

NT 220

2012

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE MÁXIMA PERMITIDA SOBRE O VALOR DA CAPACIDADE

Estudo de caso – Avenida 23 de Maio

Walter Ferreira dos Santos e Luis Molist Vilanova

1. Objetivo

O objetivo deste trabalho é analisar a influência da velocidade regulamentada em uma via classificada como de trânsito rápido no número máximo de veículos que essa via consegue transportar durante o período padrão de uma hora, ou seja, na sua capacidade.

Este estudo foi instigado pelas recentes medidas adotadas na cidade de São Paulo reduzindo a velocidade máxima permitida em diversas vias. Deseja-se verificar possíveis alterações provocadas pela redefinição da velocidade máxima permitida de uma via expressa em relação à sua capacidade.

2. Amostra considerada e tratamento dos dados

2.1. Considerações gerais

Em 6/2/2010, os dois sentidos da Av. 23 de Maio tiveram reduzidas as suas velocidades máximas permitidas. O limite, que era de 80 km/h, passou para 70 km/h.

A fim de compreender o impacto dessa medida na capacidade das pistas, foram analisados os dados de equipamentos automáticos de fiscalização localizados nesta via antes e depois da mudança. Na pista Bairro-Centro, um equipamento está posicionado um pouco antes do Viaduto Pedroso e na pista oposta, logo após o Viaduto Tutóia, conforme ilustrado nas figuras 1, 2 e 3.

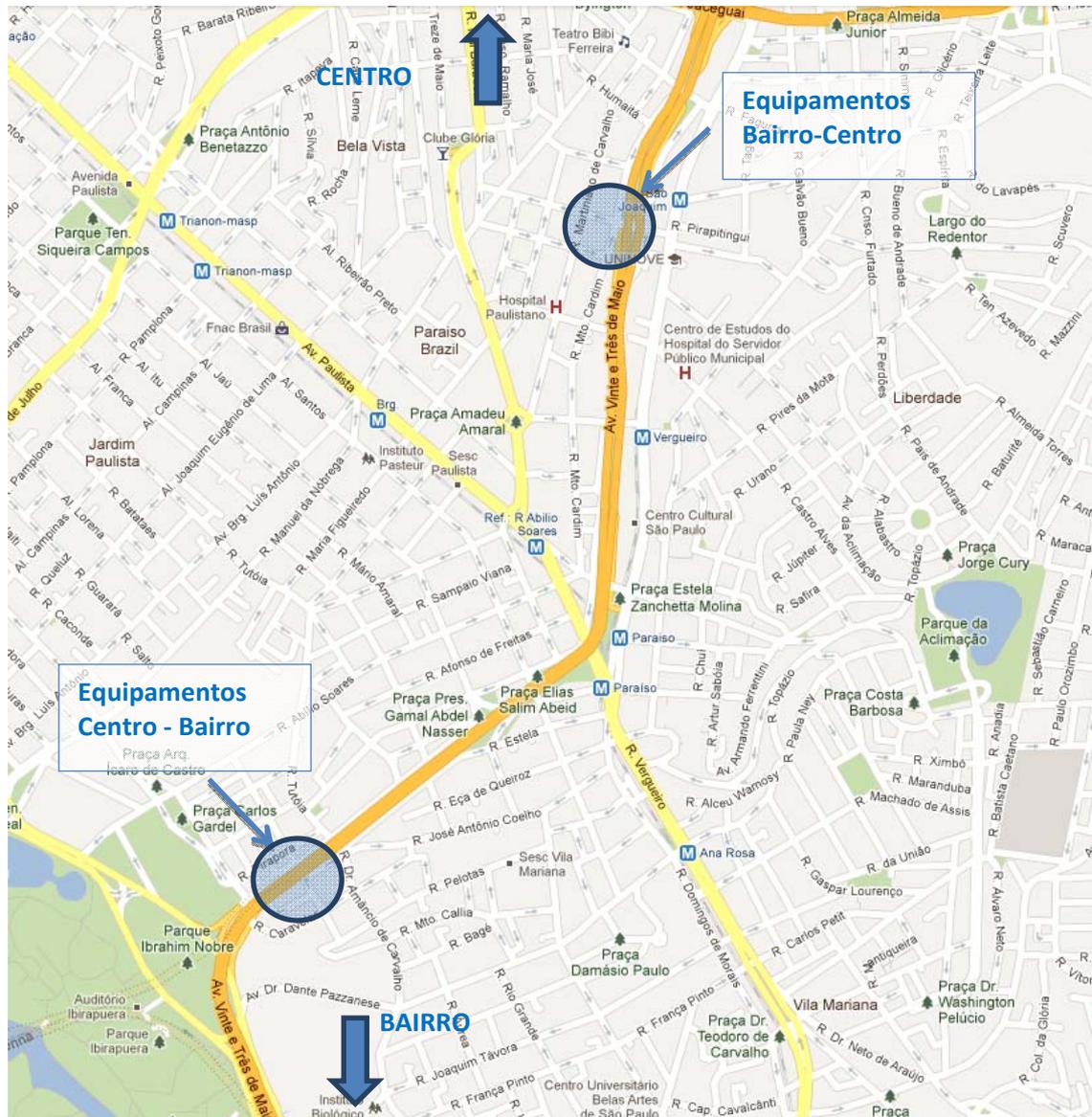


Figura 1 – Localização dos equipamentos de fiscalização utilizados



Figura 2 – Vista aproximada dos dois equipamentos de fiscalização no sentido Centro- Bairro



Figura 3 – Vista aproximada dos dois equipamentos de fiscalização no sentido Bairro-Centro e do início da quinta faixa

A rigor, a pista Bairro-Centro possui cinco faixas de rolamento na seção estudada. Entretanto, a faixa mais à direita apresenta fluxo bem inferior às outras, pois teve início apenas alguns metros antes. Na pista Centro-Bairro, existem cinco faixas operando em condições plenas.

O presente trabalho tomou por base os dados coletados e tratados pelo Projeto SAIT – Sistema Avançado de Informação de Trânsito. Este projeto está sendo desenvolvido pelas áreas GIN, GTI e GPL da CET SP e consiste em coletar e tratar os dados de trânsito de diversas fontes, inclusive dos sistemas automáticos de fiscalização, a fim de obter relatórios operacionais atualizados a cada 5 minutos e relatórios históricos para efeito de estudos de médio e longo prazo.

No intuito de assegurar que fatores exógenos não estariam influenciando na análise dos dados coletados, consultou-se o DEC – Vila Mariana, departamento responsável pela operação do corredor 23 de Maio e da área no entorno, que não reportou nenhuma ação significativa que pudesse vir a distorcer os resultados.

