniente estudar com detalhes a concepção do Método Alemão, para uma possível adaptação às condições brasileiras. Este estudo será o tema do capítulo seguinte.

CAPÍTULO III

ESTUDO DO MÉTODO ALEMÃO

3.1 - Introdução

Os métodos de cálculo de capacidade das interseções controladas com prioridade baseiam-se fundamentalmente na forma como os intervalos são oferecidos pelo fluxo prioritário e no julgamento dos motoristas do fluxo não prioritário na seleção desses intervalos para a realização das manobras. Em geral, esses métodos são desenvolvidos em bases puramente matemáticas e, em seguida, complementados com parâmetros determinados a partir de dados coletados em campo.

Este capítulo objetiva apresentar com detalhes a formulação matemática do Método Alemão (2), que foi desenvolvido partindo de uma distribuição teórica encontrada para descrever a ocorrência de intervalos no fluxo prioritário, e dos conceitos de intervalos crítico e de sequência.

3.2 - Conceitos Básicos

São apresentados a seguir alguns conceitos essenciais ao estudo do Método Alemão.

3.2.1 - Fluxos na Interseção

Quando duas correntes de tráfego se encontram numa interseção, a superfície onde elas se interceptam é chamada de área de conflito. Se um veículo da via secundária cruza a área de conflito, o intervalo de tempo entre os dois veículos da via principal, através do qual foi realizada a manobra, é considerado como aceito. Caso contrário o intervalo é considerado como rejeitado.

Esses intervalos podem ser de um dos dois tipos seguintes:

Lag: Intervalo de tempo entre a chegada do primeiro veículo do fluxo secundário na interseção e a chegada do próximo veículo do fluxo principal; e

Gap: Intervalo de tempo entre dois veículos sucessivos do fluxo principal que seguem direto.

Dependendo da forma como os intervalos entre os veículos da via principal se apresentam e da existência ou não de fila na via secundária, pode-se identificar três situações distintas nas interseções, a saber:

1. Há grandes intervalos entre os veículos da via principal e não há formação de fila na via secundária. Ver Figura 3.1.

O veículo da via secundária ao chegar na interseção, encontra um intervalo suficientemente grande para a realização da manobra, aceitando assim um Lag. O tempo decorrido desde a chegada até a saída do veículo na interseção é deno

minado de tempo de espera (t_e).

Neste caso, o tempo de espera é igual ao tempo de percepção e reação do motorista.

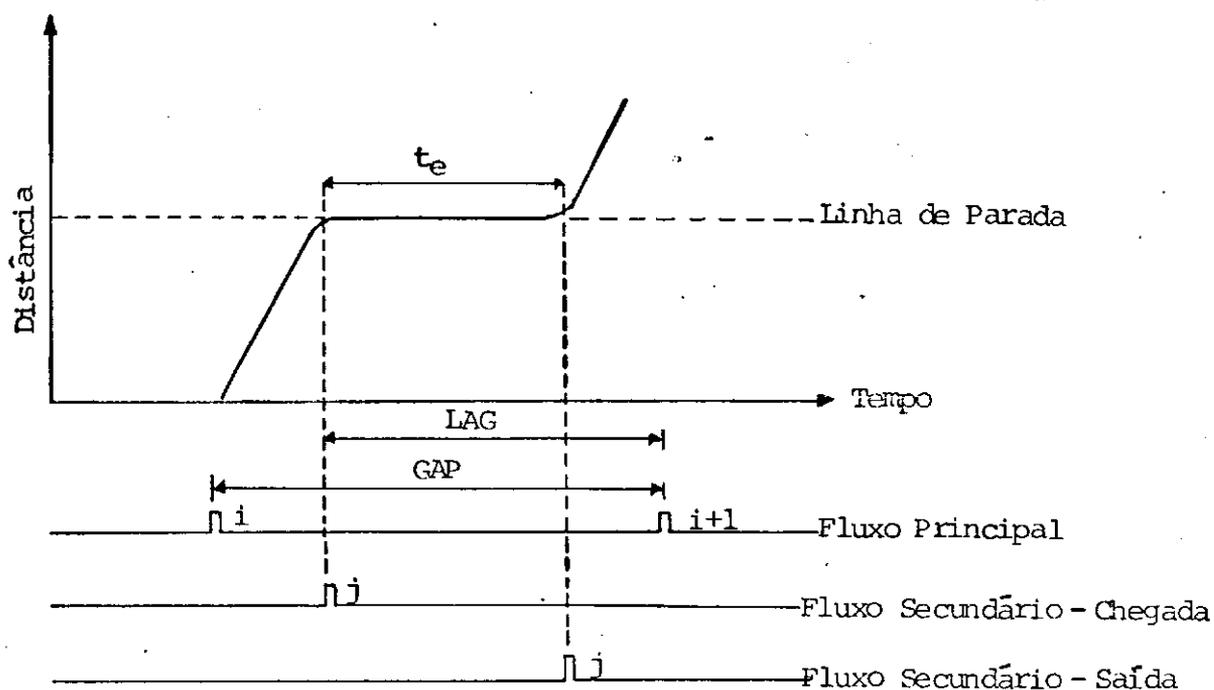


Figura 3.1 - Fluxos em interseções - Situação 1

2. Há pequenos intervalos entre os veículos da via principal e não há formação de fila na via secundária. Ver Figura 3.2.

O veículo da via secundária ao chegar na interseção, encontra um lag pequeno, sendo obrigado a esperar a ocorrência de um Gap com duração suficiente para a realização da manobra. De acordo com a Figura 3.2, o intervalo entre os veículos j_{cheg} e $i+1$ é um lag rejeitado; entre os veículos $i+1$ e $i+2$ é um Gap rejeitado; e entre os veículos $i+2$ e $i+3$ é um Gap aceito.

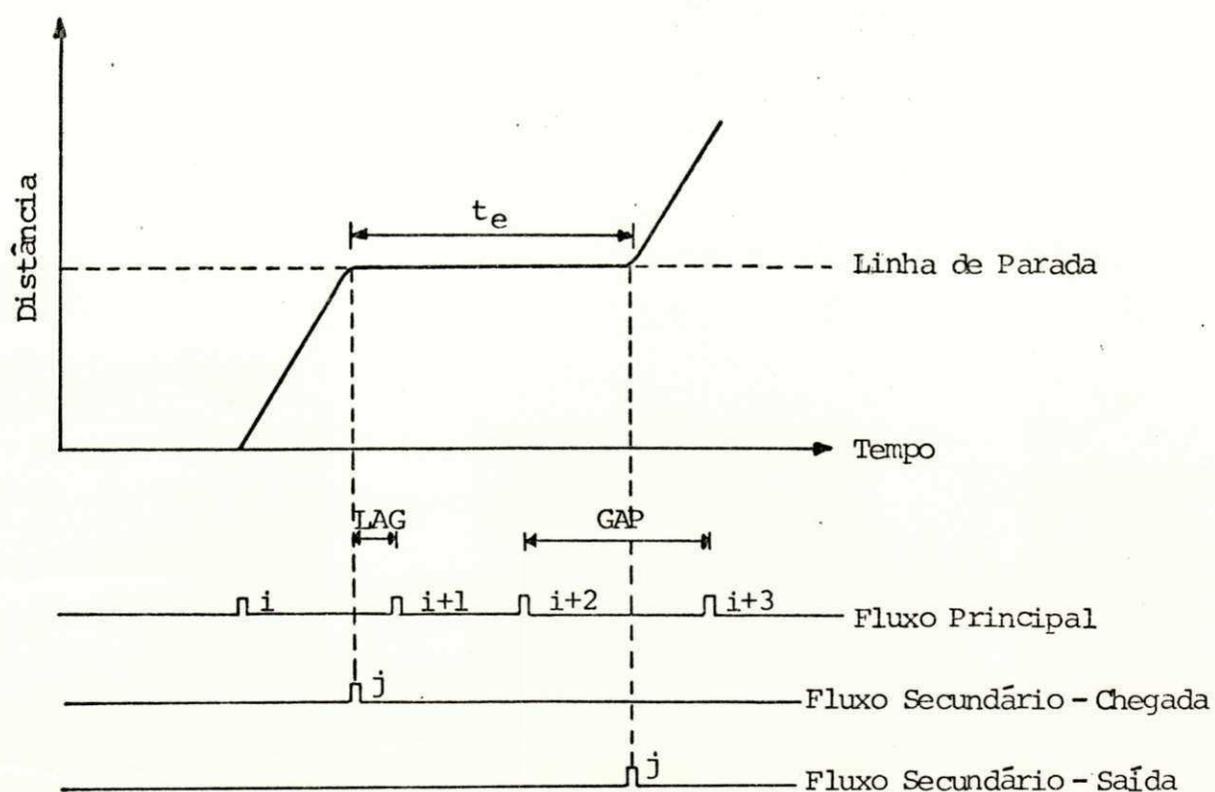


Figura 3.2 - Fluxos em Interseções - Situação 2

3. Há intervalos de tempo com duração muito variada na via principal, e há formação de fila na via secundária. Ver Figura 3.3.

Há formação de fila na via secundária e há ocorrência de Gaps na via principal que podem ser aceitos por mais de um veículo. No caso do intervalo entre os veículos $i+1$ e $i+2$ o Gap é aceito por dois veículos.

