

ARTIGO

MODELO PARA ESTIMATIVA DO FLUXO DE SATURAÇÃO DESENVOLVIDO A PARTIR DAS CONDIÇÕES DO TRÁFEGO DE BRASÍLIA

Isabela N. Fernandes de Queiroz
Maria Alice Prudêncio Jacques

Mestrado em Transportes
Universidade de Brasília

RESUMO

Dadas as dificuldades de obtenção do valor do fluxo de saturação *in loco* para diversas situações, ele é frequentemente estimado a partir de modelos. Assim, esses modelos precisam refletir, da melhor forma possível, as condições locais de operação do tráfego. Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um modelo matemático para estimativa do fluxo de saturação, por faixa de trânsito, para as condições do tráfego da cidade de Brasília. A técnica de modelagem utilizada foi à análise de regressão, e os dados para o desenvolvimento do modelo foram coletados em 20 interseções, perfazendo um total de 50 faixas de trânsito observadas. Os resultados das análises estatísticas efetuadas revelaram que o modelo é adequado para estimar o fluxo de saturação por faixa de trânsito para a cidade de Brasília. A sua utilização em outras cidades brasileiras é possível, desde que seja devidamente calibrado.

ABSTRACT

Field measurements of saturation flow rates are not possible in many cases. Therefore, this factor is usually estimated by models which must represent the prevailing traffic operation conditions at each signalized intersection approach. This paper presents the development of a mathematical model for saturation flow estimation

per traffic lane, tailored for representing the traffic conditions at Brasilia City. The used modeling technique was the regression analysis. Fifty traffic lanes, at 20 different urban road intersections, were surveyed for the purpose of data base construction for the model development. The statistical analysis performed showed that the model fits well its objectives. Since it is calibrated accordingly, the model can be used for saturation flow estimation in other Brazilian cities.

1. INTRODUÇÃO

O controle do tráfego nas interseções é imprescindível no sentido de promover o deslocamento seguro de veículos e pedestres nestes pontos da malha viária. Esse controle deve assegurar, na medida do possível, a fluidez na circulação do tráfego e a redução dos indesejáveis congestionamentos. Para tanto, um dos dispositivos de controle extremamente utilizado, sobretudo em áreas urbanas, é o semáforo.

A eficácia do semáforo está diretamente ligada a dois aspectos básicos. O primeiro deles diz respeito à justificativa para a utilização do equipamento, que é avaliada a partir dos volumes conflitantes de veículos e pedestres na interseção, da severidade dos conflitos e das características físicas do local. O segundo aspecto está ligado à programação semaforica, que é definida a partir das características dos movimentos conflitantes (volume, direção e sentido) e das condições oferecidas pela interseção para o atendimento destes movimentos. O potencial da interseção em atender ao tráfego que nela circula depende tanto das suas condições geométricas quanto das próprias características de operação do tráfego no local.

Um dos elementos chaves empregados nos diversos procedimentos para a realização da programação semaforica é o fluxo de saturação, que pode ser definido como a taxa veicular máxima horária que pode cruzar uma faixa ou aproximação, sob as condições operacionais e do tráfego da interseção, assumindo estar a indicação do verde continuamente disponível (May, 1990). Ele é um importante elemento revelador do comportamento do tráfego no processo de partida das filas nas aproximações semaforizadas e, sempre que

possível, deve ser medido *in loco*. No entanto, em algumas situações esta medição não pode ser realizada, como no caso de projetos de novas interseções ou por restrições ligadas a questões de tempo e custo. Nestes casos, o fluxo de saturação necessita ser estimado. Embora existam vários modelos para estimativa do fluxo de saturação, os modelos de uso mais corrente foram desenvolvidos no exterior e, portanto, consideram padrões do tráfego internacional. De acordo com Jacques *et al.* (1998), isto faz com que esses modelos apresentem baixo desempenho quando utilizados em países, como por exemplo o Brasil, onde as condições do tráfego são distintas daquelas nas quais foram gerados.

Estudos presentes na literatura indicam que o fluxo de saturação varia ao longo do tempo, devido às contínuas evoluções tecnológicas dos veículos e dos próprios sistemas de controle, e do espaço, visto que ele sofre influência das características físicas das vias e do comportamento dos motoristas de cada local. Isto justifica o fato de diversos países iniciarem estudos e pesquisas para o desenvolvimento de modelos de estimativa do fluxo de saturação adequado às suas condições, ou pelo menos, para a recalibração de modelos existentes. Através da Tabela 1 podem ser observadas diferenças significativas entre os valores do fluxo de saturação determinados em estudos realizados em diversos países. Estas diferenças comprovam a inconveniência da adoção de valores do fluxo de saturação determinados para uma dada realidade de operação do tráfego em locais com características distintas.