2.2. Hipóteses adotadas

Decidiu-se que as motocicletas não seriam consideradas, nem para efeito de cálculo da capacidade da via, nem para a determinação da distribuição das velocidades. O motivo foi que a introdução desses veículos poderia vir a distorcer os resultados já que o fato de circularem nos “corredores” entre as faixas de rolamento não os faz participantes do tráfego geral. Além disso, os equipamentos de fiscalização não monitoram esse “corredor” onde a maioria das motocicletas trafega. Esse é o motivo de que de todos os veículos registrados apenas cerca de 2,5% (Tabela 1) foram motocicletas quando se sabe que essa proporção é bem maior na realidade.

A classificação dos veículos foi feita em função do seu comprimento, que é um dos dados coletados pelos sistemas de fiscalização. Os seguintes critérios foram adotados:

- motocicletas - entre 0 e 2,0 m
- automóveis - entre 2,1 e 9,9 m
- ônibus - igual ou acima de 10,0 m

Para a determinação do fator de equivalência, adotou-se que os automóveis têm peso igual a 1 ucp (unidade de carro de passeio) e os veículos maiores têm peso igual a 2 ucp.

A fim de representar o período “antes”, quando a velocidade regulamentada era de 80 km/h, foram analisados os dados do período 01/08/09 a 30/11/09.

Para representar o período “depois”, em que a velocidade regulamentada é igual a 70 km/h, recorreu-se aos dados do período 01/08/10 a 30/11/10.

Considerou-se que nesse período os motoristas já estavam acostumados com a nova regulamentação, pois já havia decorrido seis meses da alteração.

Tabela 1- Distribuição dos veículos em função do seu comprimento

Composição (%)				
Comprimento (m)	Bairro-Centro		Centro-Bairro	
	2009	2010	2009	2010
≤ 2,0	2,7	3,1	2,4	2,1
> 2,0 e < 10,0	95,7	95,8	96,4	96,6
≥ 10,0	1,6	1,1	1,2	1,3

A Tabela 1 apresenta a distribuição de todos os veículos que passaram pelas seções monitoradas, durante os dois períodos estudados, em função de seu comprimento.

2.3. Dados considerados

Foram adotadas amostras com intervalos de 5 minutos como unidade de trabalho. Cada amostra é formada pelas informações das velocidades e de comprimento de todos os veículos que passaram pela seção monitorada durante esse intervalo. Estabeleceu-se que a velocidade representativa de uma amostra é a média harmônica dessas velocidades. O volume representativo da amostra é igual ao número dos veículos que passaram neste intervalo, corrigido em função dos fatores de equivalência mencionados anteriormente. Foram analisadas quatro situações distintas a fim de comparar as situações de 2009 e 2010 para as duas pistas. A Tabela 2 apresenta a quantidade de intervalos de 5 minutos estudados para cada uma dessas quatro situações e o correspondente total de veículos que foram registrados durante esses intervalos.

Tabela 2 – Número de amostras em cada uma das quatro situações

	Bairro - Centro		Centro - Bairro	
	2009	2010	2009	2010
Nº de amostras de 5 minutos	33.685	27.958	32.394	21.970
Nº total de veículos registrados durante as amostras de 5 minutos	11.671.663	10.338.451	13.104.641	9.540.818

2.4. Metodologia para eleger as amostras que representarão a capacidade de cada pista

Para efeito da determinação da capacidade de cada pista da Av. 23 de Maio, em cada um dos dois períodos, foram utilizadas, para cada uma das quatro situações analisadas, as correspondentes 300 amostras com maior volume dentre as mencionadas na Tabela 2, correspondendo, aproximadamente, a 1% do total das amostras registradas em cada uma das quatro situações estudadas. O cuidado de trabalhar com apenas o 1% de maior volume garante que estamos operando com dados que realmente foram coletados numa situação de capacidade.

As Figuras 4 e 5 se referem à distribuição desses 300 intervalos mais carregados para as quatro situações analisadas.