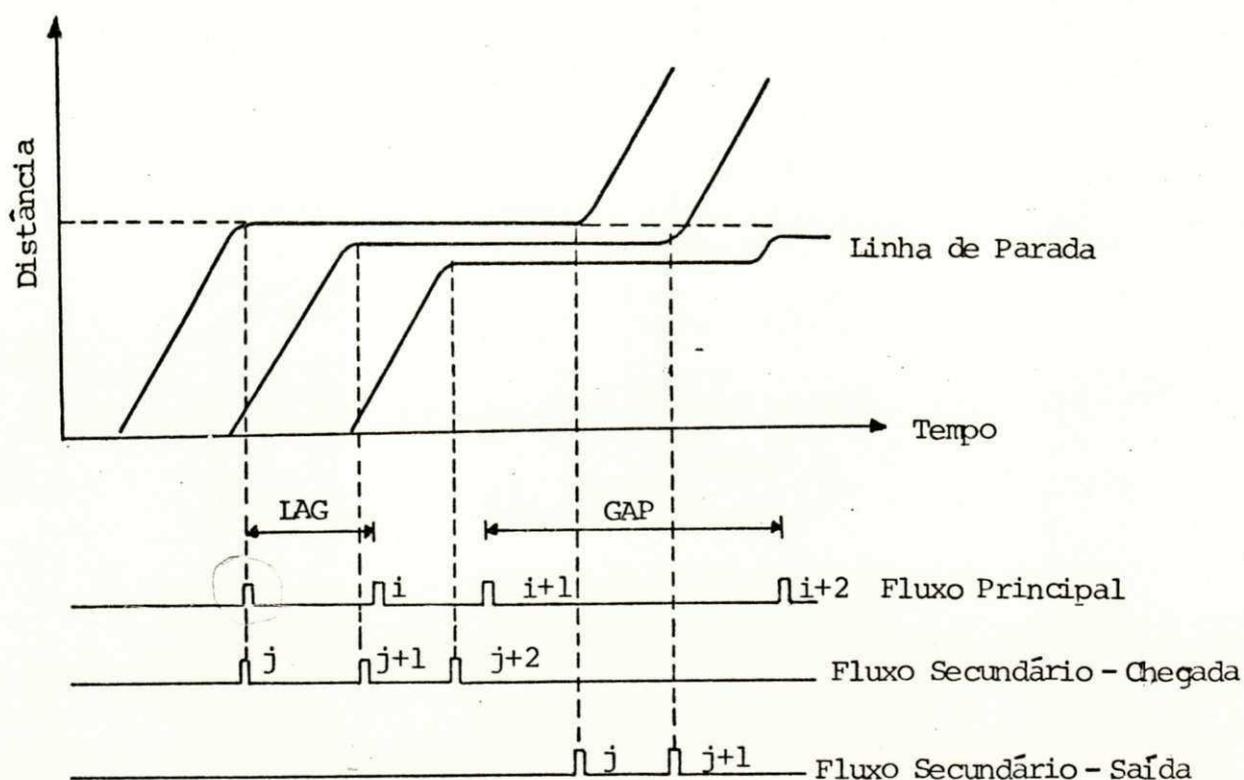


Figura 3.3 - Fluxos em Interseções - Situação 3

3.2.2 - Intervalo Crítico

O intervalo crítico, que foi definido como sendo o menor intervalo de tempo que seria aceito por qualquer veículo do fluxo não prioritário, a priori não pode ser calculado matematicamente. Entretanto, pode-se determiná-lo partindo do seguinte conceito:

"O intervalo crítico I_c é aquele para o qual o número de intervalos de tempo rejeitados e maiores que ele é igual ao número de intervalos de tempo aceitos e menores que ele."

Uma representação gráfica deste conceito seria:

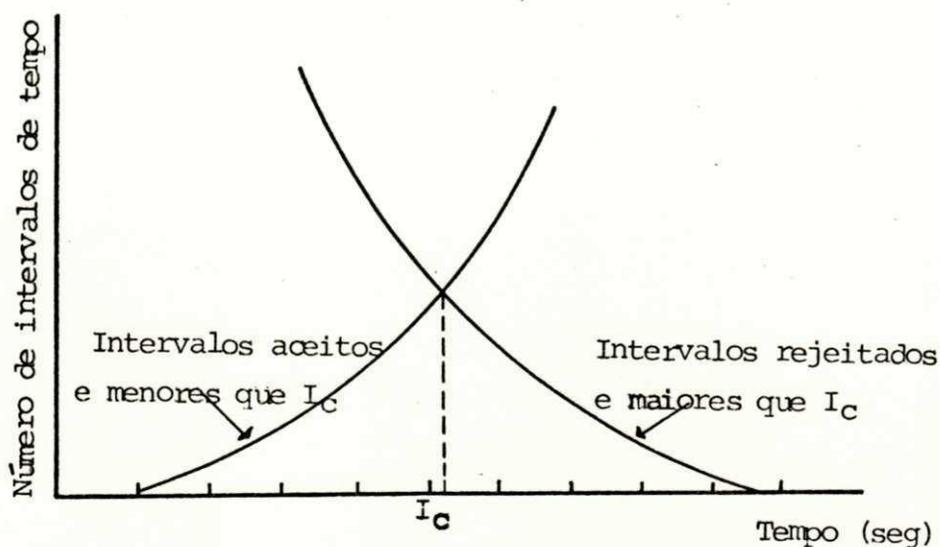


Figura 3.4 - Representação Gráfica do Conceito de Intervalo Crítico.

Para a determinação deste parâmetro, supõe-se uma fila permanente no fluxo não prioritário de forma a poder aceitar ou rejeitar todos os intervalos oferecidos pelo fluxo prioritário, sejam eles Lags ou Gaps.

3.2.3 - Intervalo de Sequência

O intervalo de sequência, como já foi definido, é o intervalo de tempo médio entre dois veículos do fluxo não prioritário que antes esperavam, e que aceitam o mesmo intervalo oferecido pelo fluxo prioritário.

Supondo que há um fluxo desimpedido após a interseção, pode-se descrever o fluxo de veículos que passam através do fluxo prioritário, da seguinte forma:

$$I_n = I_c + (n - 1) \cdot I_s \quad (3.1)$$

ou

$$I_n = I_c - I_s + n \cdot I_s \quad (3.2)$$

Onde: I_n = menor intervalo que pode ser aceito por n veículos para cruzar e/ou convergir com o fluxo prioritário (seg);

I_c = intervalo crítico (seg); e

I_s = intervalo de sequência (seg)

3.2.4 - Distribuição de Intervalos

Através da realização de pesquisas, foi constatado que a ocorrência dos intervalos de tempo, entre os veículos que trafegam numa via operando com fluxo livre, pode ser descrita por uma distribuição exponencial negativa; ou seja:

$$p(t \geq I) = e^{-\frac{V}{3600} \cdot I} \quad (3.3)$$

Onde: $p(t \geq I)$ = probabilidade de ocorrência de um intervalo de tempo t maior ou igual a I ;

V = volume de tráfego do fluxo considerado (veíc/h); e

t, I = intervalo de tempo (seg).

Graficamente ter-se-ia:

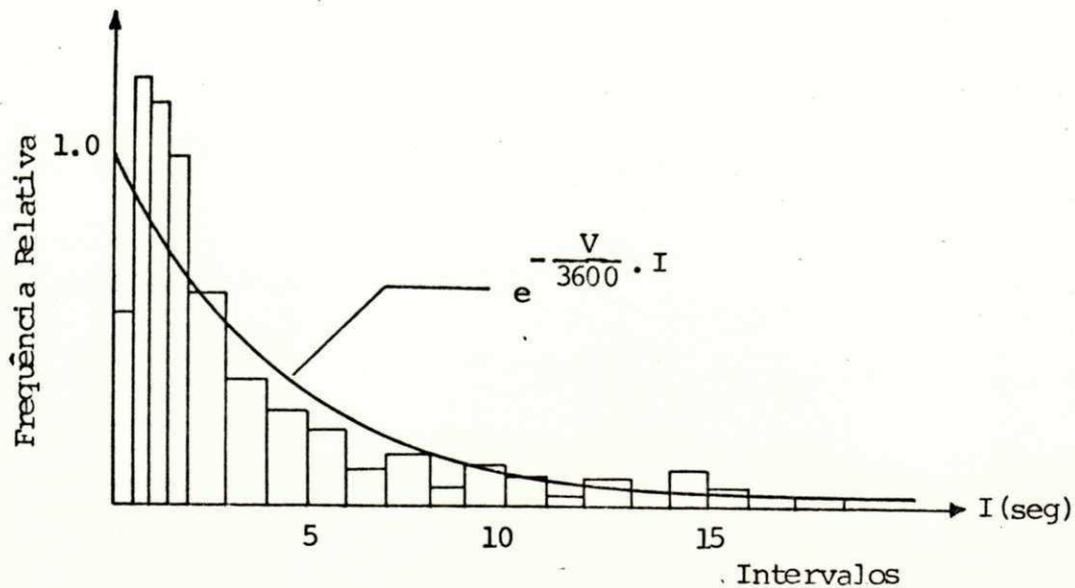


Figura 3.5 - Ajustamento dos Intervalos por Uma Curva Exponencial Negativa

Para fluxos não livres, como ocorre geralmente nas áreas urbanas, não seria válida a distribuição exponencial negativa. Entretanto, em se tratando de interseções com controle por prioridade, onde uma das correntes de tráfego tem passagem livre, pode-se partir dessa distribuição.

3.3 - Desenvolvimento de Fórmulas

Neste ítem será apresentado o desenvolvimento das fórmulas básicas utilizadas pelo método. Elas envolvem as situações em que o tráfego da via principal é composto de um ou mais fluxos, e que o tráfego nesta via não sofre interferências dos fluxos da via secundária, onde se considera que o tráfego é desimpedido após a interseção.

3.3.1 - Fórmula Básica para um Fluxo na via principal

Quando o tráfego da via principal for composta de apenas um fluxo, a realização da manobra depende apenas da ocorrência de intervalos suficientes neste fluxo.

A Figura 3.6 ilustra essa situação:

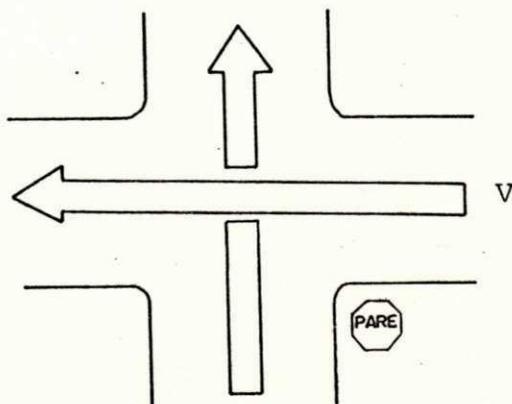


Figura 3.6 - Situação Considerada na Fórmula Básica para um Fluxo na Via Principal.

Seja a linha de soma dos intervalos de tempo do fluxo principal.

Os valores de a_1, a_2, a_3, \dots dão a frequência relativa para a ocorrência de intervalos de tempo onde 1, 2, 3, ... veículos podem cruzar a interseção.

De acordo com a Figura 3.7, um veículo exige um intervalo $I > I_0$ para passar, onde $I_0 = (I_C - I_S) + l$. $I_S = I_C$ (Equação 3.2). Dois veículos exigem um $I > I_1$, onde $I_1 = I_C + I_S$. Assim, o primeiro veículo passa entre I_0 e I_1 . A partir de I_1 até I_2 passam dois veículos.

