

CONTROLE DE TRÁFEGO EM SISTEMAS EXPRESSOS

Marcel Amiach

ma.amiach@gmail.com

***Resumo.** Trata-se de uma proposta de controle de tráfego em vias expressas de modo a melhorar seu fluxo de veículos, que tem como aplicação a região da ponte Cidade Jardim, na cidade de São Paulo. O projeto analisará propostas de controle de demanda de veículos em um trecho das Marginais da cidade de São Paulo utilizando, para isso, meios de regulação da demanda admitida nos seus acessos (semáforos nas vias de acesso, semáforos nos ramais de ligação) e trechos principais (limite de velocidade variável nos trechos sem semáforos, entre outros). Serão testados, através de simulações numéricas com o software CORSIM, métodos já utilizados em outros países para o controle local, com programação baseada em dados históricos ou dados obtidos em tempo real de sensores de tráfego. Serão, eventualmente, propostos novos métodos de controle local ou integrado (com controle coordenado de mais de um acesso). As estratégias de controle serão avaliadas com base no objetivo de melhorar o fluxo de veículos e reduzir, assim, o tempo de viagem para todos os veículos (incluindo o acesso e o percurso no sistema expresso).*

***Palavras chave:** tráfego, controle, via expressa, congestionamento, limite variável de velocidade.*

1. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, tem-se observado uma clara intensificação dos congestionamentos diários, principalmente nas regiões próximas a áreas metropolitanas em todo o mundo.

O congestionamento degrada a condição de operação na infra-estrutura disponível reduzindo sua capacidade de escoamento nos períodos de pico. Assim, os objetivos para os quais as vias urbanas e interurbanas foram originalmente projetadas (permitir o deslocamento de seus usuários de forma eficiente) acabam não sendo atingidos, exatamente nos momentos em que essas vias são mais necessárias.

O uso eficiente do sistema viário exige uma utilização mais controlada da infra-estrutura disponível. Deve-se ter em mente que a expansão das vias não é a única solução para a melhoria da eficiência viária, mas que estratégias de controle devem vir em conjunto com essa medida.

2. OBJETIVO

O trabalho exposto a seguir investiga estratégias de controle com ênfase nas vias expressas, como as marginais da cidade de São Paulo. Duas possíveis estratégias são o controle por rampas semaforizadas, que retém demanda na entrada de uma via expressa, e o controle por limites variáveis de velocidade, que retém a demanda da via expressa com uma redução de velocidade na via principal que a precede.

3. ESTRATÉGIAS DE CONTROLE

Inicialmente, serão estudados modelos que consideram um controle local de tráfego, ou seja, modelos que levam em conta apenas um trecho de via principal e cada rampa independente. Outra possibilidade, porém mais complexa, é estudar um conjunto de rampas e um sistema de controle que leve em conta todas as rampas e a via expressa como um todo, com sensores instalados em toda sua extensão. Além do controle de demanda, serão estudados os efeitos do controle de velocidade nas vias, ou seja, os efeitos de limites variáveis de velocidade nos trechos da via principal.

3.1. Regulação De Demanda Por Controle De Rampa Local

Existem diversas formas de abordar a questão do controle isolado (através de uma rampa apenas). A mais conhecida estratégia é chamada "ALINEA".

ALINEA é um sistema de controle em laço fechado (closed loop), já que se baseia em dados a jusante, ou seja, depois da rampa. Com isso, ajusta-se o sistema a partir dos resultados obtidos na iteração anterior.

Na prática, de acordo com Papageorgiou e Smaragdis (2007) a estrutura com laço fechado é mais eficaz comparativamente àquela com laço aberto, mas mudanças no sistema ALINEA foram propostas, de forma a se ter variações do ALINEA que podem ser mais efetivas dependendo do tipo de problema que se tem. As variações não serão consideradas e apenas as estratégias clássicas serão descritas a seguir.

Os sistemas de controle por rampa são desenvolvidos com base em dados históricos ou em medidas realizadas em tempo real, a partir de sensores instalados na pista, tanto na via em questão quanto na rampa. De posse dessas medidas, o sistema de controle toma decisões e libera os veículos baseado em certos parâmetros e esta liberação é feita por semáforos instalados na fronteira rampa/via coletora. Aos trechos principais (rodovias), pode-se adicionar o controle de limite de velocidade.

O resultado deste controle é um determinado fluxo liberado pela rampa para acessar a via.

3.1.1. Primeiros Resultados de Simulação do Método ALINEA

O estudo realizado em [3] por Papamichail, Ioannis, et al. mostra que a eficácia global do controle decorre de impedir a perda de capacidade decorrente da saturação da via (caso contrário, há uma troca entre a via principal e o acesso a ela). Esse fenômeno de queda de capacidade é o chamado “fenômeno das duas capacidades”, que representa uma queda do fluxo máximo que escoar num gargalo, que decorre da formação de fila no trecho anterior ao gargalo, que é resultado da falta de capacidade do próprio gargalo.

Este estudo permitiu observar a real eficiência do sistema de controle ALINEA. Porém, o projeto ALINEA, apesar de ser muito efetivo, não pode ser implantado de forma independente. A regulação de fluxo na rampa não deve prejudicar o trânsito dentro da cidade. Assim, utiliza-se, também, um sistema de controle de filas na rampa, de modo que, juntos, estes sistemas não resultem em uma via expressa com bom fluxo em detrimento de uma área urbana congestionada.