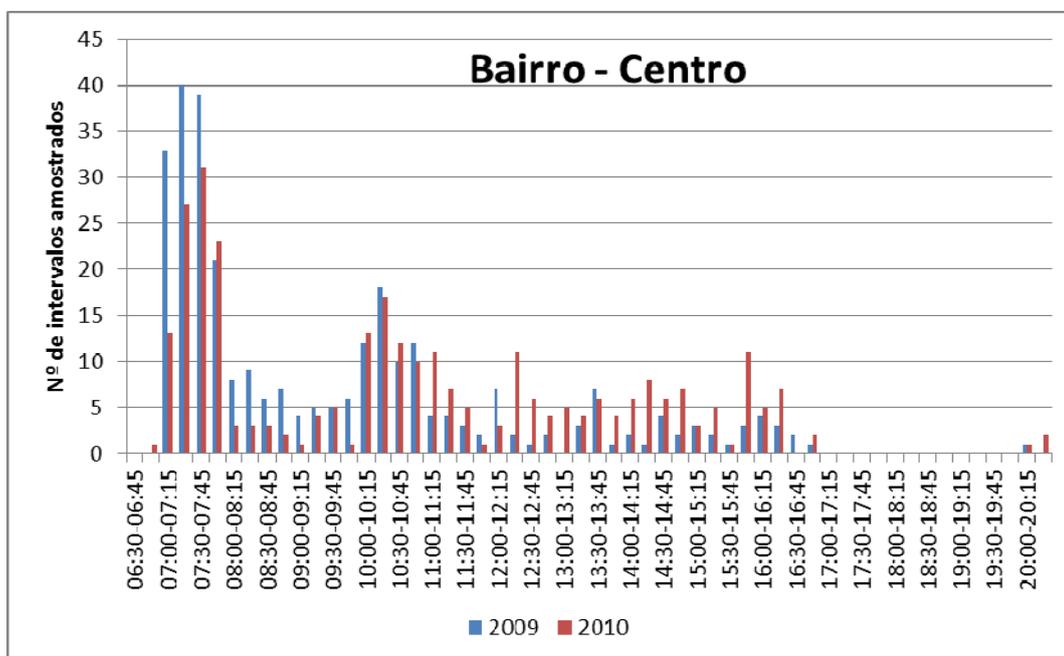


Figura 4 – Distribuição dos intervalos amostrados no Bairro-Centro

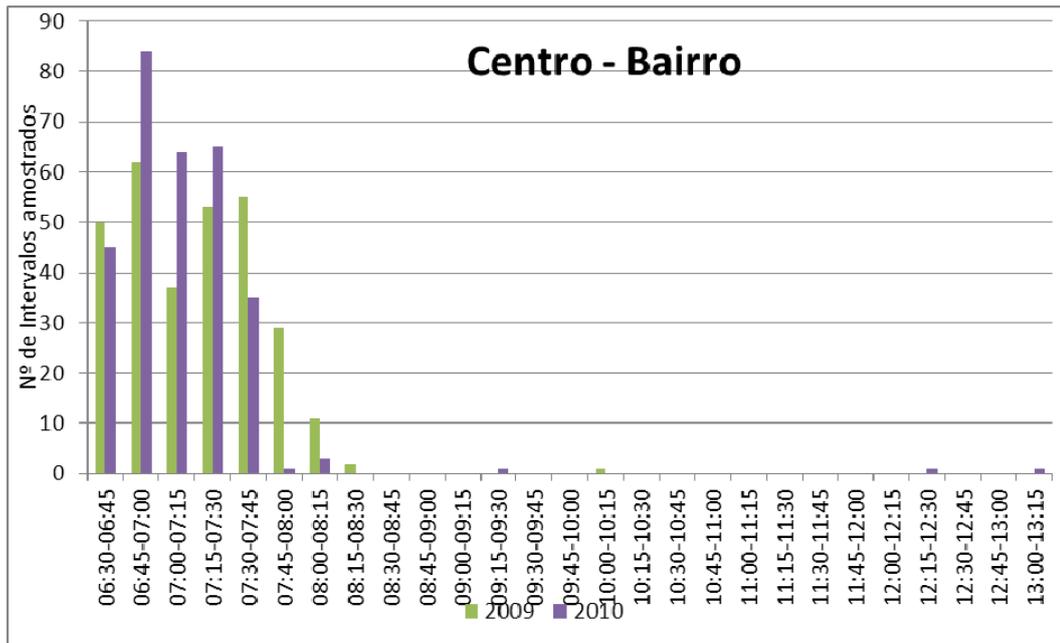


Figura 5 – Distribuição dos intervalos amostrados no Centro- Bairro

Observa-se que, no sentido Bairro-Centro, os intervalos com maior volume ocorreram principalmente na parte da manhã, mas ainda encontramos algumas amostras no início da tarde. Já no sentido Centro-Bairro, praticamente todas as amostras ocorreram entre as 6:30 h e as 8:15 h. Ressalte-se que não foram identificados intervalos com volumes elevados durante o Pico da Tarde. A explicação é que durante esse período os trechos a jusante encontram-se congestionados, não permitindo que o fluxo atinja a capacidade da via mesmo que exista demanda suficiente.

3. Relação Velocidade x Fluxo

3.1. Base teórica

A Figura 6 ilustra a relação teórica existente entre a velocidade (V) e o fluxo (q) para uma condição ideal em que a velocidade é diretamente proporcional à densidade e em que os veículos têm dimensão zero. Apesar de serem hipóteses muito simplistas face à complexidade do trânsito, a figura resultante, em forma de parábola, explica bastante bem o conceito básico dessa relação.

Quando o fluxo é muito baixo, próximo a zero, a velocidade corresponde à velocidade de projeto da via (velocidade diretriz), representada por V_f . Essa velocidade pode ser entendida como aquela em que um veículo iria circular, em condições seguras, mas sem considerar eventuais limitações

regulamentares se estivesse circulando sozinho na via, sem nenhum impedimento. À medida que o fluxo vai aumentando, a velocidade vai diminuindo até que se chega ao máximo fluxo que a via consegue comportar, ou seja, sua capacidade; este ponto é representado, na figura, pela situação em que o fluxo é $q_{máx}$ e a velocidade correspondente é V_0 . Se mais veículos continuarem a ser introduzidos na via, ou seja, se a densidade aumentar, o fluxo medido em uma seção qualquer vai decrescer até o ponto de congestionamento total em que tanto o fluxo como a velocidade são iguais a zero.

Nessa abordagem simplista, a velocidade v_0 , para a qual corresponde o máximo número de veículos que podem passar, ou seja, a capacidade da via, é igual à metade da velocidade de projeto da via. Por exemplo, teremos o máximo número de veículos que podem passar numa via projetada para 120 km/h, quando eles trafegarem a 60 km/h.

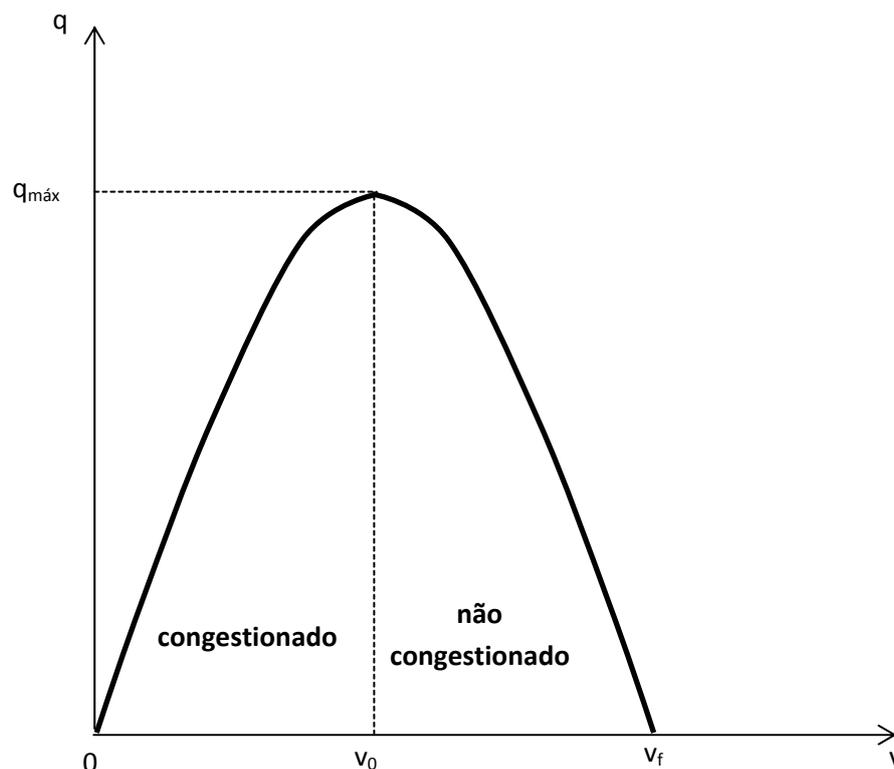


Figura 6 – Relação teórica entre a velocidade (V) e o fluxo (q) para condições ideais - Fonte: apostila Teoria do Fluxo de Tráfego – Prof. Paulo Cesar Marques da Silva, da UNB

O modelo que rege o trânsito afirma, então, que acima de certo valor de velocidade v_0 , o fluxo q diminui à medida que a velocidade aumenta, contrariando a impressão popular de que quanto maior a velocidade, maior será sempre o fluxo correspondente. O fenômeno físico que explica porque essa impressão é equivocada é o fato de que os veículos têm de deixar um espaçamento maior entre eles quando a velocidade aumenta. O trânsito de veículos não se comporta como um trem; neste caso, sim, quanto maior a velocidade do trem, maior será o número de vagões que consegue passar.