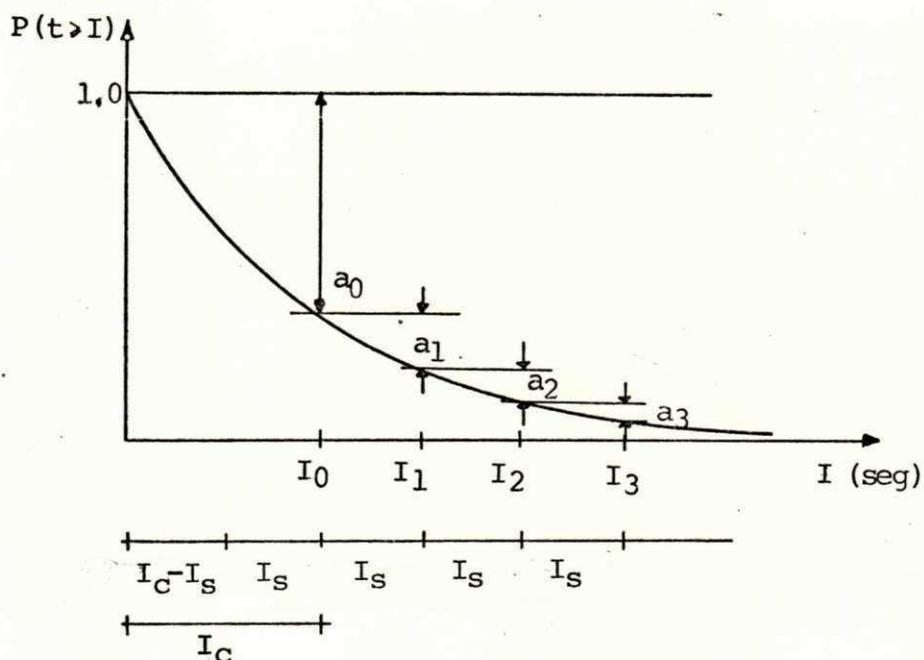


Figura 3.7 - Representação Gráfica da Frequência Relativa em Função da Duração dos Intervalos.

Como a_1, a_2, a_3, \dots são as frequências relativas de ocorrências de I_1, I_2, I_3, \dots , a partir da linha de soma tem-se:

$$a_0 = P(I < I_0) = 1 - P(I \geq I_0)$$

$$a_1 = P(I \geq I_1) - P(I \geq I_0)$$

$$a_1 = P(I_0 \leq I \leq I_1)$$

Generalizando, tem-se que:

$$a_n = e^{-\frac{V}{3600} [(I_C - I_S) + n \cdot I_S]} - e^{-\frac{V}{3600} [(I_C - I_S) + (n+1) \cdot I_S]} \quad (3.4)$$

Num fluxo de V veículos tem-se um total de V intervalos, logo a frequência absoluta de intervalos será:

$$A_n = a_n \cdot V \text{ (intervalos/hora)}, \quad (3.5)$$

onde: A_n é o número de intervalos por hora, no qual grupos de n veículos podem cruzar. A parcela de contribuição desse intervalo na capacidade é:

$$\Delta C_n = n \cdot A_n \quad (3.6)$$

Simplificando a expressão (3.4), tem-se:

$$a_n = e^{-\frac{V}{3600} (I_C - I_S)} \cdot e^{-\frac{V}{3600} \cdot n \cdot I_S} - e^{-\frac{V}{3600} (I_C - I_S)} \cdot e^{-\frac{V}{3600} (n+1) \cdot I_S} \quad (3.7)$$

$$A_n = e^{-\frac{V}{3600} (I_C - I_S)} \cdot \left[e^{-\frac{V}{3600} \cdot n \cdot I_S} - e^{-\frac{V}{3600} (n+1) \cdot I_S} \right] \quad (3.8)$$

Definindo: $\alpha = \frac{V}{3600} \cdot I_S$ e

$$\beta = \frac{V}{3600} (I_C - I_S), \text{ tem-se:}$$

$$a_n = e^{-\beta} \left[e^{-n\alpha} - e^{-(n+1)\alpha} \right].$$

Logo,

$$A_n = V \cdot e^{-\beta} \left[e^{-n\alpha} - e^{-(n+1)\alpha} \right]. \quad (3.9)$$

A capacidade C será, então, a soma das parcelas, de contribuição de todos os intervalos, ou seja:

$$C = \sum_{n=1}^{\infty} \Delta C_n$$

$$C = V \cdot e^{-\beta} \sum_{n=1}^{\infty} n \left[e^{-n\alpha} - e^{-(n+1)\alpha} \right] \quad (3.10)$$

A expressão da soma será:

$$S = \sum_{n=1}^{\infty} n \left[e^{-n\alpha} - e^{-(n+1)\alpha} \right]$$

$$S = 1 \cdot e^{-\alpha} - 1 \cdot e^{-2\alpha}$$

$$+ 2 \cdot e^{-2\alpha} - 2 \cdot e^{-3\alpha}$$

$$+ 3 \cdot e^{-3\alpha} - 3 \cdot e^{-4\alpha}$$

.....

$$S = e^{-\alpha} + e^{-2\alpha} + e^{-3\alpha} + \dots \quad (3.11)$$

que é a soma dos termos de uma progressão geométrica infinita.

Somando e subtraindo 1 de S,

$$S = 1 + e^{-\alpha} + e^{-2\alpha} + e^{-3\alpha} + \dots - 1$$

$$S = \sum_{n=0}^{\infty} e^{-n\alpha} - 1$$

Dado que $\sum_{k=0}^{\infty} q^k = \frac{1}{1-q}$, e fazendo $q = e^{-\alpha} < 1$ ($\alpha > 0$), chega-se a:

$$S = \frac{1}{1 - e^{-\alpha}} - 1 \quad \text{ou}$$

$$S = \frac{1}{e^{\alpha} - 1} \quad (3.12)$$

Substituindo este resultado na Equação (3.10), a equação da capacidade toma a seguinte forma:

$$C = \frac{e^{-\beta}}{e^{\alpha} - 1} \cdot V \quad (3.13)$$

$$\text{Sendo: } \alpha = \frac{V}{3600} \cdot I_S; e \quad (3.14)$$

$$\beta = \frac{V}{3600} \cdot (I_C - I_S) \quad (3.15)$$

Onde: C = capacidade da interseção (veic/h);

V = volume de tráfego da via principal (veic/h);

I_C = intervalo crítico (seg); e

I_S = intervalo de sequência (seg).

As Equações (3.13), (3.14) e (3.15) compõem a fórmula básica para um fluxo na via principal.

3.3.2 - Fórmula Básica para mais de um Fluxo na Via Principal.

Quando o tráfego da via principal for composto por vários fluxos, os intervalos críticos e de sequência referentes a cada fluxo podem ser iguais ou diferentes, dependendo do tipo de manobra. Neste ítem serão desenvolvidas as fórmulas básicas para ambos os casos.

3.3.2.1 - Com intervalos iguais

No cruzamento dos fluxos da via principal, como exemplifica a Figura 3.8, a probabilidade de ocorrência de um intervalo de tempo suficiente para a execução da manobra é igual a probabilidade de ocorrência desse intervalo num fluxo com um volume equivalente à soma de todos os volumes dos fluxos da via principal.

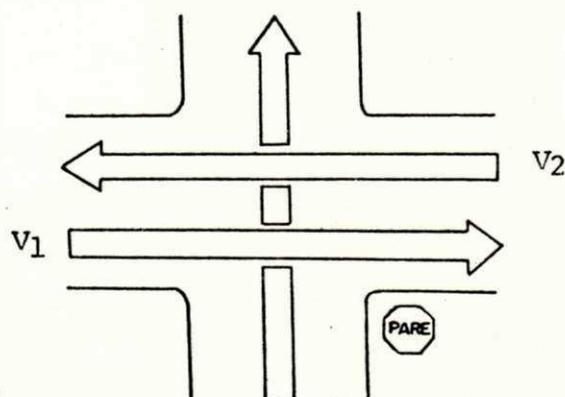


Figura 3.8 - Tráfego da Via Principal Composto por Dois Fluxos com Intervalos Iguais

Sendo $P(t \geq I)_i$ a probabilidade de ocorrência de um intervalo de tempo $t \geq I$ no fluxo i , no caso da Figura 3.8, tem-se:

$$P(t \geq I)_1 = e^{-\frac{V_1}{3600} \cdot I} \quad e \quad (3.16)$$

$$P(t \geq I)_2 = e^{-\frac{V_2}{3600} \cdot I} \quad (3.17)$$

Logo, a probabilidade de ocorrência de um intervalo $t \geq I$ no fluxo principal é:

$$\begin{aligned} P(t \geq I) &= P(t \geq I)_1 \cdot P(t \geq I)_2 \\ P(t \geq I) &= e^{-\frac{V_1}{3600} \cdot I} \cdot e^{-\frac{V_2}{3600} \cdot I} \\ P(t \geq I) &= e^{-\frac{V_1 + V_2}{3600} \cdot I} \quad (3.18) \end{aligned}$$

O que equivale a um fluxo com volume $V = V_1 + V_2$. Para K fluxos,

$$V = \sum_{i=1}^K V_i$$

3.3.2.2 - Com intervalos diferentes

No caso da manobra de cruzamento e convergência com os fluxos da via principal, como mostra a Figura 3.9, há necessidade de ocorrência de intervalos diferentes para a realização de cada manobra separadamente.