No Brasil, alguns estudos já foram realizados no sentido de modelar o fluxo de saturação, podendo-se citar, dentre eles, os trabalhos de Andrade (1989), Ribeiro (1992) e Magalhães *et al.* (1998). Estes modelos, entretanto, contêm algumas simplificações e/ou propõem a utilização de fatores de ajuste baseados nos padrões de tráfego de outros países, que podem vir a comprometer suas aplicações em diferentes configurações de aproximações de interseções. Assim, a realização de estudos que dêem continuidade e aprofundem a investigação sobre modelos para estimativa do fluxo de saturação nas cidades brasileiras torna-se necessária, e é neste contexto que a pesquisa apresentada nesse artigo se insere.

Tabela 1: Valores do fluxo de saturação determinados para alguns países

Valores Básicos do Fluxo de Saturação (por hora de verde por faixa)			
País	Condição	Valor	Autor do estudo/ano
Reino Unido	Ideal	2080pcu	Kimber/1986
Canadá	Máxima	1900veh	Teply/1991
Austrália	Máxima	2475veh	Troutbeck/1994
Austrália	Ideal	2000veh	Troutbeck/1994
Israel	Média	2176veh	Hakkert/1994
Polônia	Ideal	1890veh	Tracz,Tarko/1991
Iugoslávia	Ideal	2290pcu	Satnic/1994
África do Sul	Ideal	1928veh	Stander/1994
Indonésia	Ideal	600pcu/m	Bang/1994
Alemanha	Ideal	2000veh	Briton/1994
Hong Kong	Ideal	1985veh	Lam/1994
Lituânia	Máxima	2045veh	Noreika/1994
Japão	Ideal	2000pcu	Fujiwara/1994
HCM 1994	Ideal	1900pcu	TRB/1994
Finlândia	Média	1940veh	Niittymäki, Pursula/1995

Fonte: Niittymaki e Pursula, 1997.

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver, com base na análise de regressão, um modelo para estimativa do fluxo de saturação que seja adequado às características da cidade de Brasília, e que possa ser utilizado, quando calibrado de acordo com as condições locais, em outras cidades brasileiras.

2. ESTADO DA ARTE

Nesta seção é apresentado, de forma sucinta, alguns dos principais modelos nacionais e internacionais para estimativa do fluxo de saturação.

2.1. Modelos internacionais

Os modelos internacionais mais conhecidos e largamente utilizados são os modelos ingleses de Webster e Cobbe (1966), e Kimber *et al.* (1986), e o modelo americano do HCM (TRB, 1994). Outros modelos,

como o proposto por Akcelik (1981), podem ser encontrados na literatura. As principais características e expressões básicas para a estimativa do fluxo de saturação dos modelos ingleses e do modelo do HCM são brevemente expostas a seguir.

2.1.1. Modelo desenvolvido por Webster e Cobbe

Webster e Cobbe, em 1966, desenvolveram uma fórmula baseada numa relação linear simples, na qual o fluxo de saturação é função da largura total da aproximação.

Assim, para largura da aproximação (L) variando de 5,5 a 18,0 metros, o fluxo de saturação (S), expresso em unidades de carro de passeio por hora de verde (ucp/hv), é obtido através da Equação 1:

$$S = 525 \times L \quad (1)$$

Para larguras menores que 5,5 metros, os valores de fluxo da saturação encontram-se tabelados. O resultado da aplicação direta da equação só é válido para aproximações classificadas como padrão. São incluídas nessa classificação as aproximações onde todo o tráfego é formado por carros de passeio, não possui veículos estacionados nas proximidades, o tráfego de conversão à direita é no máximo 10% do tráfego total, e o de conversão à esquerda é nulo. Quando a aproximação não for classificada como padrão, o valor produzido pela equação deverá sofrer correções para que o efeito de certas condições específicas do local seja considerado, tais como: declividade, composição do tráfego, conversão à esquerda, conversão à direita, veículos estacionados e localização.

2.1.2. Modelo proposto por Kimber, McDonald e Hounsell

Um importante progresso no desenvolvimento de expressões para estimar fluxo de saturação foi realizado por Kimber *et al.* (1986), que definiram um modelo para estimativa do valor deste fluxo por faixa de tráfego. Neste caso, foram usados dados levantados no Reino Unido, e as fórmulas pressupõem a existência de pintura demarcatória das faixas nas vias.