Estes dois sistemas de controle, muito efetivos, são comprovadamente benéficos para o bom fluxo de veículos, como já se vê na Europa, EUA e Israel, por exemplo. Alguns vídeos estão disponíveis em [5].

No entanto, admite-se neste trabalho que para sistemas mais solicitados, sua lógica pode ter de ser complementada pelo controle coordenado e pelo controle em fluxo contínuo pelo controle seletivo de velocidade.

3.2. Regulação de Demanda por Controle de Rampa Coordenado

Além de controle local, pode-se implementar um controle coordenado de demanda, que leva em conta toda uma região da malha viária para controlar várias rampas e uma mesma via coletora. Este tipo de controle é muito mais complexo do que o controle local e leva a melhores resultados quanto à eficiência da malha.

A estratégia proposta para controle coordenado de fluxo de veículos é denominada HERO (HEuristic Ramp metering coOrdination). Trata-se de um sistema que possui um esquema simples e amplamente reativo, baseado na utilização de dados obtidos de leituras em tempo real, sem a necessidade de modelos de previsão de perturbações.

O sistema HERO tem em seu código o sistema ALINEA incluso, já que existe também um controle local para cada trecho individualmente. Além disso, o HERO é dotado de uma aplicação que controla a fila nas rampas, de modo que este controle não interfira nas vias adjacentes da região.

De acordo com Papamichail et al. (2010), realizar um controle local em várias rampas da mesma rede viária não é tão efetivo quanto realizar um controle coordenado, fazendo com que uma rampa ajude no descongestionamento de um trecho anterior ou posterior a ela.

O sistema HERO deve ser capaz de identificar um gargalo e, portanto, um eventual congestionamento com antecipação suficiente para que uma ação reativa possa ser iniciada. Esse tempo deve ser maior do que o tempo de viagem entre a rampa adjacente ao gargalo e a primeira rampa a montante. Caso o tempo de identificação do gargalo seja insuficiente, os veículos acessando a via principal não serão bloqueados e chegarão ao gargalo, favorecendo assim o congestionamento. Nesse caso, o controle é feito recrutando rampas anteriores à adjacente, de modo a diminuir a quantidade de veículos que chega ao gargalo.

3.2.1. Resultados de Simulação do Controle Coordenado

O caso real de atuação do HERO, apresentado em [3], mostrou-se muito efetivo, visto que o tempo necessário para conter o gargalo foi de apenas seis minutos.

A aplicação do sistema HERO mostra o quanto efetivo é o controle coordenado de rampas. Como principal objetivo deste tipo de controle, observou-se, na região, uma real redução do tempo de viagem dos motoristas usuários da porção controlada desta rede viária.

3.3. Controle Seletivo de Velocidade

Além dos procedimentos de controle local e coordenado em rampas, pode-se realizar o controle de demanda na via principal, fazendo-se variar a velocidade máxima permitida na via.

Em princípio, este controle é feito utilizando-se painéis de limite de velocidade variável. Ao invés de se instalarem placas com limites marcados sobre elas, instala-se um painel de LEDs, por exemplo, em que se mostra o limite aplicado para a via naquele momento.

Este tipo de controle faz com que se reduza a velocidade de um trecho local, de forma a melhorar as condições de tráfego globais da via. Fazendo-se essa redução, tem-se um efeito de retenção de demanda no local controlado, o que reduz a demanda em um trecho posterior (gargalo), o que atrasa a formação deste gargalo.

3.3.1. Primeiros Resultados de Simulação do Controle Seletivo de Velocidade

Não há estudos anteriores sobre controle de tráfego em vias expressas com uso do controle seletivo de velocidade (resultados iniciais são relatados em Carlson et al., 2010). Um estudo real realizado na Alemanha por Papageorgiou et al. (2008) registrou o fluxo de veículos para diferentes localidades com quatro limites de velocidades diferentes

aplicados às vias: sem limite, 100 km/h, 80 km/h e 60 km/h. O melhor efeito de retenção observado foi para o limite de 60 km/h imposto aos usuários.

Do ponto de vista de eficiência de fluxo no local controlado, essa prática oferece resultados negativos, já que isso faz com que se aumente o tempo de viagem dos usuários que estão no trecho em que se reduziu a velocidade. Por outro lado, no controle de um sistema mais amplo que vise usar o controle neste local para evitar a formação de um gargalo adiante, esta prática pode ser adotada. É aplicável se for necessário recrutar o controle de demanda em outras vias principais que alimentam o tráfego no sistema.

3.4. Análise das Estratégias Propostas

Até o momento, foram apresentados três métodos de controle de tráfego: controle local por rampa, controle coordenado por rampas e controle seletivo de velocidades.

O fenômeno das duas capacidades, ou seja, a queda no fluxo de veículos devido a um gargalo, deve ser evitado. Isso quer dizer que se deve trabalhar para que o próprio gargalo não ocorra.

Para isso, utilizam-se métodos de controle de demanda em rampas, ou seja, regula-se a injeção de veículos em vias principais a partir de rampas semaforizadas ao longo de sua extensão. O sistema ALINEA é capaz de cumprir com essa tarefa. A partir de medidas em tempo real, o ALINEA verifica o fluxo na via principal, bem como a fila que aguarda para acessar a via e, baseado em certos critérios, libera os veículos aos poucos. Esse controle é feito localmente.

Porém, evitar que isso ocorra com apenas controles locais é uma tarefa um tanto quanto complicada se considerarmos o volume de veículos que trafegam hoje nas vias de todo o mundo. Assim, utiliza-se o método de controle coordenado de rampas.