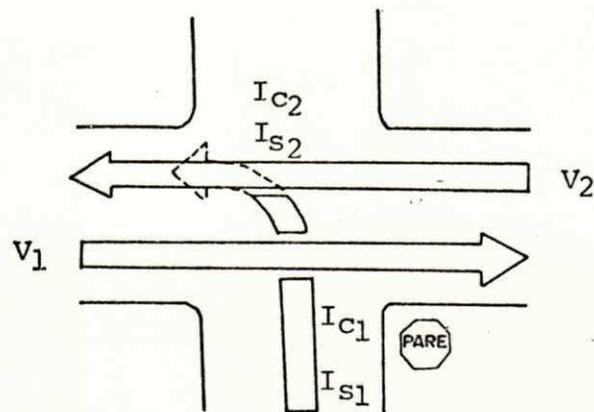


Figura 3.9 - Tráfego da Via Principal Composto por
Dois Fluxos com Intervalos Diferentes

De forma genérica, para um número K de fluxos na via principal com intervalos críticos e de sequência diferentes, tem-se I_{C_i} e I_{S_i} com $i = 1, 2, \dots, K$. A probabilidade de ocorrência de um intervalo $I > I_{(n-1)}$ num determinado fluxo i é:

$$P(I > I_{(n-1)})_i = e^{-\frac{V_i}{3600} [(I_{C_i} - I_{S_i}) + n \cdot I_{S_i}]} \quad (3.19)$$

A probabilidade de ocorrência simultânea de $I > I_{(n-1)}$ em todos os fluxos i da via principal, com V_i diferentes, será:

$$\prod_{i=1}^K P(I > I_{(n-1)})_i = e^{-\frac{V_1}{3600} [(I_{C_1} - I_{S_1}) + n \cdot I_{S_1}]} \cdot e^{-\frac{V_2}{3600} [(I_{C_2} - I_{S_2}) + n \cdot I_{S_2}]} \cdot \dots$$

$$\begin{aligned}
 & \cdot e^{\frac{V_i}{3600} \left[(I_{ci} - I_{si}) + n \cdot I_{si} \right]} \dots \\
 & \cdot e^{\frac{V_k}{3600} \left[(I_{ck} - I_{sk}) + n \cdot I_{sk} \right]} \\
 \prod_{i=1}^K P(I \geq I_{(n-1)})_i &= e^{-\frac{1}{3600} \sum_{i=1}^K V_i \left[(I_{ci} - I_{si}) + n \cdot I_{si} \right]} \quad (3.20)
 \end{aligned}$$

Analogamente, para $P(I \geq I_n)$ será:

$$\prod_{i=1}^K P(I \geq I_n)_i = e^{-\frac{1}{3600} \sum_{i=1}^K V_i \left[(I_{ci} - I_{si}) + (n+1) \cdot I_{si} \right]} \quad (3.21)$$

Seguindo o mesmo procedimento aplicado para se chegar às equações (3.13), (3.14) e (3.15), obtém-se a equação da capacidade para vários fluxos na via principal com intervalos críticos e de sequência diferentes entre si.

$$C = \frac{e^{-\beta}}{e^{\alpha} - 1} \cdot \sum_{i=1}^K V_i \quad (3.22)$$

$$\text{Sendo: } \alpha = \frac{1}{3600} \sum_{i=1}^K V_i \cdot I_{si} \quad e \quad (3.23)$$

$$\beta = \frac{1}{3600} \sum_{i=1}^K V_i (I_{ci} - I_{si}) \quad (3.24)$$

Onde: C = capacidade da interseção (veic/h);

V_i = volume de tráfego do fluxo i (veic/h);

I_{ci} = intervalo crítico do fluxo i (seg);

I_{si} = intervalo de sequência válido para o fluxo i (seg.); e

K = número de fluxos na via principal.

Quando os fluxos sobre os quais a manobra será realizada estiverem separados de tal maneira que a manobra deva ser realizada de uma só vez, os intervalos a serem considerados serão os correspondente àquele tipo de movimento. Ver Quadro 2.1.

3.3.3 - Capacidade Para Faixas Mistas

Até agora se supôs que a partida para a realização de cada manobra iniciava-se na sua própria faixa. Quando ocorrer dos veículos partirem de uma mesma faixa para diversas direções, determina-se primeiro a capacidade para cada movimento e depois calcula-se a capacidade total da faixa mista da seguinte forma:

$$C_m = \frac{v_2 + v_3 + v_4}{\frac{v_2}{C_2} + \frac{v_3}{C_3} + \frac{v_4}{C_4}} \quad (2.25)$$

Onde: C_m = capacidade para a faixa mista (veic/h);

C_2, C_3, C_4 = capacidade para os fluxos de 2^a, 3^a e 4^a ordens, respectivamente, provenientes da via secundária (veic/h); e

v_2, v_3, v_4 = volume dos fluxos de 2^a, 3^a e 4^a ordens, respectivamente, provenientes da via secundária (veic/h).

3.4 - Ação Conjunta de Fluxos Com Prioridades Diferentes

Em interseções onde os fluxos possuem as mesmas caracte

As interseções 1 e 2 estão representados esquematicamente nas figuras 4.1 e 4.2 .

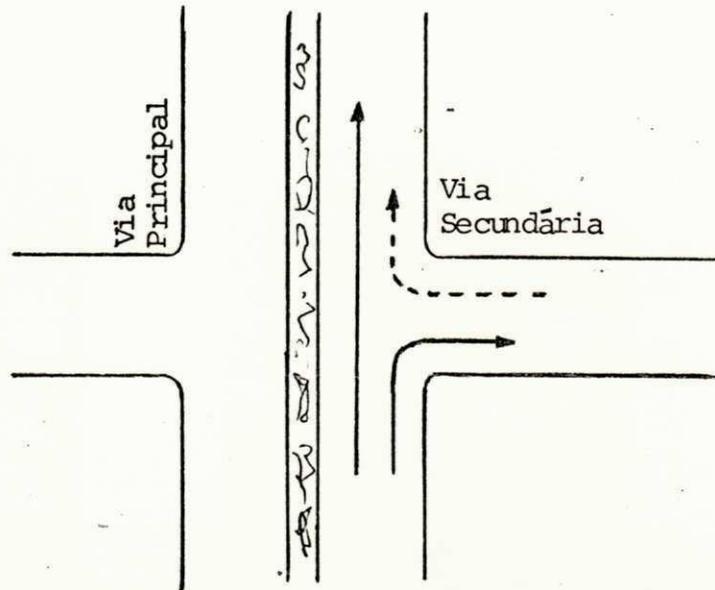


Figura 4.1 - Representação da Interseção 1

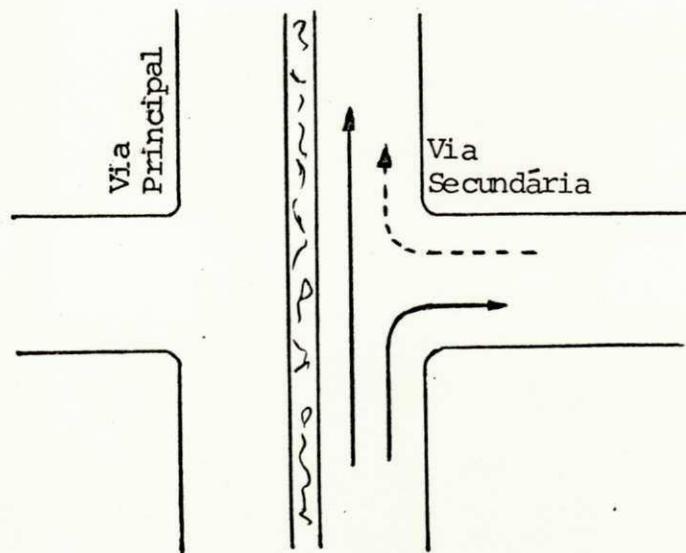


Figura 4.2 - Representação da Interseção 2

terísticas citadas no ítem anterior, as capacidades são determinadas a partir das fórmulas básicas. Porém, em interseções com um maior número de fluxos conflitantes, como é o caso de uma interseção de quatro acessos com todos os movimentos possíveis, existem fluxos que são obrigados a parar dando prioridade a outros, e que podem ter preferência sobre um terceiro fluxo. Neste ítem, tratar-se-ã com detalhes de todas as situações possíveis numa interseção de quatro acesso, ilustrada na Figura 2.1.

3.4.1 - Capacidade para Fluxos de 2ª Ordem

O cálculo desta capacidade depende apenas da ocorrência de intervalos de tempo suficientes nos fluxos de 1ª ordem. Assim sendo, tem-se:

$$C_2 = \frac{e^{-\beta}}{e^{\alpha} - 1} \sum_{i=1}^K V_i \quad (3.26)$$

$$\text{Sendo: } \alpha = \frac{1}{3600} \sum_{i=1}^K V_i \cdot I_{s_i} \quad e \quad (3.27)$$

$$\beta = \frac{1}{3600} \sum_{i=1}^K V_i \cdot (I_{c_i} - I_{s_i}) \quad (3.28)$$

Onde: C_2 = capacidade para um fluxo de 2ª ordem (veic/h);

V_i = volume conflitante do fluxo i (veic/h);

I_{c_i} = intervalo crítico do fluxo i (seg); e

I_{s_i} = intervalo de sequência válido para o fluxo i (seg).

3.4.2 - Capacidade Para Fluxos de 3ª Ordem

O cálculo para fluxos de 3ª ordem considera que os veículos devem esperar intervalos suficientes nos fluxos de 1ª e 2ª ordens e que não deva haver fila nos fluxos de 2ª ordem.

$$C_3 = P_2 \cdot \frac{e^{-\beta}}{e^{\alpha} - 1} \sum_{i=1}^K V_i \quad (3.29)$$

Onde: C_3 = capacidade para um fluxo de 3ª ordem (veic/h);
 P_2 = probabilidade de não haver filas nos fluxos de 2ª ordem que interferem nos de 3ª ordem; e
 V_i, α, β = conforme foram definidos no sub-ítem 3.4.1

3.4.2.1 - Tratamento de fila para um fluxo de 2ª ordem

Duas situações podem ocorrer com o fluxo de 2ª ordem:

- há pelo menos um veículo esperando para aceitar os intervalos. A probabilidade é \bar{P}_2 , e
- não há veículos esperando. A probabilidade é P_2 .

Se há pelo menos um veículo parado no fluxo de 2ª ordem, todos os intervalos de tempo aceitáveis do fluxo de 1ª ordem serão utilizados. Logo, o número de veículos que passaria durante esta situação seria:

$$V_f = \bar{P}_2 \cdot C_2 \quad (3.30)$$

Os veículos do fluxo de 2ª ordem só podem cruzar li-

vrememente os fluxos de 1^a ordem quando ocorrerem simultaneamente as três seguintes condições:

- não houver fila no fluxo de 2^a ordem;
- houver intervalos de tempo suficientes no fluxo de 1^a ordem; e
- o intervalo de tempo para o veículo precedente no fluxo de 2^a ordem for pelo menos igual ao intervalo de sequência.

As probabilidades de ocorrência dessas três condições são, respectivamente:

$$\begin{aligned} - W_1 &= P_2 \\ - W_2 &= e^{-\frac{V_1}{3600} I_c} \\ - W_3 &= e^{-\frac{v_2}{3600} I_s} \end{aligned}$$

Onde: V_1 = volume de veículos no fluxo de 1^a ordem (veíc/h); e
 v_2 = volume de veículos no fluxo de 2^a ordem (veíc/h).