O fluxo de saturação, expresso em veículos por hora, depende da proporção dos diferentes tipos de veículos na corrente de tráfego. O efeito do tipo de veículo sobre o fluxo de saturação é computado através do uso de fatores de equivalência, cujos valores médios para todas as categorias de veículos são os apresentados na Tabela 2.

Tabela 2: Fatores de equivalência para o modelo de Kimber *et al.*

Tipo de Veículo	Fator de equivalência (ucp)
Veículos leves	1,00
Veículos comerciais leves	1,50
Veículos comerciais pesados	2,30
Ônibus	2,00
Motocicleta	0,40
Bicicleta	0,20

Fonte: Kimber *et al.*, 1986.

Os demais fatores identificados pelos autores como tendo influência significativa no valor do fluxo de saturação são incluídos como variáveis independentes do modelo. A expressão final para a estimativa do fluxo de saturação por faixa é apresentada a seguir (Equação 2):

$$S(r, f, n, G, w_i) = \frac{2080 - 140\delta_n - 42\delta_G G + 100(w_i - 3,25)}{(1 + 1,5 f/r)} \quad (2)$$

em que:

- S: fluxo de saturação, em unidades de carro passeio por hora de verde, (ucp/htv);
- r: raio de conversão, em metros;
- f: proporção de veículos que convertem à esquerda e à direita;
- δ_n : variável dummy relativa à posição da faixa;
- G: greide, em %;
- δ_G : variável dummy relativa ao greide;
- w_i: largura da faixa, em metros.

Cabe destacar que a base de dados que permitiu o desenvolvimento do modelo é formada por faixas que apresentam, dentre outras, as seguintes características básicas: movimentos exclusivos em frente, compartilhados em frente e à direita, e compartilhados em frente e à

esquerda; e classificação da localização das faixas como boas e médias. Os valores médios da largura, greide, e de outros elementos que caracterizam as faixas integrantes da base de dados são apresentados pelos autores.

2.1.3. Modelo proposto no Highway Capacity Manual (HCM)

O modelo proposto pelo HCM para estimativa do fluxo de saturação é bastante simples de ser utilizado. Ele assume um valor de fluxo de saturação básico, que pode ser corrigido através de nove fatores de ajuste, tabelados no manual, correspondentes aos aspectos locais onde as condições ideais não são atingidas. Este valor básico é de 1800 unidades de carro passeio por hora de verde por faixa, na versão de 1985 e 1900 unidades de carro passeio por hora de verde por faixa, na versão de 1994. A equação geral do modelo (Equação 3) é:

$$S = 1900 N f_w f_{HV} f_g f_p f_{pb} f_{bb} f_a f_{RT} f_{LT} \quad (3)$$

em que:

S : Fluxo de saturação em ucp/htv;

N : número de faixas;

f_w : fator de correção do efeito da largura da faixa;

f_{HV} : fator de correção do efeito de veículo pesado;

f_g : fator de correção do efeito de greide;

f_p : fator de correção do efeito devido ao estacionamento;

f_{pb} : fator de bloqueio devido ao estacionamento;

f_{bb} : fator de correção devido à parada de ônibus;

f_a : fator de área;

f_{RT} : fator de correção do efeito de conversão à direita;

f_{LT} : fator de correção do efeito de conversão à esquerda.

2.2. Modelos nacionais

O Brasil, assim como muitos outros países, caminha na tentativa de derivar um modelo próprio que possibilite calcular o fluxo de saturação. Dos modelos existentes, serão brevemente expostos aqui os modelos desenvolvidos por Andrade (1989); Ribeiro (1992) e Magalhães *et al.* (1998).

2.2.1. Modelo de Andrade

Neste estudo são derivados modelos de previsão de fluxo de saturação baseados em dados amostrais coletados em estados das regiões Nordeste e Sudeste. Para a geração dos modelos foi adotada uma composição em nível regional e, com a agregação das amostras, uma formulação em nível nacional. Foram duas as formas de tratamento estatístico dos dados coletados. A primeira delas consistiu em análises de regressão sucessivas sobre o fluxo de saturação, considerando cada fator de forma isolada e, posteriormente, combinando os coeficientes obtidos para cada regressão isolada. Na segunda forma foi usada a análise de regressão múltipla, onde todos os fatores que afetam o fluxo de saturação foram considerados simultaneamente. Assim, para a formulação do modelo em nível nacional, foram obtidas as expressões a seguir apresentadas. A Equação 4 foi obtida pela primeira forma e a Equação 5 pela segunda forma de tratamento estatístico.

$$S(f,r,g,l,w) = \frac{1621 - 23g - 200l + 150(w - 3,14)}{1 + 1,25 f/r} \quad (4)$$

$$S(f,r,g,l,w) = \frac{1735 - 18g - 202l + 183(w - 3,14)}{1 + 1,25 f/r} \quad (5)$$

Nas duas expressões, o fluxo de saturação (S) é dado em unidades de carro de passeio por hora de verde (ucp/htv), em função do greide (g), do raio de curvatura (r), posição (l) e largura da faixa (w), e proporção de veículos realizando manobra (f).