O sistema HERO é o principal sistema de controle coordenado utilizado atualmente. Ele engloba uma porção maior da via principal (em relação ao ALINEA) e realiza uma interação entre as diversas rampas existentes para o acesso na via. Quando se identifica um possível gargalo, a primeira rampa a montante do local do gargalo é acionada para evitar que este ocorra. Caso seja percebido que essa rampa não dará conta da tarefa, visto que sua fila não deve ultrapassar uma quantidade máxima de veículos, o HERO aciona outras rampas a montante de forma que esse gargalo iminente seja controlado o mais rápido possível.

Aliado a esse sistema de controle coordenado de rampas, pode-se usar um controle seletivo de velocidade. Trata-se de um sistema que considera que as velocidades máximas permitidas nas vias são variáveis e esses limites podem variar de acordo com alguns parâmetros. Entre eles, podem-se citar o horário, o dia, condições de tempo (chuva, por exemplo) ou algum incidente na pista.

Assim, foram propostos dois diferentes métodos de controle: controle de demanda em rampas e controle de demanda na via principal.

4. ESTUDO DE CONTROLE NA CIDADE DE SÃO PAULO

A seguir, será apresentada a metodologia e os resultados de um estudo sobre estratégias de controle de tráfego em sistemas expressos, baseado no uso de *softwares* de simulação de tráfego, aplicado a um trecho da Marginal Pinheiros, incluindo a pista expressa e o entrelaçamento na pista local na altura da Ponte Cidade Jardim.

Como já foi citado, o uso do *software* como ferramenta de estudo pressupõe uma verificação de seu comportamento em relação aos fenômenos que são observados na realidade. Os chamados “fenômenos das duas capacidades” e o “efeito de limite de velocidade” devem ser observados em simulações simples do *software*, de forma que este possa ser usado como ferramenta confiável na continuidade do projeto.

O *software* utilizado é o CORSIM, um *software* de simulação microscópica e estocástica do tráfego veicular patrocinado pela Administração Federal de Rodovias do Departamento de Transportes dos Estados Unidos (FHWA, em inglês) do governo dos Estados Unidos [6]. Foi utilizada a versão 5.0 do CORSIM.

4.1. Resultados de Simulação para a Verificação do *Software*

Para se verificar a validade do *software*, tive de realizar algumas simulações. Uma malha simples foi criada para tanto.

Algumas simulações foram realizadas sem que se alterassem nenhum dos parâmetros do *software*, utilizando-o da forma como é instalado na máquina. Estas simulações fizeram parte do chamado primeiro experimento.

Em seguida, alguns parâmetros foram alterados de forma a se tentar atingir certas condições de operação do sistema: foram cinco casos simulados, sendo que o primeiro representa um caso cuja velocidade de fluxo livre no gargalo foi mantida em 100 km/h e o fluxo desejado em 2000 v/h/f e os quatro últimos representam situações com velocidade livres, no gargalo, inferiores aos 100 km/h e demandas também inferiores aos 2000 v/h/f no gargalo. O objetivo nestes cinco casos, que fazem parte do chamado segundo experimento, foi de tentar determinar os parâmetros do *software* que permitissem reproduzir o par velocidade/fluxo em quaisquer outras situações.

Dos resultados de ambos os experimentos, conclui-se que o CORSIM não representa o fenômeno das duas capacidades.

Porém, a análise dos resultados do segundo experimento evidencia um real efeito de retenção de demanda, que é conseqüência tanto da redução de velocidade quanto da alteração de parâmetros referentes ao comportamento dos

motoristas. Portanto, conclui-se que o CORSIM representa o efeito de retenção de demanda pelo limite variável de velocidades.

4.2. Conclusão da Verificação do Software

Os resultados obtidos nestas simulações mostram que o *software* CORSIM pode ser usado como ferramenta de estudo para este projeto, desde que configurado corretamente.

A inserção adequada dos parâmetros no *software*, a partir de ajuste fino, permite que o CORSIM forneça uma capacidade de fluxo muito próxima da desejada. Deve haver uma calibração e, portanto, diversas simulações, para que se determinem os valores precisos dos parâmetros a serem inseridos.

Os resultados e parâmetros dos experimentos realizados anteriormente poderão ser usados no estudo da ponte Cidade Jardim, em São Paulo.

Assim, pode-se concluir que o CORSIM é uma boa ferramenta de estudo, se levada em conta a necessidade de calibração de parâmetros.

4.3. Resultados das Simulações de Aplicação

O objetivo deste projeto é propor estratégias de controle de tráfego, tendo como aplicação a região da Ponte Cidade Jardim, na Marginal Pinheiros, na cidade de São Paulo. Foram gravados vídeos do escoamento de veículos através da ponte Cidade Jardim de modo que se tenham valores de fluxo mais reais.

As simulações de aplicação consistiram em nove casos diferentes de três experimentos computacionais, alguns com controle e outros sem, de modo que se pudesse verificar a eficiência dos métodos de controle em cada um dos nove casos. Como resultados, tiraram-se velocidades médias e fluxos médios para seis regiões da malha: trecho de sete faixas (antes da bifurcação – trecho I), pista expressa (cinco faixas – trecho II), pista local (duas faixas – trecho III), entrelaçamento (cinco faixas – trecho IV), ponte (seis faixas – trecho V) e rampa (três faixas – trecho VI). Na realidade, a rampa possui duas faixas, mas pelo fato de alguns parâmetros do método ALINEA, já embutido no *software*, estarem limitados ao número de faixas do trecho semaforizado e disso estar prejudicando o estudo, foi adicionada uma faixa na aproximação do semáforo que será utilizado para implementar o controle do ALINEA, faixa artificial que foi em seguida suprimida antes da entrada da trecho de entrelaçamento.