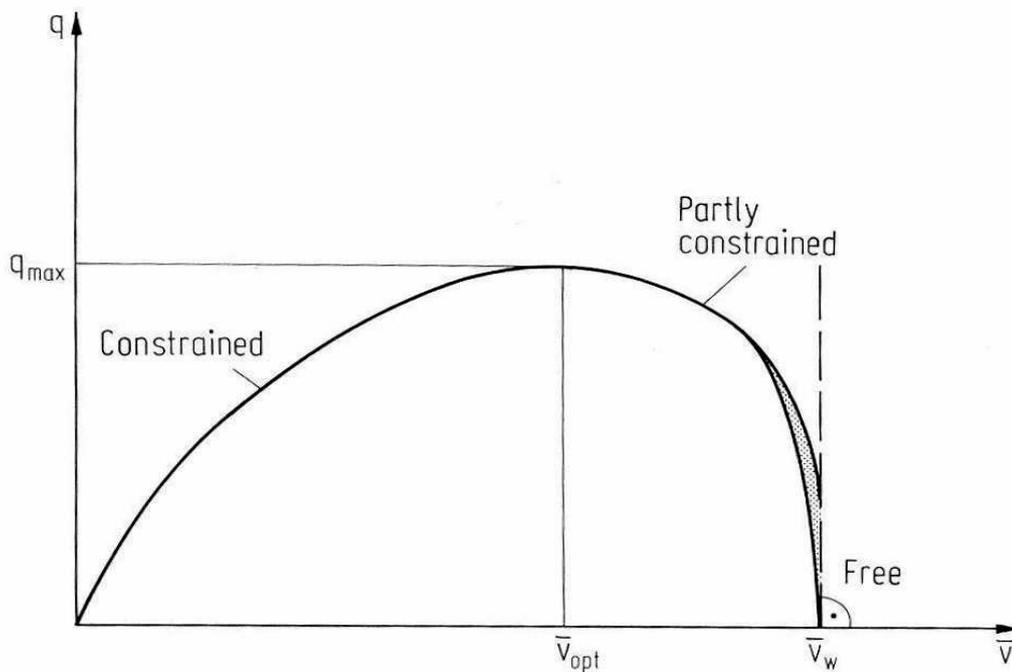


Figura 7 - Relação entre a velocidade (V) e o fluxo (q), levando em conta hipóteses mais realistas do que a Figura 6 - Fonte: Introduction to the Theory of Traffic Flow de Wilhelm Leuzbach

A Figura 7, ainda de cunho teórico, já se aproxima mais dos perfis observados na prática, ao reconhecer hipóteses mais realistas do comportamento do tráfego.

3.2. Relação velocidade x fluxo observada na Av. 23 de Maio

Tomando como base todos os intervalos de 5 minutos observados entre 6:00 h e 19:00 h, foram construídos os gráficos de 8 a 11, apresentando a relação observada na prática entre a velocidade e o fluxo, para cada uma das quatro situações analisadas.

Para a elaboração destes gráficos, em primeiro lugar multiplicou-se por 12 o volume observado no intervalo a fim de obter o fluxo horário correspondente. Calculou-se, também, a velocidade média harmônica que representará a velocidade de cada intervalo. Obtiveram-se, assim, os pares velocidade x fluxo, para cada situação.