2.2.2. Modelo de Ribeiro

A partir dos resultados de pesquisas de campo realizadas em Fortaleza e no Rio de Janeiro, Ribeiro (1992) sugere uma alteração no parâmetro da fórmula de Webster e Cobbe e apresenta, em caráter preliminar, a seguinte expressão para estimar o fluxo de saturação no Brasil (Equação 6):

$$S = 400L \quad (6)$$

Na Equação 6, S é o fluxo de saturação para as condições brasileiras e L a largura da aproximação, em metros. Esta fórmula mantém os mesmos fatores de ajustes para correção do valor do fluxo básico de saturação devido a presença de veículos estacionados, composição do tráfego, declividade da via, movimentos de conversão e condições locais, da fórmula de Webster e Cobbe. O autor destaca que futuros estudos devem ser realizados no sentido de aperfeiçoar o seu modelo.

2.2.3. Modelo de Magalhães

Através de pesquisas realizadas na área central do município de Belo Horizonte, Magalhães *et al.* (1998) desenvolveram uma fórmula para estimativa do fluxo de saturação bastante simplificada, uma vez que considera apenas a largura útil da aproximação na modelagem da expressão que permite estimar o fluxo de saturação. A expressão foi desenvolvida a partir dos dados coletados com auxílio de câmeras de vídeo, e analisados utilizando-se o método *saturated period count* (contagem do período saturado), recomendado no documento *Overseas Road Note 11* do *Transportation Research Laboratory* da Inglaterra. Para a derivação do modelo foi utilizada a técnica da regressão linear simples, sendo a variável independente a largura útil da aproximação e a variável dependente o fluxo de saturação. O modelo tem a forma mostrada na Equação 7:

$$S = 1005 + 432LU \quad (7)$$

na qual:

S: fluxo de saturação em unidades de carro passeio por hora de verde (ucp/htv) e;

LU: largura da aproximação, em metros.

Sua aplicabilidade se restringe às seguintes condições: largura útil da via igual ou superior a 5,5 metros, tendo em vista que a modelagem da expressão foi feita com base na quase totalidade das aproximações pesquisadas com essa medida; baixa porcentagem de veículos pesados (menor ou igual a 25%); movimentos de conversão à esquerda menor ou igual a 5%; e movimentos de conversão à direita em até 10%.

3. DESENVOLVIMENTO DO MODELO PARA BRASÍLIA

O desenvolvimento do modelo analítico foi feito a partir do modelo para estimativa do fluxo de saturação desenvolvido por Kimber *et al.* (1986), uma vez que se trata de um modelo utilizado mundialmente, relativamente recente, e cuja equação (do tipo aditiva) é fácil de ser calibrada. Inicialmente foi realizada a calibração do modelo de Kimber *et al.* (1986) e, a partir da equação calibrada, foram feitas análises para inclusão de outras variáveis no processo de modelagem, bem como para a retirada de variáveis que não fossem significativas estatisticamente. O objetivo foi o de obter uma relação prática e simples para previsão do fluxo de saturação. As principais etapas do estudo que levaram à definição de um modelo de regressão para a estimativa do fluxo de saturação para as condições de Brasília são a seguir apresentadas.

3.1. Coleta e tratamento dos dados

Para a consecução do objetivo proposto, a técnica de modelagem utilizada foi a análise de regressão. De acordo com Guerra e Donaire (1979), a análise de regressão é um instrumento de pesquisa de relações empíricas entre duas ou mais variáveis, que tem por objetivo principal estabelecer um modelo de relacionamento entre essas variáveis. Para tanto, é necessário a construção de um banco de dados que, neste trabalho, foi obtido a partir de uma pesquisa de campo constituída de duas etapas principais: definição da área de estudo e elaboração da base de dados.