Os nove casos simulados e os três experimentos computacionais realizados estão descritos a seguir e uma figura ilustra os casos estudados, assim como os trechos indicados acima e a posição de atuação de cada método de controle.

- 1) Sem incidentes e sem controle (corresponde à simulação de validação do modelo do trecho em análise);

EXPERIMENTO 1 – Controle com Incidente na Pista Expressa:

- 2) Incidente na faixa da extrema direita da pista expressa, embaixo da ponte, sem controle;
- 3) Idem ao caso 2, com simulação, no gargalo, da perda de capacidade (onde há saturação da via, decorrente do fenômeno das duas capacidades);
- 4) Incidente na faixa da extrema direita da pista expressa, embaixo da ponte, com limite de velocidade de 60 *km/h* (para retenção de 11% da demanda) em trecho anterior com sete faixas;
- 5) Incidente na faixa da extrema direita da pista expressa, embaixo da ponte, com limite de velocidade de 50 *kmh* (para retenção de 18% da demanda) em trecho anterior com sete faixas;

EXPERIMENTO 2 – Controle com ALINEA, sem incidentes:

- 6) Sem incidentes e com controle ALINEA na rampa;

EXPERIMENTO 3 – Controle com Incidente no entrelaçamento da Pista Local:

- 7) Incidente na faixa da extrema direita da pista local, embaixo da ponte, sem controle;
- 8) Idem ao caso 8, com simulação, no gargalo, da perda de capacidade (onde há saturação da via, decorrente do fenômeno das duas capacidades);
- 9) Incidente na faixa da extrema direita da pista local, embaixo da ponte, com controle ALINEA.



Figura 1: Imagem de uma simulação com indicação dos trechos estudados e dos trechos onde atuam os controles

A seguir, estão dispostos os resultados das simulações na forma de tabelas e uma conclusão acerca destes resultados está na seqüência.

Tabela 1: Resultados das simulações para a região anterior à bifurcação

<i>Região: sete faixas (antes da bifurcação) – trecho I (453 m)</i>					
<i>Caso</i>	<i>Fluxo Total (v/h)</i>	<i>Fluxo por faixa (v/h/f)</i>	<i>v (km/h)</i>	<i>Tempo viagem (s)</i>	<i>Veículo-Hor</i>
1	13357,07	1908,15	85,07	19,18	71
2	12455,82	1779,40	40,00	40,79	141
3	11928,54	1704,08	34,34	47,51	157
4	12009,65	1715,66	30,23	53,97	180
5	11641,29	1663,04	27,44	59,47	192
6	13356,98	1908,14	85,07	19,18	71
7	13286,88	1898,13	74,50	21,9	81
8	13088,36	1869,77	56,42	28,92	105
9	13267,68	1895,38	71,38	22,86	84

Tabela 2: Resultados das simulações para a região da pista expressa

<i>Região: pista expressa – trecho II (536 m)</i>					
<i>Caso</i>	<i>Fluxo Total (v/h)</i>	<i>Fluxo por faixa (v/h/f)</i>	<i>v (km/h)</i>	<i>Tempo viagem (s)</i>	<i>Veículo-Hor</i>
1	10278,30	2055,66	81,98	23,53	67
2	9465,67	1893,13	45,07	42,8	113
3	9004,47	1800,89	35,53	54,3	136
4	9065,89	1813,18	46,04	41,9	106
5	8714,52	1742,90	47,23	40,84	99
6	10265,72	2053,14	82,19	23,47	67
7	10235,04	2047,01	81,60	23,64	67
8	10120,85	2024,17	80,64	23,92	67
9	10212,47	2042,49	81,53	23,66	67

Tabela 3: Resultados das simulações para a região da pista local

<i>Região: pista local – trecho III (287 m)</i>					
<i>Caso</i>	<i>Fluxo Total (v/h)</i>	<i>Fluxo por faixa (v/h/f)</i>	<i>v (km/h)</i>	<i>Tempo viagem (s)</i>	<i>Veículo-Hor\bar{E}</i>
1	3079,71	1539,86	55,75	18,54	16
2	2921,19	1460,60	49,29	20,97	17
3	2833,87	1416,94	55,72	18,55	15
4	2901,44	1450,72	56,39	18,33	15
5	2881,61	1440,80	56,95	18,15	15
6	3088,03	1544,02	56,27	18,37	16
7	3039,66	1519,83	41,21	25,08	21
8	2930,42	1465,21	31,38	32,94	27
9	3032,05	1516,03	38,89	26,58	22

Tabela 4: Resultados das simulações para a região do entrelaçamento

<i>Região: entrelaçamento (trecho único) – trecho IV (106 m)</i>					
<i>Caso</i>	<i>Fluxo Total (v/h)</i>	<i>Fluxo por faixa (v/h/f)</i>	<i>v (km/h)</i>	<i>Tempo viagem (s)</i>	<i>Veículo-Hor\bar{E}</i>
1	5273,93	1054,79	39,18	9,69	14
2	5129,00	1025,80	41,31	9,19	13
3	5033,62	1006,72	42,56	8,92	12
4	5114,53	1022,91	41,67	9,11	13
5	5093,30	1018,66	43,94	8,64	12
6	5285,90	1057,18	40,61	9,35	14
7	4900,01	980,00	19,42	19,55	27
8	4724,81	944,96	17,74	21,4	28
9	4813,20	962,64	19,84	19,14	26