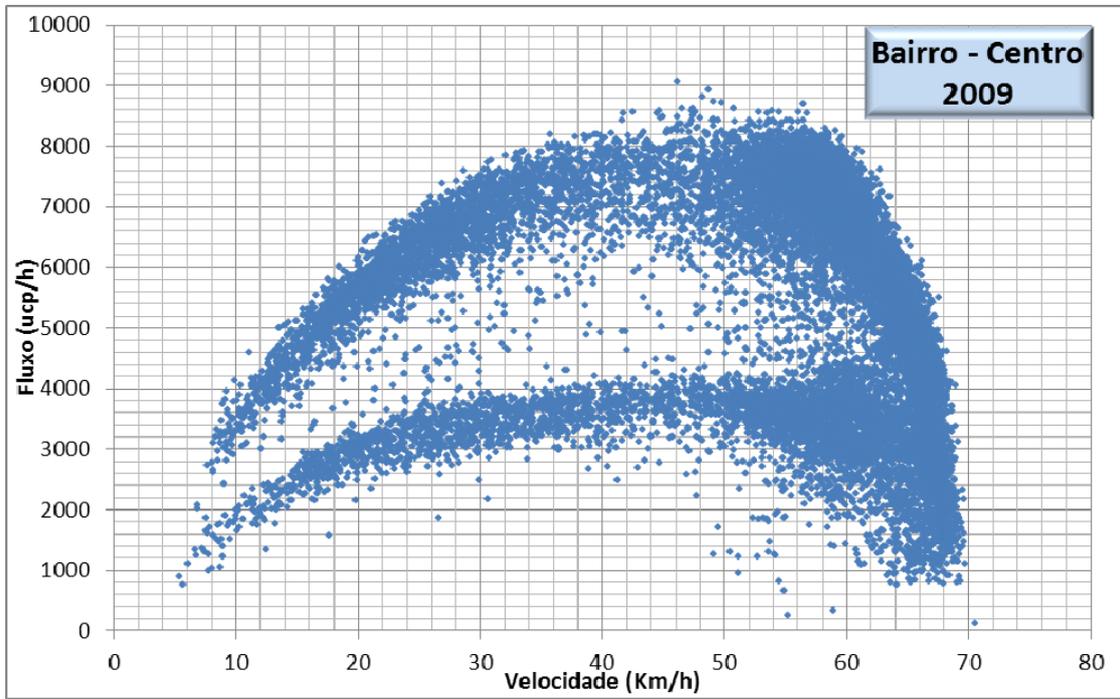


Figura 8 – Velocidade e fluxo em 18.233 intervalos de 5 minutos

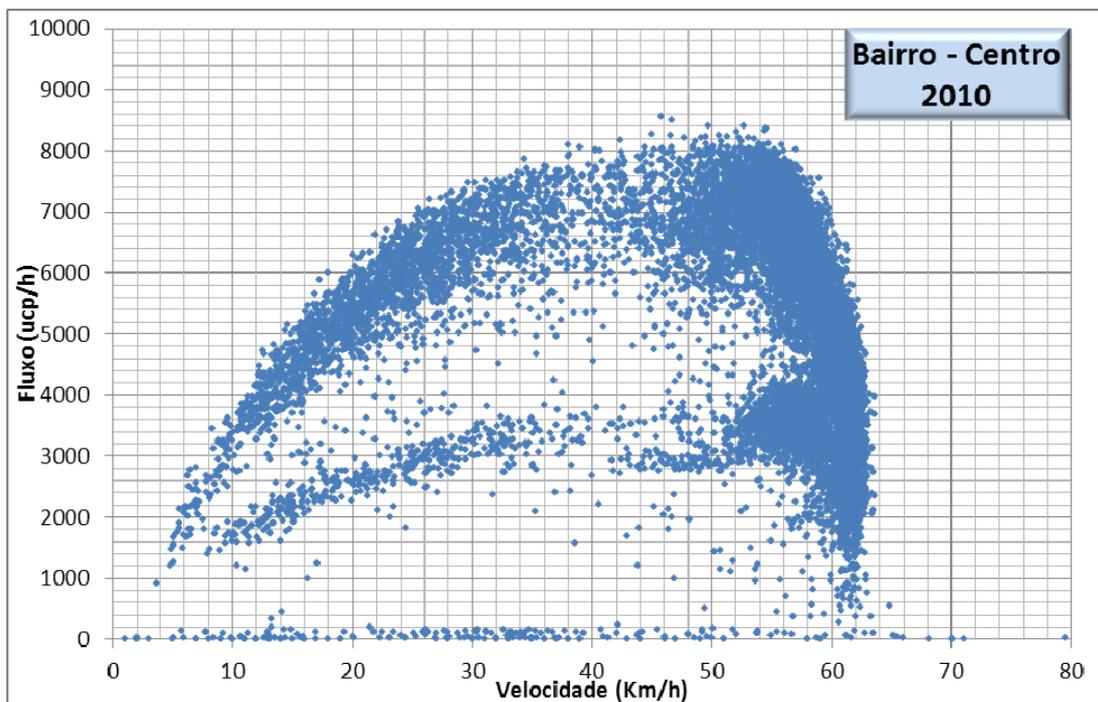


Figura 9 – Velocidade e fluxo em 15.159 intervalos de 5 minutos

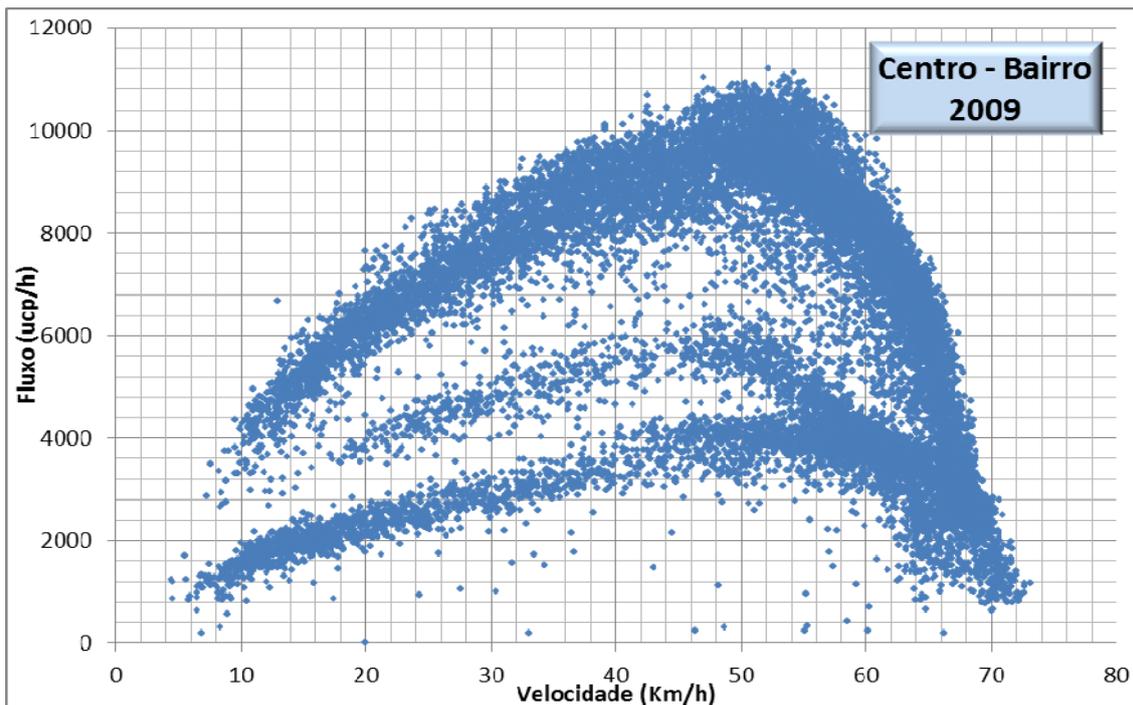


Figura 10 – Velocidade e fluxo em 17.572 intervalos de 5 minutos

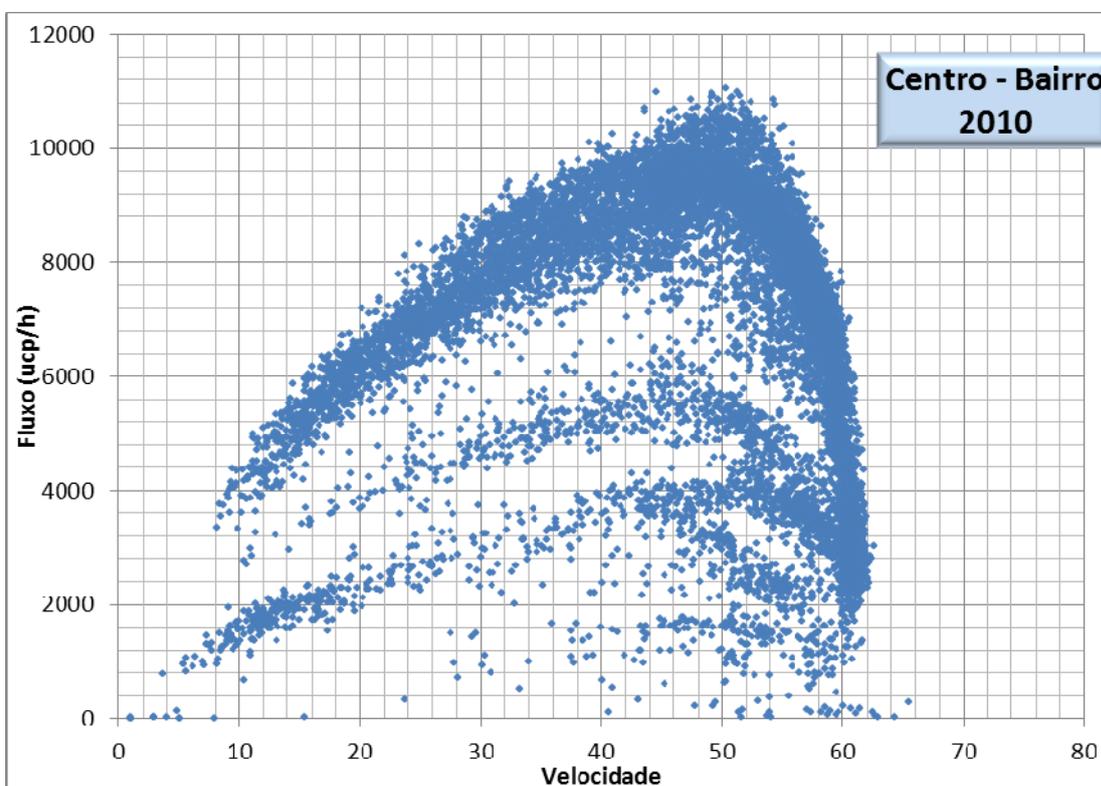


Figura 11 – Velocidade e fluxo em 12.090 intervalos de 5 minutos

Nota-se, nestes gráficos, que, para uma mesma velocidade, foram registrados diferentes valores de fluxo, comprovando que a complexidade dos fatores que intervêm no trânsito é bem maior do que as hipóteses simplificadas da teoria exposta no item 3.1. De qualquer forma, fica evidente o caráter parabólico das figuras, formato que está de acordo com a teoria tradicional.