3.1.1. Definição da área de estudo

Para o desenvolvimento do trabalho, foi selecionada como área de estudo o Plano Piloto de Brasília. Nele foram coletados dados em 20 interseções devidamente escolhidas para permitir a investigação dos diferentes fatores que afetam o fluxo de saturação, tais como: greide, largura e posição da faixa, composição do tráfego, movimentos e raios de conversão, condições de fluidez à jusante e localização da interseção. A escolha desses fatores foi feita a partir do estudo dos modelos existentes e de trabalhos publicados que tratam do assunto. Os dados das 20 interseções foram levantados por faixas de trânsito,

o que resultou um total de 50 faixas que integraram a amostra a ser pesquisada.

O principal requisito para escolha dessas faixas foi que elas apresentassem um número mínimo de ciclos saturados, bem como possuíssem um certo grau de variabilidade nos parâmetros que influem no fluxo de saturação, ou seja, as condições gerais do conjunto de faixas selecionadas tinham que permitir a realização do estudo pretendido. Além desses requisitos, foi fundamental estabelecer alguns outros critérios para seleção das faixas com vistas à coleta dos dados em campo, quais sejam:

- a localização das aproximações tinha de viabilizar a coleta dos dados com um mínimo de interferência possível no comportamento dos motoristas;
- estabeleceu-se que as faixas observadas seriam todas com movimentos protegidos e dos tipos exclusivo em frente, exclusivo à direita, exclusivo à esquerda e compartilhado em frente e à direita.

3.1.2. Elaboração da base de dados

Como o objetivo deste estudo é o desenvolvimento de um modelo de previsão de fluxo de saturação, dois tipos de dados são exigidos. O primeiro diz respeito à taxa de descarga de veículos que atravessam a linha de retenção em cada ciclo, para o cálculo do fluxo de saturação observado em campo. O segundo tipo de dado está relacionado às características locais que representam os fatores intervenientes no fluxo de saturação: greide, largura e posição da faixa, composição do tráfego, movimentos e raio de conversão e condições de fluidez observadas à jusante da linha de retenção. Para obtenção desses dados três fontes de informações foram utilizadas: filmagens das interseções, observações de campo, e levantamentos topográficos.

- a) **Filmagens das interseções**
Através das filmagens da operação do tráfego nas faixas consideradas, foram determinados, em laboratório, os dados de

fluxo de saturação e os dados relativos à composição do tráfego e aos tipos de movimento. Para a determinação do fluxo de saturação foi utilizado o método da Road Note 34 (RRL, 1963).

b) Observações de campo

As observações de campo foram feitas simultaneamente às filmagens, objetivando identificar dados relacionados às condições operacionais e características do tráfego, tais como: ciclos saturados, condição geral de localização da interseção, condição de fluidez do tráfego local e informações extras consideradas importantes para o estudo.

c) Levantamentos topográficos

Dados relacionados à geometria da via (greide, largura da faixa e raio de conversão) foram determinados a partir de levantamento topográfico, realizado com o uso de uma estação total. A partir desse levantamento foi elaborada uma planta planialtimétrica para cada interseção, e os dados geométricos de cada uma das faixas de trânsito estudadas puderam ser determinados. A base de dados por faixa de trânsito foi, então, montada a partir de todos os dados coletados.

3.2. Procedimento para o desenvolvimento do modelo

A partir da base de dados disponível, o desenvolvimento do modelo de regressão foi realizado de acordo com as etapas a seguir apresentadas.

3.2.1. Calibração do modelo de Kimber *et al.*

Na calibração do modelo de Kimber *et al.* (1986), cujo objetivo foi o ajuste dos parâmetros da equação de forma a refletir as condições de operação do tráfego de Brasília, algumas considerações relevantes adotadas no modelo original foram mantidas, uma vez que a base de dados disponível não permitiu a realização de estudos complementares que justificassem a sua alteração. São elas:

- os fatores de conversão de veículos para unidades de carros passeio foram os mesmos propostos pelo método;

- a largura média das faixas foi mantida como 3,25 m, uma vez que este valor é bem próximo da largura média obtida para as faixas estudadas em Brasília, que foi de 3,53 metros;
- o valor do fluxo de saturação para correntes de tráfego que possuem movimentos de conversão (à esquerda ou à direita) está relacionado com o valor do fluxo de saturação para veículos em frente da seguinte forma (Equação 8):

$$S(f, r) = \frac{S(a)}{(1 + 1,5 f/r)} \quad (8)$$

em que:

$S(f,r)$: fluxo de saturação em função do movimento e do raio de conversão, expresso em unidades de carro passeio por hora de tempo de verde (ucp/htv);

$S(a)$: fluxo de saturação dos veículos que seguem em frente, expresso em ucp/htv;

f : proporção de veículos que giram;

r : raio de giro, em metros.