O número de veículos que passaria livremente através do fluxo de 1^a ordem seria então:

$$V_{sf} = v_2 \cdot W_1 \cdot W_2 \cdot W_3, \text{ e} \quad (3.31)$$

O número total de veículos que passaria nas duas situações (com e sem fila), seria:

$$V_2 = V_f + V_{sf}$$

$$v_2 = (1 - P_2) \cdot C_2 + v_2 \cdot P_2 \cdot W_2 \cdot W_3 \quad (3.32)$$

de onde pode-se tirar P_2 :

$$P_2 = \frac{C_2 - v_2}{C_2 - W_2 \cdot W_3 \cdot v_2} \quad (3.33)$$

3.4.3 - Capacidade Para um Fluxo de 4ª Ordem

A capacidade de um fluxo de 4ª ordem depende da ocorrência de intervalos de tempo suficientes nos fluxos de 1ª, 2ª e 3ª ordens, como também da não existência de fila nos fluxos de 2ª e 3ª ordens.

$$C_4 = P_2 \cdot P_3 \cdot \frac{e^{-\beta}}{e^{\alpha} - 1} \cdot \sum_{i=1}^K V_i \quad (3.34)$$

Onde: C_4 = capacidade para um fluxo de 4ª ordem (veic/h);

P_3 = probabilidade de não haver fila no fluxo de 3ª ordem que interfere no de 4ª ordem; e

V_i, α, β, P_2 = já foram definidos anteriormente.

3.4.3.1 - Tratamento de fila para um fluxo de 3ª ordem

Para que os veículos de um fluxo de 3ª ordem possam passar livremente, é necessário que não haja filas nos fluxos de 2ª ordem que interferem no de 3ª ordem. Seguindo o mesmo procedimento do tratamento de fila para um fluxo de 2ª ordem, chega-se a:

$$P_3 = \frac{C_3 - v_3}{C_3 - P_2 \cdot W_2 \cdot W_3 \cdot v_3}$$

Onde: P_3 = probabilidade de não haver fila no fluxo de 3ª ordem que interfere no de 4ª ordem;
 V_3 = volume de veículos no fluxo de 3ª ordem (veic/h);
 - as outras variáveis já foram definidas.

3.4.4 - Capacidade Prática

A capacidade prática, segundo este método, é o volume de veículos que garante condições aceitáveis de tráfego, tomando como indicador dessas condições, o tempo de espera médio.

A soma total dos tempos de espera é proporcional à relação entre as probabilidades de haver fila e de não haver fila*:

$$T_e = 3600 \frac{1 - P}{P} \text{ (seg/veic)}. \quad (3.36)$$

Logo, o tempo de espera médio de cada veículo resulta da divisão do tempo de espera total pelo número de veículos no fluxo secundário:

$$t_e = \frac{3600}{v} \cdot \frac{1 - P}{P} \text{ (seg/veic)} \quad (3.37)$$

Onde: t_e = tempo de espera médio de cada veículo (seg/veic);
 v = volume do fluxo considerado (veic/h); e
 P = probabilidade de não haver fila no fluxo considerado.

(*) Esta afirmação baseia-se nos estudos realizados por J. Harders que se encontra publicado no livro Straßenbau und Straßenverkehrstechnik

De uma forma genérica, $P = \frac{C - v_s}{C - W_2 \cdot W_3 \cdot v_s}$ e

$$1 - P = \frac{v_s (1 - W_2 \cdot W_3)}{C - W_2 \cdot W_3 \cdot v_s} \text{ . Logo,}$$

$$\frac{1 - P}{P} = \frac{v_s (1 - W_2 \cdot W_3)}{C - v} \text{ e}$$

$$t_e = 3600 \cdot \frac{1 - W_2 \cdot W_3}{C - v}$$

Sendo a reserva de capacidade $RC = C - v_s$, e desprezando os veículos que passam livremente ($W_2 \cdot W_3 = 0$), obtém-se a seguinte expressão:

$$t_e = 3600 \frac{1}{RC} \quad \text{ou}$$

$$RC = 3600 \frac{1}{t_e} \quad (3.39)$$

A capacidade prática é dada pela expressão:

$$C_p = C - \min . RC \quad (3.40)$$

$$\text{Sendo: } \min RC = 3600 \frac{1}{\max t_e} \quad (3.41)$$

Onde: C_p = capacidade prática (veic/h);

C = capacidade do fluxo considerado (veic/h);

$\min RC$ = valor da capacidade a ser reduzida para garantir a qualidade de tráfego exigido (veic/h); e

$\max t_e$ = valor máximo admissível do tempo de espera (seg.).

CAPÍTULO IV

ESTUDO DE CASO

4.1 - Introdução

Este capítulo objetiva apresentar o estudo de capacidade realizado para duas interseções, com controle por prioridade, situadas à Av. Ministro José Américo de Almeida, na cidade de João Pessoa, capital do Estado da Paraíba.

Inicialmente, pretendia-se realizar esse estudo para as interseções pertencentes ao sistema rodoviário urbano das cidades de Recife, João Pessoa e Natal, visando a obtenção de intervalos críticos e de sequência que pudessem ser considerados como representativos da Região Nordeste do Brasil. Procurou-se então contactar com técnicos vinculados ao Departamento de Trânsito - DETRAN dessas cidades e constatou-se a existência de sérias dificuldades, em Recife e Natal, para a concretização desse intento. Assim, esse estudo passou a se restringir à cidade de João Pessoa.

Após consultas aos técnicos do DETRAN de João Pessoa, selecionou-se, finalmente, as interseções a serem estudadas. Essas interseções estão localizadas ao longo da Av. Ministro José Américo de Almeida, são controladas por prioridade, com sinal PARE, e são ambas do tipo T, o que favoreceu a determi-

nação da influência dos veículos da via principal, que giram à direita, na aceitação de intervalos de tempo nessa via, por parte dos veículos da via secundária. De agora em diante, essa influência passará a ser chamada de "influência do giro à direita".

4.2 - Coleta de Dados

Os dados coletados podem ser divididos em:

- Dados de caracterização geral das interseções;
- Dados de tempo; e
- Dados de volume de veículos da via principal que giram à direita.

4.2.1 - Dados de Caracterização Geral das Interseções

Esses dados se referem à localização, características físicas e operacionais e características do tráfego das interseções consideradas. Os Quadros 4.1 e 4.2 apresentam a caracterização geral das interseções 1 e 2, respectivamente.

4.2.2 - Dados de Tempo

Esses dados se referem aos registros de tempo de chegada na interseção e saída dos veículos da via secundária, e da passagem dos veículos da via principal, pela interseção. A coleta foi realizada em dia útil, típico, e no período de tráfego mais intenso, ou seja, das 12:30 hs às 14:30 hs.

Quadro 4.1 - Caracterização Geral da Interseção 1.

LOCALIZAÇÃO		CARACTERÍSTICAS FÍSICAS E OPERACIONAIS	CARACTERÍSTICAS DO TRÁFEGO
BAIRRO	VIAS INTERCEPTANTES		
Torre	Principal: Av. Ministro José Américo de Almeida Secundária: Av. Barão de Mangape	Configuração: tipo T Largura: Via Principal - 7,00 m Via Secundária - 7,50 m Visibilidade: Boa Via Principal: mão única Via Secundária: mão dupla Manobra permitida: Convergência	Velocidade média na via principal - 60 Km/h Volume na via principal: que segue direto (Vd) - 899 veic/h que gira à direita (Vd) - 57 veic/h Volume na via secundária - 155 veic/h Composição do tráfego Via principal que segue direto - 95,71% aut. 2,41% Ônib. 1,88% cam. que gira à direita - 100% aut. Via secundária - 97,42% aut. 2,58% cam.

Quadro 4.2 - Caracterização Geral da Interseção 2.

LOCALIZAÇÃO		CARACTERÍSTICAS FÍSICAS E OPERACIONAIS	CARACTERÍSTICAS DO TRÁFEGO
BAIRRO	VIAS INTERCEPTANTES		
Torre	Principal: Av. Ministro José Américo de Almeida da Secundária: Av. Clemente Rosas	Configuração: tipo T Largura: Via principal - 7,00 m Via secundária - 8,50 m Visibilidade: Boa Via principal: mão única Via secundária: mão dupla Manobra permitida: Convergência	Velocidade média na via principal: 60 Km/h Volume na via principal: que segue direto (Vd) - 1116 veic/h que gira à direita (Vg) - 24 veic/h Volume na via secundária: 222 veic/h Composição do tráfego Via principal que segue direto - 96,75% aut. 1,67% Ônib. 1,58% cam. que gira à direita - 100% aut. Via secundária: 97,30 % aut. 2,70 % cam.

4.2.2.1 - Intervalos aceitos e rejeitados

Utilizando-se um cronômetro digital, o registro iniciava-se quando o veículo da via secundária chegava na interseção. Em seguida, registrava-se a passagem dos veículos da via principal, até a passagem do primeiro veículo da via principal, após a saída do veículo da via secundária. A diferença entre os registros de passagem dos dois últimos veículos da via principal representa um intervalo aceito, enquanto a diferença entre os registros anteriores representam intervalos rejeitados.

Os resultados obtidos do levantamento estão apresentados a seguir:

Quadro 4.3 - Intervalos Aceitos e Rejeitados Para a Interseção 1

DURAÇÃO DOS INTERVALOS (seg.)	INTERVALOS ACEITOS	INTERVALOS REJEITADOS
1	-	73
2	1	104
3	-	66
4	7	20
5	9	8
6	16	6
7	8	-
8	7	-
9	1	-
10	2	-
TOTAL	51	277

Quadro 4.4 - Intervalos Aceitos e Rejeitados Para a Interseção 2

DURAÇÃO DOS INTERVALOS (seg.)	INTERVALOS ACEITOS	INTERVALOS REJEITADOS
1	-	124
2	1	189
3	4	87
4	17	55
5	21	27
6	31	10
7	21	-
8	10	2
9	12	1
10	2	-
TOTAL	119	495

4.2.2.2 - Intervalos entre veículos da via secundária que aceitam o mesmo intervalo.

Estes são os intervalos entre os veículos da via secundária, que antes esperavam, e que aceitam o mesmo intervalo oferecido pelos veículos da via principal.

Quadro 4.5 - Intervalos Entre Veículos da Via Secundária que Aceitam o Mesmo Intervalo na Via Principal.

DURAÇÃO DOS INTERVALOS (seg.)	INTERSEÇÃO	
	1	2
1	-	5
2	12	23
3	10	21
4	8	11
5	4	8
6	8	4
7	2	2
TOTAL	44	74

4.2.3 - Dados de Volume de Veículos da Via Principal Que Giram à Direita.

Esses dados se referem à determinação do volume de veículos da via principal que giram à direita, para um posterior cálculo da influência desses veículos na manobra efetuada pelos veículos da via secundária. Foram coletados dados para três situações distintas, que são: veículos girando à direita sem indicação prévia (SI); veículos girando à direita com indicação prévia, porém, não aceita pelos veículos da via secundária (CIR); e veículos girando à direita com

indicação prévia aceita pelos veículos da via secundária (CIA).