Tabela 5: Resultados das simulações para a região da rampa

<i>Região: rampa – trecho V (259 m)</i>					
<i>Caso</i>	<i>Fluxo Total (v/h)</i>	<i>Fluxo por faixa (v/h/f)</i>	<i>v (km/h)</i>	<i>Tempo viagem (s)</i>	<i>Veículo-Hor\bar{E}</i>
1	2267,46	755,82	62,03	15	9
2	2273,54	757,85	62,03	15	9
3	2271,14	757,05	62,03	15	9
4	2277,72	759,24	62,03	15	9
5	2296,00	765,33	62,03	15	10
6	2284,63	761,54	29,82	31	20
7	1960,98	653,66	11,84	79	43
8	1889,92	629,97	10,01	93	49
9	1895,05	631,68	9,94	94	49

É importante deixar claro que os resultados apresentados nas tabelas anteriores, assim como os da tabela que segue (Tabelas 1 a 6) são, na verdade, valores médios de um total de dez simulações de modelo estocástico. Assumindo que uma única simulação poderia trazer resultados distantes de um valor mais correto, decidiu-se que seriam feitas dez simulações para contornar essa questão. Por isso, pode ser relevante se ter idéia da variância desses resultados. Espera-se que as variâncias relacionadas ao trecho do entrelaçamento sejam altas se comparadas aos outros trechos.

Para o trecho do entrelaçamento, considerando-se o caso 3, as variações relativas à média são da ordem de 6% para velocidade, 1% para o fluxo total e 6% para o tempo de viagem. Para o trecho anterior à bifurcação, ainda no trajeto I, essas variações são da ordem de 2%, 1% e 2%, respectivamente.

Tabela 6: Resultados das simulações para a região da ponte

<i>Região: ponte – trecho VI (194 m)</i>					
<i>Caso</i>	<i>Fluxo Total (v/h)</i>	<i>Fluxo por faixa (v/h/f)</i>	<i>v (km/h)</i>	<i>Tempo viagem (s)</i>	<i>Veículo-Hor\bar{e}</i>
1	5998,66	1199,73	61,12	11	19
2	5998,92	1199,78	61,12	11	19
3	6001,23	1200,25	61,12	11	19
4	5999,87	1199,97	61,12	11	19
5	6001,36	1200,27	61,12	11	19
6	5996,94	1199,39	61,12	11	19
7	5850,79	1170,16	27,01	26	42
8	5757,11	1151,42	23,23	30	48
9	5696,94	1139,39	21,11	33	52

4.4. Análise dos Resultados de Simulação de Aplicação

No que diz respeito às tabelas anteriores, o primeiro caso simulado é aquele em que deve ser observado comportamento semelhante ao que se tem na realidade, bem como se os dados de entrada estão sendo observados efetivamente na simulação.

Dos dados coletados em campo, sabe-se que chegam da ponte Eusébio Matoso cerca de 13460 v/h . Da simulação, este valor está em 13357,07 v/h (Tabela 1). Dada a pequena diferença, conclui-se que os fluxos estão adequadamente reproduzidos.

Quanto à velocidade média neste trecho, tem-se 85,07 km/h (Tabela 1). Comparando o dado de campo (90 km/h) com o da simulação, nota-se uma grande proximidade e coerência de valores.

O primeiro experimento computacional corresponde a avaliar o impacto de um incidente na pista expressa e verificar o resultado das estratégias de controle. Os resultados relevantes são os correspondentes aos casos 2, 3, 4 e 5.

Este experimento simula um bloqueio na pista expressa logo embaixo da ponte. Espera-se que isso gere um congestionamento, reduzindo o fluxo escoado e, principalmente, a velocidade na região. No segundo caso, a geração de fila faz com que, na região de sete faixas, o fluxo caia de 13357 v/h para 11929 v/h , a velocidade caia de 85 km/h para 34 km/h e o tempo de viagem aumente de 19 s para 48 s. Na pista expressa, o efeito também é importante: a velocidade caiu de 82 km/h para 36 km/h e o tempo de viagem subiu de 24 s para 54 s. Na pista local, o efeito da fila foi menos importante.

O terceiro caso busca uma melhor estimativa do efeito de congestionamento em relação ao segundo. Como já comentado, o CORSIM não representa o fenômeno das duas capacidades, o que pode levar a resultados falsos em alguns casos. Dessa forma, notando-se que no segundo caso houve congestionamento, o terceiro caso simula a perda de capacidade no gargalo gerado devido ao bloqueio na pista expressa. Assim, podem-se obter resultados mais confiáveis. O que se nota são variações mais acentuadas em relação ao primeiro caso do que aquelas observadas no segundo caso, ou seja, há maior queda de fluxo escoado, maior queda de velocidade média e maior aumento nos tempos de viagem. Esses resultados permitem uma maior precisão e, portanto, são melhores referências para as comparações, como será visto adiante.

O quarto caso ainda mantém o bloqueio na pista, porém não inclui mais a perda de capacidade simulada no caso anterior (admitindo sucesso em eliminar a saturação da via). Porém, é feita a retenção de demanda na região de sete faixas pela simulação do efeito de um controle seletivo de velocidade com o limite de velocidades de 60 km/h (os valores dos parâmetros e retenção são os correspondentes). Dessa forma, espera-se conter o congestionamento e melhorar a condição de operação na pista expressa. Por isto, este caso não inclui mais a perda de capacidade simulada no caso anterior (admitindo sucesso em eliminar a saturação da via).