A partir destas considerações, e da utilização da base de dados, foi realizada a análise de regressão através do uso da Equação 9.

$$FS = \frac{(a_1 + a_2 \cdot G \cdot \delta_G + a_3(w - 3.25) + a_4 \cdot \delta_P)}{(1 + 1,5(VD + VE)/R)} \quad (9)$$

em que :

G : variável correspondente ao greide, expressa em percentagem;

δ_G : variável *dummy* correspondente ao greide. Assume valor 1 (um) para greide ascendente e 0 (zero) para outro caso;

w : variável correspondente à largura da faixa, expressa em metros;

δ_P : variável *dummy* correspondente à posição. Assume valor 1 (um) para faixas que possuem movimentos de conversão à direita e 0 (zero) para outro caso;

VD : variável correspondente aos movimentos de conversão à direita. É a relação entre o número de veículos que convertem à direita e o número total de veículos da faixa;

VE: variável correspondente aos movimentos de conversão à esquerda. É a relação entre o número de veículos que convertem à esquerda e o número total de veículos da faixa;

R: variável correspondente ao raio de conversão, expressa em metros.

O coeficiente de determinação (R^2) obtido foi de 0,098, significando, portanto, que o modelo não é capaz de representar com êxito as condições de tráfego de Brasília como um todo. Na realidade, este resultado já era esperado, uma vez que uma análise das condições sob as quais o modelo de Kimber *et al.* foi desenvolvido revelou que ele foi concebido para interseções situadas em locais classificados por Webster e Cobbe como médios e bons. Dessa forma, como na amostra estudada existiam faixas com condições de fluidez ruim e, além disso, as áreas de localização das interseções eram de duas naturezas distintas, os resultados da calibração foram plenamente justificáveis.

3.2.2. Efeito da localização e fluidez do tráfego

Como forma de avaliar o impacto do tipo de local e da condição de fluidez, procedeu-se o desagrupamento da base de dados, tomando com referência os estudos desenvolvidos por Webster e Cobbe (1966), Akcelik (1981), Kimber e Semmens (1982) e o próprio modelo do HCM (TRB, 1994) que consideraram o efeito da localização das interseções no valor do fluxo de saturação.

A base de dados foi, então, desagrupada em 4 tipos, classificados de acordo com a localização das interseções e com a fluidez do tráfego. Esta classificação é mostrada na Tabela 3.

Tabela 3: Classificação das faixas de acordo com a localização e fluidez

LOCALIZAÇÃO	FLUIDEZ	
	Boa/média	Ruim
CBD	Tipo 1	Tipo 2
NÃO CBD	Tipo 3	Tipo 4

Dessa forma a base de dados ficou assim desagrupada: 16 faixas pertencentes ao Tipo 1; 11 faixas pertencentes ao Tipo 2; 17 faixas pertencentes ao Tipo 3; e 06 faixas compondo o grupo Tipo 4.

Feito o desagrupamento, procedeu-se novamente a calibração da Equação 9 para cada um dos tipos de faixas. Os resultados gerados pelo software Systat (1996), estão resumidos na Tabela 4. Esta tabela apresenta o valor de cada parâmetro associado a cada variável, o valor do *t-student* e os valores do coeficiente de determinação (R^2). Essa forma de calibrar o modelo de Kimber *et al.* permitiu constatar que, quando as condições de fluidez e localização das faixas são homogêneas, o modelo apresenta resultados satisfatórios e que, para cidades do tipo de Brasília, com interseções possuindo características de localização e fluidez distintas, torna-se necessário incluir novas variáveis no modelo.

Tabela 4: Resumo dos resultados gerados pelo Systat na calibração da equação de Kimber *et al.* para os 4 tipos de faixa.

Tipo de faixa	Parâmetro								t_{crit} p/ $\alpha=10\%$	R^2 estimado
	A1 (fluxo básico)		A2 (greide)		A3 (largura da faixa)		A4 (posição da faixa)			
	valor	t	valor	t	valor	t	valor	t		
1	1886,49	25,633	-32,5	-1,05	97,075	0,783	-71,600	-0,898	1,782	0,48
2	1594,29	14,843	-59,3	-1,984	354,99	1,145	345,165	2,046	1,895	0,55
3	2045,22	52,648	-14,9	-1,571	48,748	0,522	-147,130	-2,743	1,771	0,72
4	1696,11	8,500	-445	-1,145	277,36	1,759	104,000	.	2,920	0,48

Assim, a análise por tipo de faixas foi válida no sentido de indicar que a partir do modelo de Kimber *et al.* é possível o desenvolvimento de um modelo geral de estimativa do fluxo de saturação para a cidade de Brasília.