As teorias mais modernas já preveem o que foi observado no corredor estudado, qual seja, que para uma mesma velocidade, correspondem vários pontos de fluxo, transformando a linha parabólica das figuras 6 e 7 em uma nuvem de pontos de formato aproximadamente parabólico ⁽¹⁾.

A fim de determinar a capacidade da via, poderia ter-se adotado o raciocínio de que a capacidade coincide com a envoltória superior desses gráficos. Uma justificativa para esse procedimento seria, por exemplo, de que um veículo que está trafegando de madrugada poderia, perfeitamente, estar circulando na velocidade máxima permitida, mas não o faz por escolha própria do condutor. Existem outros comportamentos análogos capazes de justificar a decisão da envoltória superior.

Entretanto, para representar melhor os fatores intervenientes, adotou-se, neste trabalho, o encaminhamento descrito a seguir.

A curva média representativa da relação velocidade x fluxo foi determinada agrupando os pontos em intervalos de velocidade de 2 km/h (0 a 2, 2 a 4, 4 a 6, etc.). Atribuiu-se a cada intervalo uma velocidade igual ao seu ponto médio (1, 3, 5, etc.). O volume correspondente a cada intervalo foi calculado através da média ponderada de todos os valores de volume, já corrigidos pelos fatores de equivalência, observados nesse intervalo, utilizando como fator de ponderação o próprio número de veículos do intervalo. Dessa forma, intervalos com mais amostras vão influenciar mais fortemente do que intervalos com poucas amostras. Existem duas razões que justificam tal procedimento. Em primeiro lugar, intervalos com mais amostras têm um significado estatístico superior aos que têm menos amostras. Em segundo lugar, valores maiores de volume são mais confiáveis, pois em si já provam que poderiam ter passado mais veículos nos intervalos que apresentaram menos volume, como já foi ilustrado no exemplo do condutor que trafega de madrugada numa velocidade inferior à que lhe seria possível adotar.

Dessa forma, os gráficos representados nas Figuras de 8 a 11 produziram os correspondentes gráficos nas Figuras de 12 a 15.

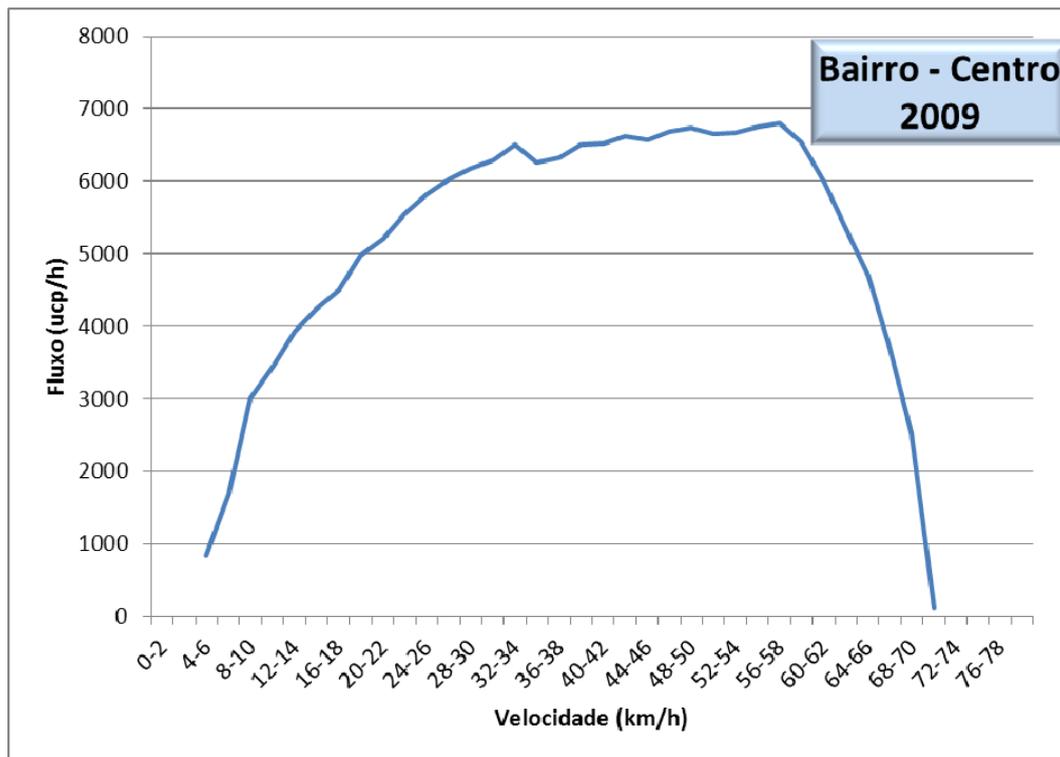


Figura 12 – Relação entre a velocidade e o fluxo no Bairro - Centro da Av. 23 de Maio, em 2009