Com essa retenção, observou-se um fluxo médio de 12010 v/h nas sete faixas ao invés dos 13357 v/h do caso sem retenção e sem bloqueio (primeiro caso). Essa redução é equivalente a uma retenção de 10,1%, valor muito próximo dos 11,1% esperados. Os dados deste caso devem, agora, ser comparados aos dados do terceiro caso que, como comentado, são melhores referências devido ao seu maior grau de precisão.

Foi possível um aumento de fluxo da região das sete faixas, saindo de 11929 v/h e chegando a 12010 v/h . Devido à retenção, o tempo de viagem subiu ligeiramente entre o caso anterior e este caso, assim como a velocidade média caiu. Porém, na pista expressa, houve aumento de velocidade média, que saiu de 36 km/h e chegou a 46 km/h , e conseqüente redução no tempo de viagem, que caiu de 54 s para 42 s.

O quinto caso é uma tentativa de investigar se um limite de velocidade menor é capaz de melhorar ainda mais a operação da pista expressa em caso de bloqueio na pista. Dessa vez, foi imposta uma velocidade no trecho de sete faixas de 50 km/h , visando reduzir a demanda em 18%, o que não foi eficaz. A redução foi menor, da ordem de 13% e, como esperado, velocidade média e tempo de viagem pioraram neste trecho. Na pista expressa, foi possível reduzir o

tempo de viagem em um segundo. Nas outras regiões estudadas (entrelaçamento, rampa e ponte), as variações também não foram significativas, como notado no caso anterior.

Conclui-se, portanto, que o quarto caso (controle seletivo de velocidade com limite de 60 km/h) seria a estratégia de controle de tráfego adequada para o incidente na pista expressa. A melhoria no fluxo foi insignificante, porém, na velocidade, foi de 29,5%.

O segundo experimento computacional corresponde a avaliar o impacto do ALINEA no controle de acesso ao entrelaçamento em um dia normal.

Neste experimento, devem-se decidir os parâmetros de controle do ALINEA. Foi imposto um fluxo mínimo na rampa de 30 v/min ou 1800 v/h com um fluxo inicial de 45 v/min ou 2700 v/h. O valor de ocupância desejada foi definido como 40% (os valores desejados usuais são de 20%, mas o entrelaçamento tem velocidades menores e ocupâncias maiores, em condições de operação similares; valores alternativos de 30% e 35% forneceram resultados similares). O valor usual de K_r foi imposto como sendo $K_r = 70$ (valor que representa uma injeção adicional de veículos na rampa de 0,70 v/min para cada 1% de desvio em relação à ocupância desejada). Em geral, a sensibilidade dos resultados do CORSIM aos parâmetros de controle do ALINEA nem sempre seguiu a lógica esperada (sua implementação deveria ser melhor investigada).

O que se nota neste caso é que, comparado ao primeiro caso, em que não há nenhum tipo de controle nem bloqueio, só houve mudança significativa na rampa. Na prática, nota-se que o fluxo escoado na rampa pouco mudou, passando de 2267 v/h para 2285 v/h, mas a presença do semáforo acaba por gerar fila na rampa e, conseqüentemente, uma queda na velocidade média e um aumento no tempo de viagem.

O aspecto relevante é que se atingiu o objetivo de melhorar a operação no entrelaçamento. Como pode ser observado, a redução no fluxo de 0,03% decorrente do controle de acesso permitiu uma melhora na velocidade de operação de 3,6% no entrelaçamento. Este resultado mostra o potencial e a limitação do controle local no contexto do estudo.

O terceiro experimento computacional corresponde a avaliar o impacto de um incidente no entrelaçamento e verificar o resultado das estratégias de controle. Os resultados relevantes são os correspondentes aos casos 7, 8 e 9.

Este experimento corresponde à simulação com o incidente no entrelaçamento, um bloqueio semelhante ao da pista expressa, mas na pista local. Ele se localiza logo abaixo da ponte, na faixa da extrema direita.

Da mesma forma que foi feita para os casos 2 e 3, o caso 7 foi utilizado para identificar o congestionamento e o caso 8 então buscou uma melhor análise. Portanto, aqui será detalhado apenas o caso 8, que é base de comparação para o caso 9.

No oitavo caso, o que se nota é que o entrelaçamento fica bastante prejudicado, como esperado. Comparando os dados deste caso com aqueles do primeiro caso, a velocidade neste trecho cai de 39 km/h para 18 km/h e o tempo de viagem sobe de 10 s para 21 s. Também, a rampa fica bastante prejudicada, com uma queda de velocidade média muito significativa, saindo de 62 km/h para 10 km/h. O tempo de viagem também sobe, saindo de 15 s para 93 s ou 1 min 33 s. Conseqüentemente, a ponte sofre com queda de qualidade nas condições de operação: a velocidade média cai de 61 km/h para 23 km/h e o tempo de viagem sobe de 11 s para 30 s. Além disso, a pista local tem sua velocidade diminuída de 56 km/h para 32 km/h e o tempo de viagem aumentado de 19 s para 33 s. A região de sete faixas, devido à fila gerada por causa do bloqueio, sofre uma queda de velocidade razoável, que sai de 85 km/h e chega a 56 km/h, e há aumento considerável no tempo de viagem, que sai de 19 s e vai para 29 s.