3.2.3. Obtenção do modelo final

Através dos resultados alcançados anteriormente, buscou-se investigar a introdução das variáveis localização e condição de fluidez na calibração do modelo de Kimber *et al.* para a base de

dados considerada globalmente. Essas variáveis, por serem de natureza qualitativa, receberam valores artificiais 0 (zero) ou 1(um) conforme indicassem ausência ou presença de determinados atributos (variáveis *dummy*).

Neste caso, as variáveis relativas à localização e condição de fluidez, convencionadas respectivamente como L e F assumiram os seguintes valores: 0 (zero) para localização não central (NÃO CBD) e também para condição de fluidez à jusante ruim; em caso contrário, ou seja, para zona central (CBD) e boa condição de fluidez à jusante, as variáveis assumiram o valor 1 (um).

O resultado da calibração da Equação 10, que diferencia-se da Equação 9 pela introdução das variáveis L e F, é mostrado na Tabela 5.

$$FS = \frac{(a_1 + a_2 \cdot G \cdot \delta_G + a_3(w - 3,25) + a_4\delta_p + a_5L + a_6F)}{(1 + 1,5(VD + VE)/R)} \quad (10)$$

Tabela 5: Resultados da regressão para a calibração do modelo com a introdução das variáveis L e F.

Parâmetro	Estimado	t
A1 – fluxo básico	1705.122	23.942
A2 – greide	-28.248	-2.243
A3 – largura da faixa	196.741	2.677
A4 – posição da faixa	-30.659	-0.511
A5 – localização	-120.442	-2.117
A6 – fluidez	275.583	4.634
R ² estimado	0,489	

Este modelo alcançou um resultado bem superior ao do primeiro modelo calibrado para os dados tomados com um todo. Isto confirma que as variáveis localização e condição de fluidez são bastante significativas para determinação do fluxo de saturação, o que pode ser comprovado também pelos valores do *t-student* dos parâmetros associados a essas variáveis, no caso, A5 e A6. Um outro aspecto a considerar se refere à variável posição, que apresentou uma

baixa significância para o modelo, provavelmente devido a interações com as novas variáveis. Devido ao tamanho da base de dados, possíveis interações entre as variáveis do modelo não puderam ser devidamente investigadas, como ocorreu com Kimber no desenvolvimento do seu modelo.

A partir destes resultados, procedeu-se uma nova calibração do modelo anterior, onde foram retiradas as variáveis posição, que se mostrou estatisticamente não significativa para o modelo, como mencionado anteriormente, e a variável *dummy* correspondente ao greide, para efeito de investigação do efeito do greide descendente no fluxo de saturação.

3.3. Modelo final obtido

O coeficiente de determinação obtido para o modelo final, através da regressão utilizando-se o *software* estatístico Systat, foi de 0,525, ou seja, com o modelo gerado, 52,5% da variação amostral total do fluxo de saturação é explicada pela variação das variáveis independentes. Este coeficiente é comparável ao obtido por Kimber *et al.* no modelo calibrado para as condições do Reino Unido, que foi de 52%.

A Tabela 6 mostra as estimativas dos parâmetros relativos ao modelo final, bem como o respectivo erro padrão assintótico (A.S.E.), a divisão dos valores da estimativa de cada parâmetro pelo seu respectivo erro padrão assintótico e, por fim, o intervalo de confiança obtido para cada um dos parâmetros da equação para um nível de significância de 5%. Na Tabela 6, os valores correspondentes ao quociente entre a estimativa de cada parâmetro e seu respectivo erro padrão assintótico (quarta coluna) podem ser considerados como uma estatística *t* (Systat, 1996). Para um nível de significância de 5%, obtém-se um *t* crítico igual a 2,01 e verifica-se que todos os parâmetros são estatisticamente significativos.

Uma outra forma de testar a validade do modelo gerado é a partir da análise dos resíduos, ou seja, da diferença entre os valores observados e os valores ajustados. Através da análise do gráfico dos valores padronizados *versus* os resíduos gerado pelo Systat,

verificou-se que os erros são normalmente distribuídos (os pontos do gráfico estão dispostos aproximadamente em diagonal). Enfim, todas as análises estatísticas efetuadas anteriormente demonstram que o modelo desenvolvido mostra-se representativo para a estimativa do fluxo de saturação, por faixa de trânsito, em aproximações de interseções semaforizadas na cidade de Brasília.