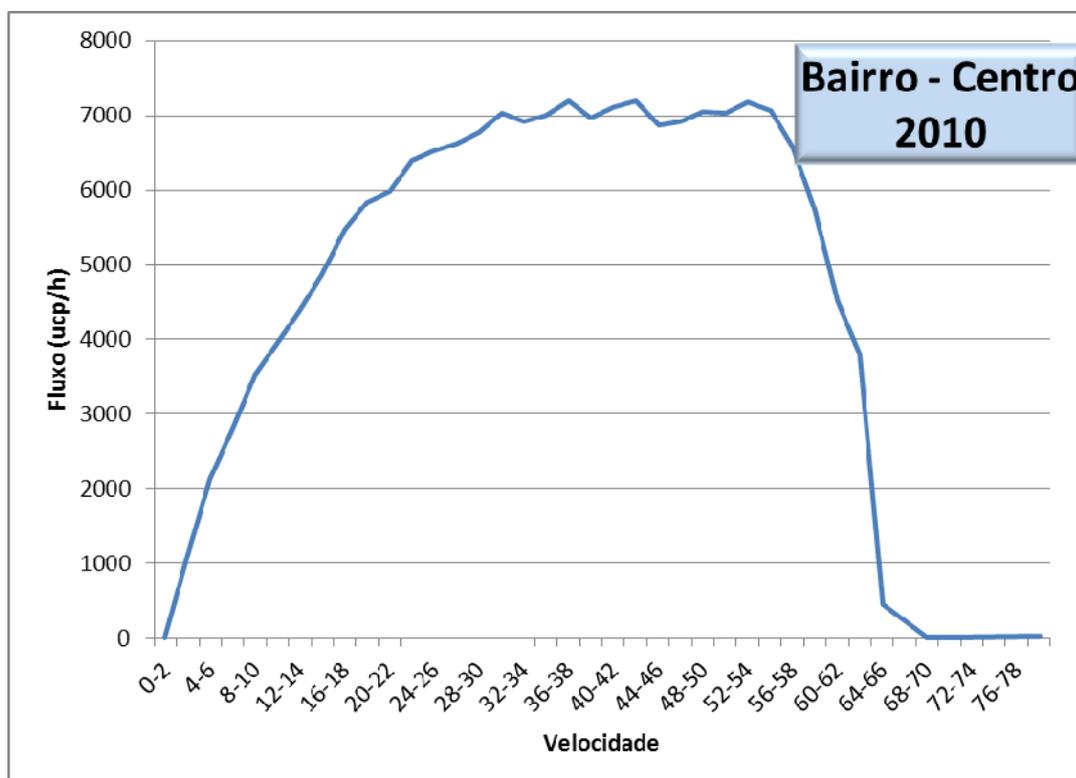


Figura 13 – Relação entre a velocidade e o fluxo no Bairro - Centro da Av. 23 de Maio, em 2010

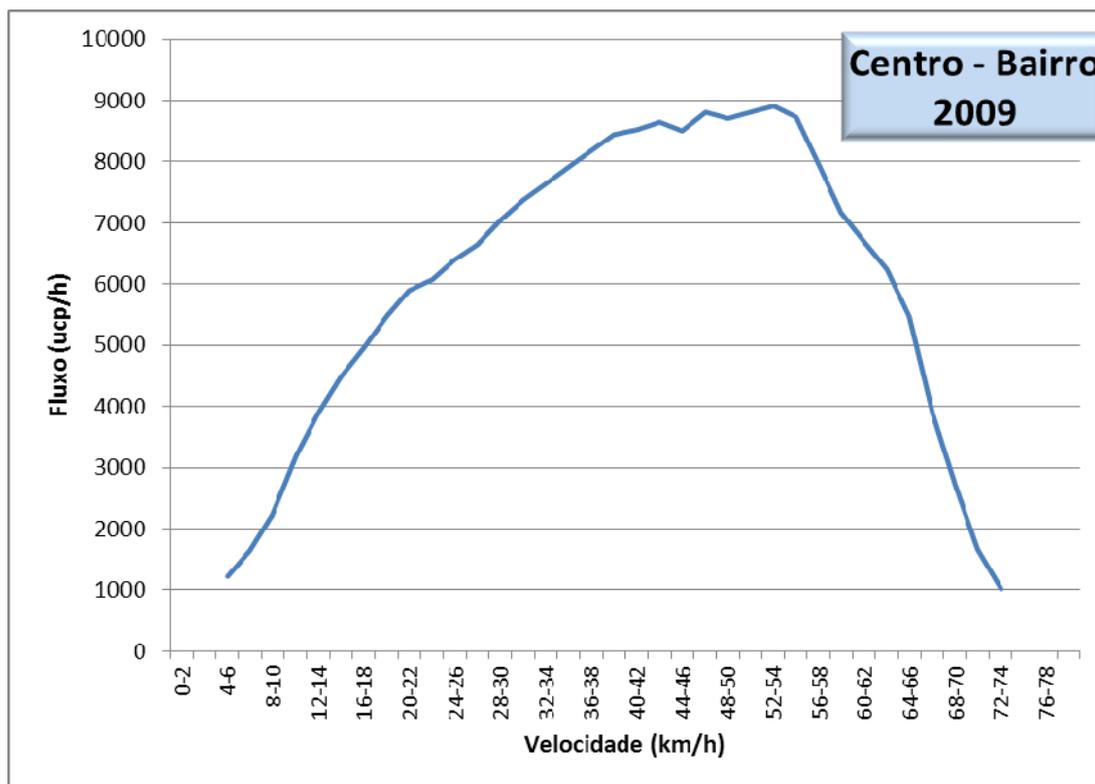


Figura 14 – Relação entre a velocidade e o fluxo no Centro – Bairro da Av. 23 de Maio, em 2009

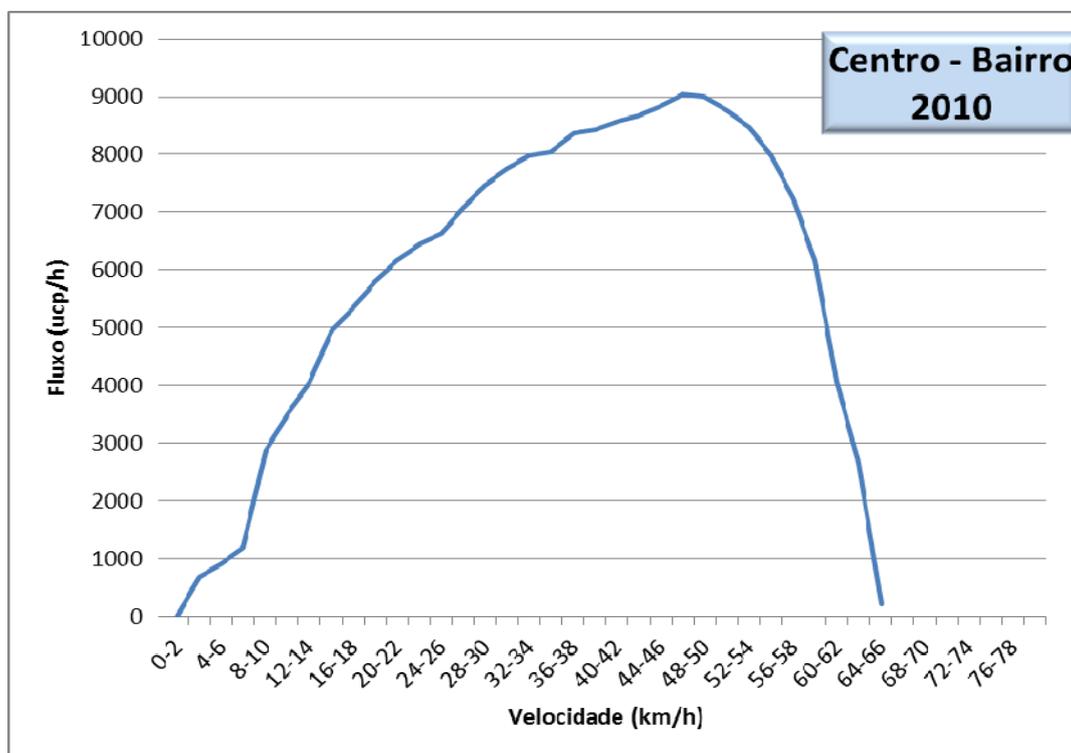


Figura 15 – Relação entre a velocidade e o fluxo no Centro – Bairro da Av. 23 de Maio, em 2010

Deve-se ressaltar a semelhança encontrada entre o modelo teórico e os resultados práticos exibidos nas Figuras 12 a 15, fato não muito comum de ser verificado quando se comparam modelos teóricos com pesquisas de campo na Engenharia de Trânsito devido à complexidade dos fatores intervenientes.