Analogamente aos casos em que o incidente estava na pista expressa, o oitavo caso é uma tentativa de melhorar a precisão dos dados do caso anterior simulando a queda de capacidade onde o bloqueio está localizado.

O nono e último caso testa a eficiência do método ALINEA na tentativa de amenizar o efeito do bloqueio. Foram mantidos os mesmos parâmetros de controle adotados anteriormente (na simulação do sexto caso).

O que se nota, comparando os resultados deste caso com o oitavo caso, é que há melhora geral em detrimento da rampa e da ponte, que sofrem pela presença do semáforo e não pela atuação do método ALINEA, que não alterou consideravelmente os fluxos na rampa. Na pista local, a velocidade média sobe de 31 km/h para 39 km/h, o que faz com que o tempo médio de viagem caia de 33 s para 27 s. Na região de sete faixas, a velocidade média aumenta de 56 km/h para 71 km/h, o que faz com que o tempo médio de viagem diminua de 29 s para 23 s. Houve leve melhora no entrelaçamento e leve piora na rampa e na ponte.

Conclui-se, portanto, que, ao comparar os casos 8 e 9, além de uma pequena melhora no entrelaçamento, houve melhora também na região de sete faixas e na região local. Não foi apenas uma troca entre o entrelaçamento e o ramal, mas conseguiu-se um aumento de 26,5% na velocidade dos veículos na região de sete faixas e um aumento de 23,9% na velocidade dos veículos na região da pista local.

Dentre todos estes resultados, uma melhor avaliação deve ponderar o impacto global. Por isso, a Tabela 7, a seguir, resume os dados referentes aos casos mais relevantes, que são aqueles que evidenciam os resultados mais reais sem controle e com controle. Estes casos mais relevantes estão agrupados em pares e são: 1 e 6; 3 e 4; 3 e 5; 8 e 9.

Os fluxos referentes aos casos de cada par são diferentes e, por isso, deve haver uma correção para que a comparação dos valores de veículo-hora possa ser feita corretamente. Decidiu-se usar o critério de imputar um tempo de viagem igual ao valor médio também para a diferença do tráfego escoado, para comparar casos com fluxos iguais.

Tomando como exemplo os casos 3 e 4, sabe-se que o fluxo na pista expressa (trecho II) é de 9004,47 v/h e no caso 4, 9065,89 v/h. Com fluxos diferentes, os valores de veículo-hora não podem ser bem comparados. Assim, ao valor de veículo-hora do caso com menor fluxo, adiciona-se um termo de correção, calculado da seguinte forma:

$$\Delta = \frac{(Q_{>} - Q_{<}) \cdot t_{viagem}}{3600}$$

Assim, o valor de veículo hora para o caso 3 na pista expressa passa a ser:

$$VH = 135,82 + (9065,89 - 9004,47) \cdot \frac{54,3}{3600} = 136,75$$

Tomando como base a explicação acima, tem-se a seguinte tabela, que resume os dados mais relevantes das simulações.

Tabela 7: Dados comparativos para os casos mais relevantes

Tabela comparativa						
Casos	Tempo de viagem (s)		Veículo – Hora			
	Sem controle	Com controle	Sem controle		Com controle	
			Simulado	Ajustado	Simulado	Ajustado
1x6	9,69	9,35	14,20	14,23	13,73	13,73
3x4	54,3	41,9	135,82	136,75	105,52	105,52
3x5	54,3	40,8	135,82	135,82	98,86	102,15
8x9	32,9	26,6	26,81	27,74	22,39	22,39

Para os casos 1 e 6, os dados foram tomados no trecho do entrelaçamento (trecho IV). Já nos casos 3, 4 e 5, foi tomado como referência o trecho da pista expressa (trecho II). Nos casos 8 e 9, os dados foram tirados da pista local (trecho III).

Com o critério utilizado, estes valores estão em acordo com o que se espera, ou seja, eles são menores para casos em que o tempo de viagem é menor, já que não há mais influência da variação dos fluxos totais.

Os dados da Tabela 7 acima mostram bem o efeito do controle. Nos casos com controle (4, 5, 6 e 9), houve melhora no tempo de viagem e queda no valor de veículo-hora em relação aos casos sem controle (1, 3 e 8), o que evidencia a eficiência dos métodos considerados.

4.5. Conclusão sobre as Simulações de Aplicação

Nas simulações de aplicação que realizei foram testados dois métodos de controle, ALINEA e a retenção de demanda decorrente de um controle seletivo do limite de velocidade na via principal. Estes métodos foram usados na presença de incidentes de pista e também em situações normais de tráfego.

No experimento do bloqueio na pista expressa, a retenção de demanda com controle seletivo do limite de velocidade foi capaz de melhorar a condição de operação da malha, evitando o congestionamento e reduzindo o tempo de viagem na região onde o bloqueio ocorreu. A piora inevitável nas condições de operação em trechos anteriores, nesse caso na região de sete faixas, foi menor do que a que ocorreu em função do incidente sem controle seletivo do limite de velocidade. Nas outras regiões da malha, não houve mudanças significativas no tráfego.

O controle de acesso com o ALINEA foi testado em dias com operação normal e com um incidente de bloqueio do entrelaçamento na pista local. Em ambos os casos, o efeito foi mais local, no entrelaçamento e no ramal de acesso.

A introdução do ALINEA em um dia normal mostrou resultados favoráveis para o entrelaçamento, em oposição à piora da operação no ramal. Este segundo efeito é relevante e inclui a influência do semáforo.