Tabela 6: Estimativa dos parâmetros do modelo final

Parâmetro	Estimativa	A.S.E	Estim./A.S.E.	Intervalo de Confiança	
				Inferior <95%>	Superior
A1 – fluxo básico	1705,646	66,900	25,495	1570,902	1840,390
A2 – greide	-26,483	8,842	-2,995	-44,291	-8,675
A3 – largura da faixa	182,899	70,251	2,604	41,407	324,391
A4 – localização	-140,580	52,293	-2,688	-245,903	-35,257
A5 – fluidez	256,506	54,031	4,747	147,682	365,330

4. CONCLUSÃO

Com base na análise estatística do modelo de regressão proposto para a estimativa do fluxo de saturação, sob as condições do tráfego de Brasília, pode-se concluir que trata-se de um modelo representativo. Isto é, o modelo poderá ser utilizado pelo órgão responsável pelo gerenciamento do trânsito na cidade como uma ferramenta para a realização de estudos voltadas ao controle do tráfego com o uso de semáforos, quando não for possível a medição do fluxo de saturação *in loco*. Além disso, o modelo desenvolvido apresenta bom potencial para ser utilizado em outras cidades brasileiras, uma vez que os dados para a sua calibração não são difíceis de serem coletados.

No entanto, é importante ressaltar que futuros trabalhos podem e devem ser realizados no sentido de aprimorar o modelo aqui apresentado. Dentre eles, uma ampliação da base de dados de Brasília, de modo a permitir a investigação da interação entre algumas das variáveis do modelo. Um outro estudo relacionado diz respeito à investigação do uso de outras técnicas de modelagem para a estimativa do fluxo de saturação, como, por exemplo, as redes neurais artificiais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Akcelik, R. (1981) *Traffic Signals: Capacity Guide and Timing Analysis*, Australian Research Board, Report No ARRB – 123.
- Andrade, J.P. (1989) *Fluxo de Saturação*. In: III Congresso Nacional de Pesquisa e Ensino em Transporte -ANPET, Salvador,1989. Anais p.48-61.
- Guerra, M. J. e D. Donaire (1979) *Estatística Indutiva: Teoria e Aplicações*. Livraria Ciência e tecnologia Editora, S. Paulo.
- Magalhães, D. J. A. V. et al. (1998) *Determinação Empírica do Fluxo de Saturação e Diagnóstico de Congestionamentos do Tráfego Urbano*. In. XII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes. Fortaleza. Anais vol. 1, pp. 29-38.
- May, A. D. (1990) *Traffic Flow Fundamentals*. New Jersey, USA.
- Niittymaki, J. e M. Pursula (1997) *Saturation Flows at Signal - Group - Controlled Traffic Signals*. In. Transportation Research Record 1572, TRB, National Research Council, Washington, D.C., pp. 24-31.
- Ribeiro, P. C. M. (1992) *Um Método Moderno para Medir Fluxo de Saturação de Interseções Semaforizadas no Brasil*. In. VI Congresso de Ensino e Pesquisa em Transportes. Rio de Janeiro. Anais vol. 1. Pp. 236-246.
- Jacques, M.A.P.; R.M.M. Gualberto e A.P. Nóbrega (1998) *Investigating The Applicability of Commonly Used Saturation Flow For Brazilian Cities: A Case Study*. Third Symposium on Highway Capacity. Copenhagen, V. 1. Pp. 549-560.
- Kimber, R. M. e M. C. Semmens (1982) *An Experiment To Investigate Saturation Flow at Traffic Signal Junctions*. Transportation Engineering and Control. March. pp. 110-117.
- Kimber, R.; M. Mc Donald e N. Hounsell (1986) *The Prediction of Saturation Flow for Road Junctions Controlled by Traffic Signals*. Transportation and Road Research Laboratory, Department of Transport, Research Report RR67.
- RRL-Road Research Laboratory (1963) *Road Note 34 – A Method For Measuring Saturation Flow At Traffic Signals*. University of Waterloo.
- Systat (1996) *Systat 6.0 for Windows: statistics*. Chicago, SPSS Inc.

TRB-Transportation Research Board (1994) *Highway Capacity Manual*, Special Report 209, National Research Council, Washington, D.C.

Webster, F.V. e B.M. Cobbe (1966) *Traffic Signals, Road Research Technical*. Paper No 56, H.M.S.O.

Endereço dos Autores:

Isabela N. Fernandes de Queiroz

Maria Alice Prudêncio Jacques

Universidade de Brasília

70910-900 - Brasília -DF

E-mail: isabela@unb.br

mapj@unb.br