O resultado do levantamento foi:

Quadro 4.6 - Veículos da Via Principal que Giram à Direita

SITUAÇÃO	INTERSEÇÃO 1	INTERSEÇÃO 2
SI	30	23
CIA	12	11
CIR	21	19
TOTAL	63	53

Os resultados apresentados no quadro anterior foram levantados em horários fora de pico, onde a realização ou não da manobra partindo da via secundária dependia única e exclusivamente dos veículos da via principal que giravam à direita.

4.3 - Determinação dos Intervalos Críticos

De acordo com a definição dada no item 3.2.2 e partindo dos dados apresentados nos Quadros 4.1 e 4.4 os intervalos críticos foram calculados da seguinte forma:

Quadro 4.7 - Intervalos Aceitos Acumulados e Intervalos Rejeitados Acumulados Para a Interseção 1.

DURAÇÃO DOS INTERVALOS (Seg.)	INTERVALOS ACEITOS ACUMULADOS	INTERVALOS REJEITADOS ACUMULADOS
1	-	277
2	1	204
3	1	100
4	8	34
5	17	14
6	33	6
7	41	-
8	48	-
9	49	-
10	51	-

Pode-se observar no Quadro 4.7, que o intervalo de tempo para o qual o número de intervalos rejeitados acumulados está mais próximo do número de intervalos aceitos acumulados, é 5 segundos. É possível afirmar, então, que o intervalo crítico é maior do que 4 seg. e menor do que 6 seg.

A Figura 4.3 mostra as curvas correspondentes aos intervalos aceitos acumulados, rejeitados acumulados e a determinação do intervalo crítico para a interseção 1.

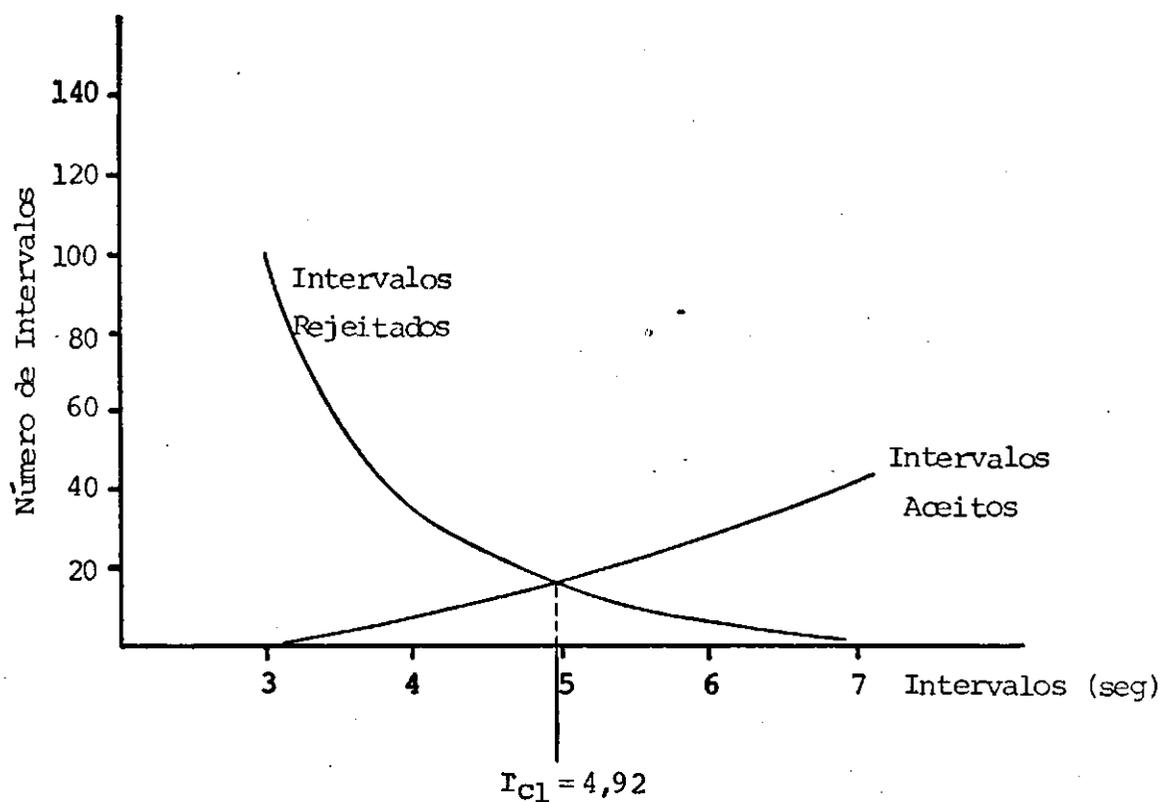


Figura 4.3 - Determinação do Intervalo Crítico
Para a Interseção 1.

Do mesmo modo como foi feito para a interseção 1, observa-se no Quadro 4.8, que o intervalo de tempo para o qual o número de intervalos rejeitados acumulados está mais próximo do número de intervalos rejeitados e acumulados, é 5 segundos. E o intervalo crítico está também entre 4 e 6 segundos. Graficamente tem-se:

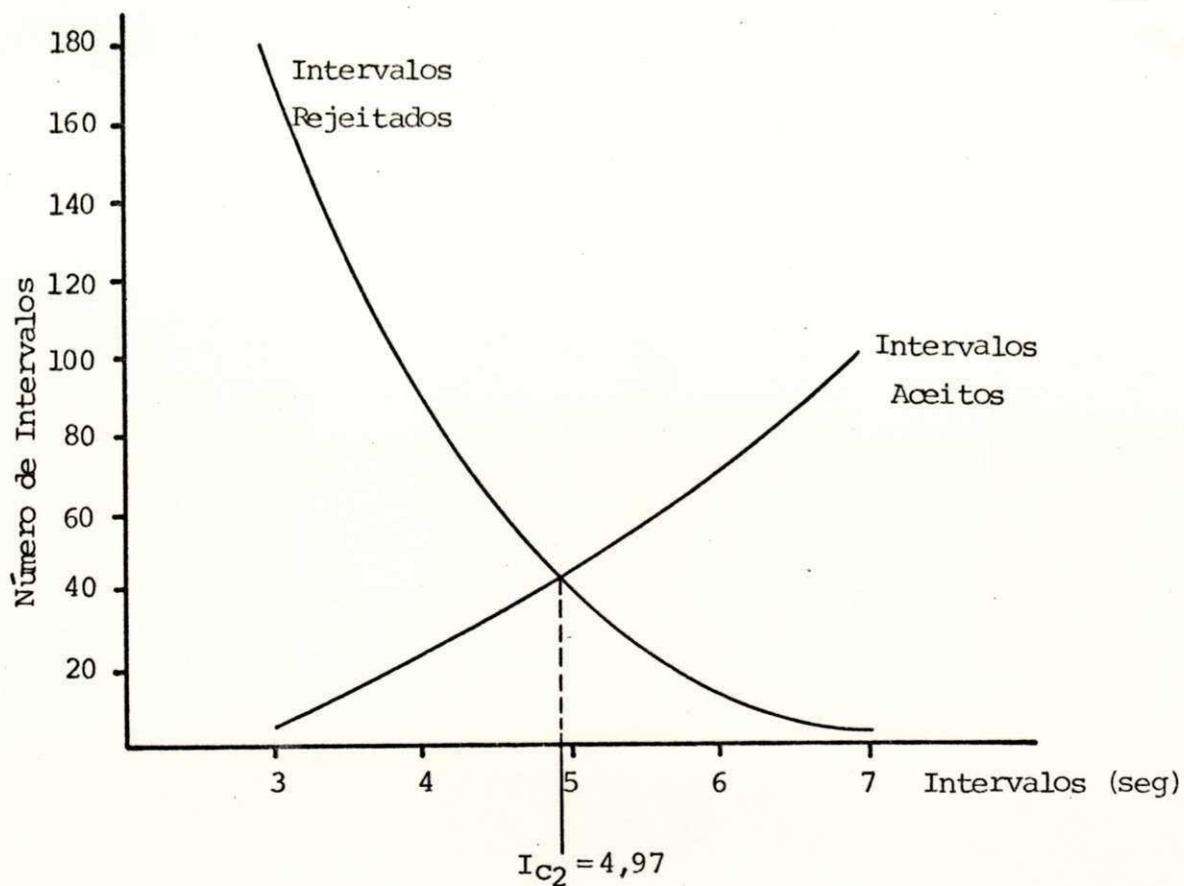


Figura 4.4 - Determinação do Intervalo Crítico para a Interseção 2.

Quadro 4.8 - Intervalos Aceitos Acumulados e Intervalos Rejeitados Acumulados Para a Interseção 2.

DURAÇÃO DOS INTERVALOS (seg.)	INTERVALOS ACEITOS ACUMULADOS	INTERVALOS REJEITADOS ACUMULADOS
1	-	495
2	1	371
3	5	182
4	22	95
5	43	40
6	74	13
7	95	3
8	105	3
9	117	1
10	119	-

4.4 - Determinação dos Intervalos de Sequência

De acordo com a definição do item 3.2.3 e com os dados apresentados no Quadro 4.5, foram calculados os intervalos de sequência para as duas interseções:

$$I_{S1} = 3,818 \text{ seg; e}$$

$$I_{S2} = 3,189 \text{ seg.}$$

Onde: I_{S1} e I_{S2} são os intervalos de sequência para as interseções 1 e 2, respectivamente.

4.5 - Determinação da "Influência do Giro à Direita"

Os veículos da via principal que giram à direita, apesar de não conflitarem com os fluxos provenientes da via secundária, inibem parcialmente a execução de suas manobras.

Quando um veículo da via principal gira à direita sem nenhuma indicação prévia, o motorista da via secundária, que está aguardando uma oportunidade para entrar na interseção, não sabe que veículo vai girar, e só inicia sua manobra depois que o veículo inicia o movimento de giro à direita. Portanto, os veículos que giram sem nenhuma indicação prévia, inibem completamente o fluxo secundário, o que equivale a passagem direta desses veículos pela via principal.

Se o veículo possui uma indicação e o motorista do veículo da via secundária não aceita-la, a influência é idêntica à do caso anterior. Entretanto, se a indicação for aceita, constitui o único caso em que os veículos que giram à

direita não influenciam a realização da manobra partindo da via secundária. Utilizando a mesma nomenclatura apresentada no ítem 4.2.3, tem-se:

$$I_{GD} = \frac{SI + CIR}{SI + CIA + CIR} \times 100 \quad (\%) \quad (4.1)$$

Onde: I_{GD} é a "influência do giro à direita".