4. Análise do parâmetro capacidade

Este item discorrerá sobre as propriedades do parâmetro capacidade que foram identificadas no estudo efetuado, mais especificamente, a respeito do valor da velocidade em que o regime de capacidade ocorre e do valor das capacidades para cada uma das quatro situações analisadas.

4.1. Velocidade para a qual ocorre a capacidade

A fim de verificar se a mudança na regulamentação da velocidade influenciou na capacidade da Av. 23 de Maio, calculou-se, para cada uma das quatro situações analisadas, a velocidade média harmônica dos veículos que passaram nos 300 intervalos sob o regime de capacidade, conforme detalhado no item 2.4, chegando-se aos resultados apresentados nas tabelas 3 e 4.

Tabela 3 - Distribuição das velocidades na pista Bairro-Centro

Faixa	Bairro-Centro		
	2009	2010	Variação
1	54,0	52,4	-3,03%
2	52,2	51,0	-2,28%
3	50,4	50,3	-0,32%
4	43,2	49,2	14,03%
Média da pista*	49,8	50,8	1,82%

* desconsiderou-se a faixa da direita (quinta faixa), por ser atípica

Tabela 4 - Distribuição das velocidades na pista Centro - Bairro

Faixa	Centro-Bairro		
	2009	2010	Variação
1	55,3	52,0	-5,96%
2	53,7	50,4	-6,17%
3	52,0	49,7	-4,42%
4	48,9	48,4	-0,96%
5	47,3	46,6	-1,42%
Média da pista	51,4	49,4	-3,79%

A análise das Tabelas 3 e 4 indica que a via opera na sua capacidade quando o trânsito circula por volta de 50 km/h. As características geométricas da Av. 23 de Maio neste trecho indicam uma velocidade de projeto de 100 km/h, tomando como referência o documento [IP-DE-F00/001](#)⁽⁵⁾, do DER (Projeto classe I-A), o que confirma a afirmação teórica de que a capacidade ocorre para uma velocidade aproximadamente igual à metade da velocidade de projeto da via.

Como a velocidade para a qual ocorre a capacidade situa-se em torno de 50 km/h, conclui-se que a redução de 80 km/h para 70 km/h na velocidade máxima permitida não influenciou na capacidade da via, nem para mais, nem para menos.

4.2. Valor da capacidade

A Tabela 5 apresenta o valor da capacidade determinado para cada uma das quatro situações analisadas, com base nos correspondentes 300 intervalos com maior volume.

Tabela 5 – Capacidade das duas pistas da Av. 23 de Maio antes e depois da redução da velocidade máxima permitida de 80 para 70 km/h

Ano	Capacidade da pista Bairro-Centro (ucp)	Capacidade da pista Centro-Bairro (ucp)
2009	8.412	10.530
2010	8.280	10.358

Observa-se, a partir dos valores indicados na Tabela 5, que a capacidade de cada faixa, no sentido Centro-Bairro, que comporta 5 faixas, situa-se em torno do valor 2100 ucp, que é o valor básico encontrado na maioria das medidas efetuadas em vias de trânsito rápido. Não é adequado estabelecer a mesma média por faixa para a pista Bairro-Centro, devido ao fato da mencionada atipicidade de sua quinta faixa.

O valor relativo à capacidade de 2010 é cerca de 1,6% inferior ao de 2009, tanto para a pista Bairro-Centro como para a pista Centro-Bairro. Esta pequena variação não pode ser creditada à alteração da velocidade regulamentada, devido à constatação anterior de que a via opera na sua capacidade por volta de 50 km/h. Pode ser creditada à aleatoriedade, ou a algum fator de tão pouca relevância que não chegou sequer a ser identificado.

4. Conclusão

As análises efetuadas, referendadas pela compatibilidade com os modelos teóricos e com os conceitos básicos da Engenharia de Tráfego, atestam que a variação na velocidade máxima permitida da Av. 23 de Maio, de 80 para 70 km/h, não interferiu, nem aumentando nem diminuindo, na capacidade dessa via.

É oportuno ressaltar, entretanto, que mesmo que a capacidade da via viesse a ficar prejudicada, a ação estaria completamente justificada sob o aspecto do benefício auferido pela segurança do trânsito ao diminuir a gravidade dos acidentes.

As conclusões deste trabalho podem ser aplicadas para as vias classificadas como de trânsito rápido. A extrapolação para as vias com circulação interrompida por interseções, faixas de pedestres e semáforos não pode ser feita diretamente. Entretanto, como a velocidade média nessas vias é inferior às outras e sua capacidade lhes é inferior, pode-se concluir, logicamente, que a influência da redução da velocidade regulamentada na capacidade é ainda mais remota do que nas de trânsito rápido, ou seja, é possível reduzir mais ainda a velocidade máxima nas vias com circulação interrompida sem afetar a capacidade.

Bibliografia

- 1 – Kerner B.S. *The Physics of Traffic*.
- 2 – *Traffic Signal Timing Manual* – Institute of Transportation Engineers.
- 3 – Roess, R.P. Prassas E.S. e McShane W.R. *Traffic Engineering*.
- 4 – *Highway Capacity Manual*. Transportation Research Board.
- 5 – *Projeto Geométrico* – Departamento de Estradas de Rodagem - ftp://ftp.sp.gov.br/ftpder/normas/IP-DE-F00-001_A.pdf
- 6 - Paulo Cesar Marques da Silva [Teoria do Fluxo de Tráfego](#) – apostila da UNB
- 7 - Wilhelm Leuzbach *Introduction to the Theory of Traffic Flow*

Dezembro de 2011

*Os conceitos aqui emitidos
não refletem, necessariamente,
o ponto de vista da CET, sendo
de responsabilidade do autor.*

*Revisão/Edição – NCT/SES/DP
GESTÃO DO CONHECIMENTO
Diagramação: GMC/Dma*