No experimento do bloqueio da pista local pelo incidente no entrelaçamento, o ALINEA resultou em melhoras na pista local, antes do entrelaçamento, embora menos significativas como se notou no caso do incidente na pista expressa. O efeito da contenção da demanda no ramal esteve novamente presente, mas os benefícios aos demais fluxos foram, neste experimento, mais relevantes.

É importante notar que a implementação do método ALINEA, que já vem incorporado ao CORSIM, ofereceu dificuldades de manipulação. Algumas vezes, seu comportamento não estava de acordo com o esperado e os resultados obtidos nas últimas simulações não trouxeram segurança quanto à sua efetividade.

Portanto, a estimativa dos benefícios obtidos com o ALINEA pode estar aquém do seu potencial real.

O mesmo pode ser dito também em relação aos benefícios do controle seletivo de velocidade, pois não foi simulado um sistema de controle em tempo real (os valores correspondentes foram adotados para todo o período de simulação).

5. Conclusão Final

Este documento apresenta um procedimento de estudo sobre controle de tráfego com aplicação na via expressa da Marginal Pinheiros, em São Paulo.

No que diz respeito ao controle de demanda por rampas, podem-se distinguir dois métodos: controle local e controle coordenado, que se mostrou mais efetivo do que o controle local, como era de se esperar.

Porém, para que se ponham em prática esses métodos, é necessário que se experimentem certas situações e que se verifiquem os comportamentos resultantes, de modo que o projeto de controle seja o mais preciso possível.

O *software* de simulação microscópica usado é o CORSIM, que simula o comportamento de veículos de forma individual. Para que este possa ser usado sem dúvidas, foi necessário verificar se o *software* é capaz de representar os fenômenos que se observam na realidade chamados “fenômeno das duas capacidades” e “efeito de limite de velocidade”.

O primeiro evidencia a queda do fluxo máximo que pode escoar quando este se depara com um congestionamento. Por outro lado, à medida que se reduz a velocidade máxima permitida em um trecho, o fluxo na sua saída diminui e o fluxo na chegada de um trecho adiante também se reduz. O efeito do limite de velocidade é a avaliação da redução de fluxo para diferentes velocidades impostas no primeiro trecho, de forma a se conseguir a retenção mais efetiva para o caso de gargalo iminente, por exemplo.

As simulações realizadas não puderam evidenciar o fenômeno das duas capacidades, enquanto que as simulações envolvendo o efeito de limite de velocidades apresentaram resultados satisfatórios.

Os resultados das simulações para a ponte Cidade Jardim mostraram que a retenção de demanda tem efeito real positivo na tentativa de se evitar um gargalo, consequência de um bloqueio na pista, por exemplo.

Por outro lado, o método ALINEA não apresentou resultados satisfatórios, o que não permitiu que se tirassem conclusões seguras a seu respeito neste projeto, devido às dúvidas em relação ao seu comportamento no *software* e resultados duvidosos.

De qualquer forma, pode-se considerar que este projeto atingiu seus objetivos, mostrando que métodos de controle de tráfego podem melhorar as condições de tráfego e, assim, reduzir o tempo médio de viagem dos motoristas.

6. Referências

1. Carlson, Rodrigo Castelan, et al. Variable Speed Limits as a Mainline Metering Device for Freeways. TRB 2010 Annual Meeting CD-ROM. 2010.
2. Papageorgiou, Markos, Kosmatopoulos, Elias and Papamichail, Ioannis. Effects of Variable Speed Limits on Motorway Traffic Flow. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. 2047, Setembro 15, 2008, pp. 37-48.
3. Papamichail, Ioannis, et al. HERO Coordinated Ramp Metering Implemented at the Monash Freeway. Transportation Research Board Annual Meeting 2010 Paper #10-0760. Janeiro 14, 2010.
4. Smaragdis, Emmanouil and Papageorigou, Markos. Series of New Local Ramp Metering Strategies. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. 1856, Janeiro 29, 2007, pp. 74-86.
5. European Ramp Metering Project. Apresenta projetos de controle de demanda por rampa na Europa. Disponível em: <<http://www.euramp.org>>. Acesso em 16 nov. 2010.
6. Mc Trans – Moving Technology. Apresenta informações sobre órgão Mc Trans e *software* CORSIM. Disponível em: <<http://mctrans.ce.ufl.edu/index.htm>>. Acesso em 16 nov. 2010.
7. Amiach, Marcel. Controle de Tráfego em Sistemas Expressos. Dezembro 10, 2010.

7. Direitos autorais

O autor é o único responsável pelo conteúdo do material incluído no seu trabalho.

TRAFFIC CONTROL ON FREEWAYS

Marcel Amiach

ma.amiach@gmail.com

Abstract. *This document is a project about methods of freeway traffic control developed in order to improve the vehicles flux at the Cidade Jardim bridge, in São Paulo city, Brazil. Different strategies of demand control are analyzed by methods of demand regulation at the freeway accesses (traffic lights at the accesses of the freeway) or demand regulation at the freeway (variable speed limits on links with no traffic lights). Methods that already are implemented on other countries will be tested, through numerical simulations using CORSIM software, for local control, with routines based on historical data or data obtained in real time by traffic sensors. Eventually, new methods of control will be proposed, local or integrated (coordinated control, with more than one access). Control strategies will be evaluated based on a purpose of a better flux of vehicles and, also, on a lower time of travel.*

Keyword: *traffic, control, freeway, traffic jam, variable speed limit (VSL)*