Com os valores do Quadro 4.6, encontrou-se, respectivamente, para as interseções 1 e 2:

$$I_{GD1} = 80,952 \quad \%$$

$$I_{GD2} = 79,245 \quad \%$$

Como a capacidade é calculada para horários de pico, é de se esperar que a "influência do giro à direita", nesta situação, seja inferior a encontrada nos períodos fora de pico, pois, tempos de espera elevados fazem com que os motoristas se submetam a maiores riscos aceitando mais as indicações dos veículos da via principal que giram à direita, reduzindo assim o valor da "influência do giro à direita".

Por outro lado, é também de se esperar para a realidade brasileira, que o valor da "influência de giro à direita" nos horários de pico seja superior aos valores recomendados pelos Métodos Alemão e Americano, em virtude de os motoristas desses países serem mais disciplinados que os nossos.

Pelas razões já expostas, e por não existir, na bibliografia disponível sobre o assunto referências acerca da magnitude da "influência de giro à direita" para a realidade brasileira, sugere-se como valor médio para essa influência,

a média entre o valor encontrado para as interseções estudadas e o recomendado pelos Métodos Alemão e Americano. Assim, passa-se a ter:

$$IGD1 = 65,476 \%$$

$$IGD2 = 64,623 \%$$

Onde: IGD1 e IGD2 são as "influências do giro à direita" para as interseções 1 e 2, respectivamente.

4.6 - Determinação da Capacidade

Nas duas interseções escolhidas, as manobras dos veículos partindo da via secundária conflitam apenas com o fluxo da via principal que segue direto. Tem-se, então, um caso de fluxo de segunda ordem. A capacidade é dada pela expressão 2.1, reescrita a seguir:

$$C = \frac{e^{-\beta}}{e^{\alpha} - 1} \cdot V$$

$$\text{Sendo: } \alpha = \frac{1}{3600} \cdot V \cdot I_S; \text{ e}$$

$$\beta = \frac{1}{3600} \cdot V \cdot (I_C - I_S)$$

Neste caso, V é o volume da via principal que segue direto acrescido da parcela do volume que gira à direita, e que inibe o fluxo da via secundária, ou seja:

$$V = V_d + (I_{GD} \cdot V_g)/100 \quad (4.2)$$

onde: V = volume conflitante (veic/h);

V_d = volume da via principal que segue direto (veic/h);

V_g = volume da via principal que gira à direita (veic/h).

Calculando-se as capacidade das interseções utilizando os intervalos críticos e de sequência e a "influência do giro à direita" encontrados para cada uma, separadamente, tem-se:

Quadro 4.9 - Capacidade das Interseções 1 e 2

INTERSEÇÃO	I_c (seg)	I_s (seg)	V (veic/h)	CAPACIDADE (veic/h)
1	4,92	3,818	936	413
2	4,97	3,189	1132	375

Como pode ser observado no Método Americano (Ítem 2.5), a capacidade é determinada em função do intervalo crítico e do volume conflitante. Isto pode ser obtido, mantendo constantes os intervalos críticos e de sequência na expressão da capacidade (2.1) e variar apenas o volume conflitante, como será feito a seguir.

Quadro 4.10 - Capacidade em Função do Volume Conflitante Para a Interseção 1

VOL. CONF. (Veíc/h)	α	β	CAPACIDADE (veic/h)
200	0,212	0,061	797
400	0,424	0,122	670
600	0,636	0,184	561
800	0,848	0,245	469
1000	1,061	0,306	390
1200	1,273	0,367	323
1400	1,485	0,429	267
1600	1,697	0,490	220

Quadro 4.11 - Capacidade em Função do Volume Conflitante Para a Interseção 2

VOL. CONF. (veíc/h)	α	β	CAPACIDADE (veic/h)
200	0,177	0,099	935
400	0,354	0,198	773
600	0,531	0,297	636
800	0,709	0,396	522
1000	0,886	0,495	428
1200	1,063	0,594	350
1400	1,240	0,693	285
1600	1,417	0,792	232

A representação gráfica desses resultados está na Figura 4.5, mostrada a seguir.

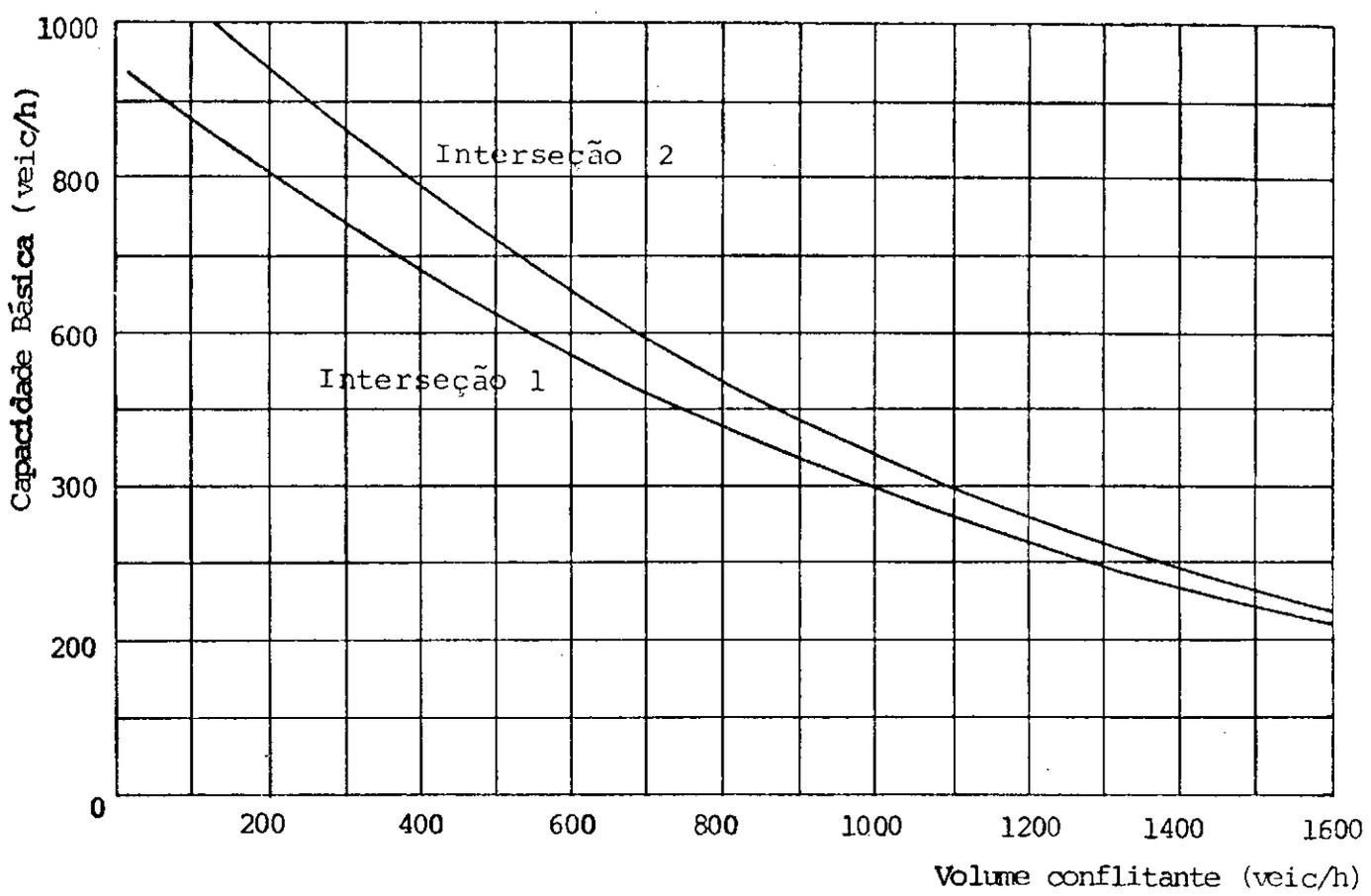


Figura 4.5 - Representação Gráfica da Capacidade em Função do Volume Conflitante Para as Interseções 1 e 2.

Em estudos envolvendo um grande número de interseções, seria inviável a realização de pesquisas em todas elas. Assim sendo, retira-se uma amostra dessas interseções, são formados grupos que possuam características semelhantes e coletados dados para a determinação de parâmetros que são tomados como representativos de cada grupo.

Neste trabalho, as interseções possuem características semelhantes, porém, não podem ser tomadas como uma amostra representativa desse tipo de interseção. Entretanto, no

caso de uma amostra representativa, uma alternativa seria a utilização da média dos valores dos intervalos crítico e de sequência e da "influência do giro à direita", sem incorrer em grandes erros. Ter-se-ia então, $\bar{I}_C = 4,945$ seg., $\bar{I}_S = 3,504$ seg. e $\bar{I}_{GD} = 65,050$ %, e a capacidade em função do volume conflitante para tais valores seria:

Quadro 4.12 - Capacidade em Função do Volume Conflitante Para Valores Médios dos Intervalos Críticos e de Sequência

VOL. CONF. (veic/h)	α	β	CAPACIDADE (veic/h)
200	0,195	0,080	857
400	0,389	0,160	717
600	0,584	0,240	595
800	0,779	0,320	493
1000	0,973	0,400	407
1200	1,168	0,480	335
1400	1,363	0,560	275
1600	1,557	0,640	225

Graficamente, estes resultados teriam a seguinte representação:

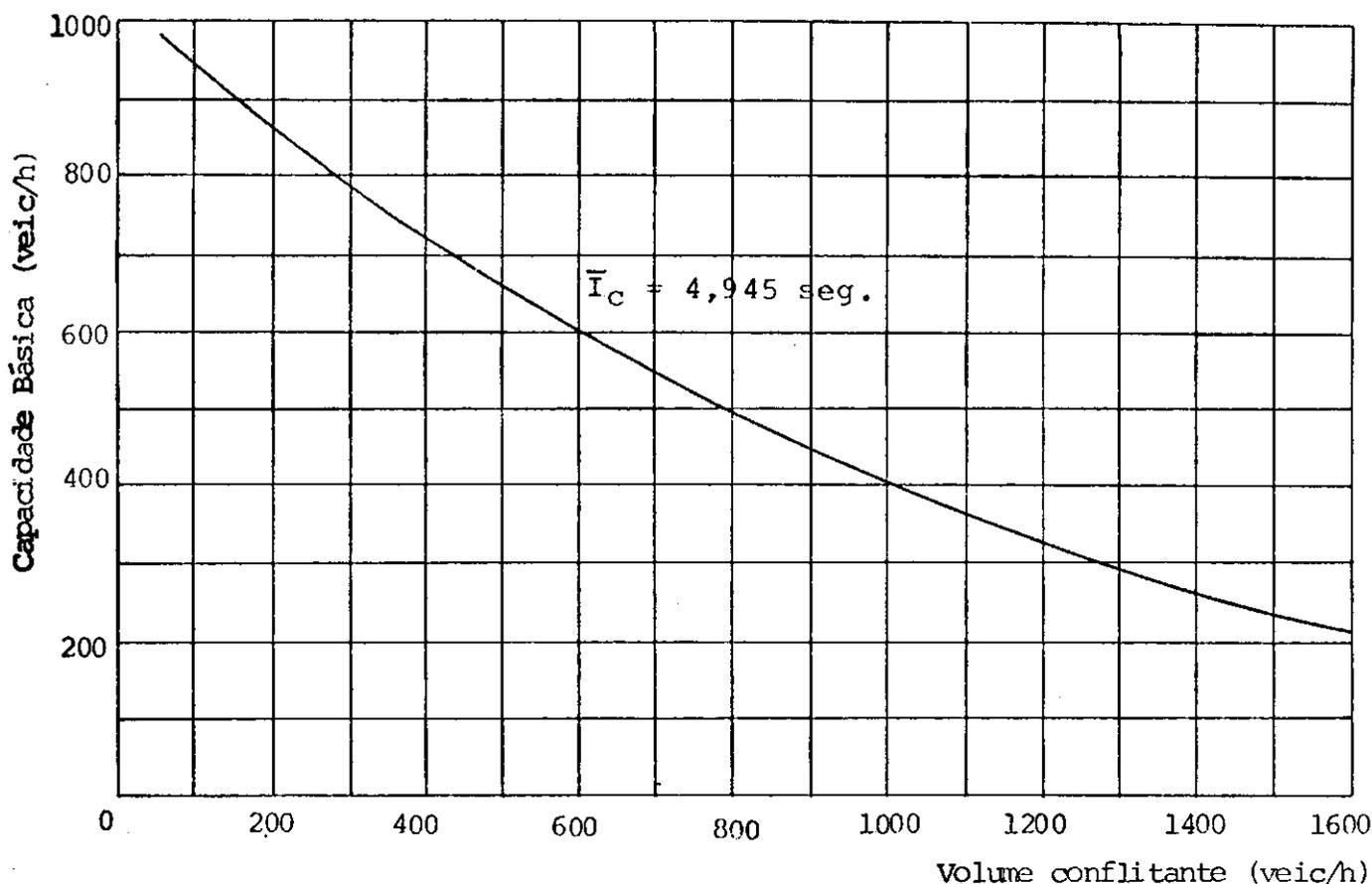


Figura 4.6 - Representação Gráfica da Capacidade em Função do Volume Conflitante Para os Valores Médios dos Intervalos Críticos e de Sequência.

Utilizando-se os valores médios dos intervalos críticos e de sequência e da "influência do giro à direita", a capacidade da interseção 1 seria 433 veic/h e da interseção 2 seria 358 veic/h. Comparando-se estes resultados com as capacidades apresentados no Quadro 4.9, calculadas separadamente para cada interseção, vê-se que houve um acréscimo de 4,84% na interseção 1 e um decréscimo de 4,53% na interseção 2, diferenças estas que não podem ser consideradas como

significantes.

4.7 - Análise Comparativa dos Resultados

Como pode ser facilmente percebido, os valores dos intervalos crítico e de sequência e a "influência do giro à direita" estão intimamente ligados ao tipo de comportamento dos motoristas perante o tráfego. Motoristas de diferentes países tendem a ter reações e comportamentos diferentes, pois estes fatores dependem consideravelmente da cultura de cada país e tipo de educação de trânsito que tiveram os motoristas. Por isto é de se esperar que o emprego de um método de cálculo de capacidade desenvolvido para um outro país, conduza a erros significativos.

Se no cálculo das capacidades das interseções 1 e 2 tivesse sido utilizados os métodos apresentados no Capítulo 2, os resultados seriam:

Quadro 4.13 - Cálculo das Capacidades das Interseções 1 e 2, Segundo os Métodos Alemão, Inglês e Americano.

MÉTODO	INTERSEÇÃO	I_C (seg)	I_S (seg)	V(veic/h)	CAPACIDADE
Alemão	1	6,20	4,00	928	292
	2	6,20	4,00	1128	226
Inglês	1	4,00	-	899	485
	2	4,00	-	1116	330
Americano	1	5,25	-	928	395
	2	5,25	-	1128	305

Comparando estes resultados com os obtidos utilizando os valores médios dos intervalos críticos e de sequência e da "influência do giro à direita", encontrados para as interseções 1 e 2, ter-se-ia, em termos de porcentagens:

Quadro 4.14 - Comparação dos Resultados em Termos de Porcentagem

MÉTODO	INTERSEÇÃO	I _c	I _s	V	CAPACIDADE
Alemão	1	+ 25,38	+ 14,16	- 0,85	- 32,56
	2	+ 25,38	+ 14,16	- 0,35	- 36,87
Inglês	1	- 19,11	---	- 3,95	+ 12,00
	2	- 19,11	---	- 1,41	- 7,82
Americano	1	+ 6,17	---	- 0,85	- 8,78
	2	+ 6,17	---	- 0,35	- 14,80

Os sinais + e - indicam que os valores médios foram ultrapassados e reduzidos, respectivamente. No Método Alemão, por exemplo, o intervalo crítico é 25,38% maior ao o intervalo crítico médio das interseções 1 e 2, enquanto que o intervalo de sequência é 14,16 % também maior. As capacidades são que apresentam as maiores discrepâncias: 32,56 % menor para a interseção 1 e 36,87 % menor para a interseção 2. O Método Inglês apresenta as menores diferenças entre os resultados das capacidades, + 12,00 % e - 7,82%, porém, o mesmo não acontece com o intervalo crítico, que é 19,11 % menor. O Método Americano utiliza intervalo crítico mais próximo do intervalo crítico médio das duas interseções e as capacida-

des não apresentam discrepâncias significativas, pelo menos no caso da interseção 1.

Quanto ao volume conflitante, vê-se que as diferenças são bastante pequenas, entretanto, isto se deve ao fato de o volume da via principal que gira à direita ser muito pequena em relação ao que passa direto, uma vez que as "influências do giro à direita" diferem significativamente. O valor médio encontrado para as interseções 1 e 2 é 30,1% maior do que o considerado pelos métodos Alemão e Americano.

Se as capacidades tivessem sido calculadas segundo os métodos Inglês e Americano, utilizando-se os parâmetros encontrados nas interseções estudadas, os resultados seriam os apresentados no Quadro 4.15 onde a quarta coluna desse quadro se refere à variação dessas capacidades em relação aos resultados das capacidades obtidas com os valores médios de I_C , I_S e I_{GD} , para este estudo de caso.

Quadro 4.15 - Capacidades das Interseções 1 e 2 Segundo os Métodos Inglês e Americano, Utilizando-se os Parâmetros Locais.

MÉTODO	INTERSEÇÃO	CAPACIDADE	%
Inglês	1	350	- 19,17
	2	230	- 35,75
Americano	1	428	- 1,15
	2	345	- 3,63

Conforme mostrado no Quadro 4.15, apenas o Método Americano apresentou pequenas diferenças nos valores das capa-

idades, fato esse possivelmente devido a este método ter sido originado do Método Alemão.

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES E SUGESTÕES

5.1 - Conclusões

As conclusões a que se pode chegar com o desenvolvimento deste trabalho são as seguintes:

- Para o grupo de interseções estudadas, verificou-se diferenças entre os parâmetros utilizados na Inglaterra, Alemanha e Estados Unidos, e os parâmetros médios encontrados para as duas interseções. Consequentemente, houve diferenças entre as capacidades calculadas através do uso desses parâmetros, o que reforça a necessidade de estudos desse tipo voltados para a realidade brasileira;
- Interseções projetadas tendo como base os métodos Alemão e Americano conduziram a gastos desnecessários visto estas capacidades serem muito menores do que as obtidas através do Método Alemão utilizando os valores médios dos intervalos crítico e de sequência e da "influência do giro à direita", do estudo de caso.
- O fato de a "influência do giro à direita" ter sido 30,10 % superior as utilizadas pelos Métodos Alemão

e Americano, indica que os motoristas desses países são mais disciplinados no trânsito do que os motoristas pessoenses.

Deve-se deixar claro que essas conclusões se referem apenas as interseções estudadas, e que para afirmações desse tipo a nível de Brasil necessitaria de estudos semelhantes para uma amostra representativa do país, como os que são sugeridos a seguir.

5.2 - Sugestões

Como tema para pesquisas futuras sobre o assunto, sugere-se:

- Determinar os intervalos críticos e de sequência para os diversos tipos de manobra em função do número de faixas, da velocidade média dos veículos na via principal e do tipo de sinal;
- Para fins de ajustamento dos intervalos críticos e de sequência, determinar a influência do greide, do raio da curva, da composição do tráfego e da população da cidade;
- Estudar a influência dos veículos da via principal que giram à direita na realização das manobras dos veículos da via secundária;
- Realizar estudos sobre tempos de espera dos veículos na via secundária, visando uma utilização no cálculo

lo da capacidade prática e no estabelecimento de níveis de serviço.

O desenvolvimento dessas pesquisas possibilitaria uma adaptação do método Alemão à realidade brasileira, semelhante a realizada pelos americanos.

REFERÊNCIAS

- 1) HIGHWAY RESEARCH BOARD, Highway Capacity Manual, Special Report 87, EUA, 1985.
- 2) WEHNER, B. Leistungsfähigkeit Nicht Lichtsignal geregelter Knotenpunkte, Technische Universität Berlin, 1972.
Traduzida pelo Prof. José Eugênio Leal.
- 3) PORTUGAL, L. S., "Estudo de Capacidade de Interseções com Prioridade", Apostila do Curso de Engenharia de Tráfego, Programa de Engenharia de Transportes, COPPE/UFRJ, 1984.
- 4) ANDRADE, J. P. D., The Performance of Urban Intersections in Brazil, Document for transference from MPhil to PhD., Southampton, 1985.
- 5) LUCAS, Cristina Maria Baddini, Estudo do Comportamento dos Motoristas em Relação à Aceitação de Brechas em Interseções com Prioridade. Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 1985.
- 6) SALTER, R. J., Highway Traffic Analysis and Design, London, The MacMillan Press Ltd., 1968.
- 7) PIGNATARO L. J., Traffic Engineering, Theory and Practice 1973.

- 8) DANIEL L. Gerlough and MATTHEW J. Huber, Transportation Research Board, Traffic Flow Theory - A Monograph - Washington, 1975.