

ESCOLA POLITÉCNICA DA USP



Departamento de Engenharia Mecânica

Departamento de Engenharia de Transportes

## CONTROLE DE TRÁFEGO EM SISTEMAS EXPRESSOS

Autor: Marcel Amiach

Orientador: Prof. Dr. Hugo Pietrantonio (PTR)

Responsável: Prof. Dr. Alberto Hernandez Neto (PME)

São Paulo

10/12/2010

## FICHA CATALOGRÁFICA

**Amiach, Marcel**

**Controle de tráfego em sistemas expressos / M. Amiach. --  
São Paulo, 2010.  
p. 121**

**Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade  
de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica.**

**1. Controle de tráfego 2. Engenharia de tráfego 3. Veículos  
(Controle; Fluxo) 4. Congestionamentos 5. Simulação de siste-  
mas I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departa-  
mento de Engenharia Mecânica II. t.**

## SUMÁRIO

FICHA CATALOGRÁFICA.....	2
ÍNDICE DE FIGURAS .....	6
ÍNDICE DE TABELAS.....	7
1. Introdução.....	9
2. Resumo do Projeto .....	10
3. Metodologia e Ferramentas de Estudo .....	11
4. Estratégias de Controle de Tráfego .....	12
4.1. Regulação de Demanda por Controle de Rampa Local .....	12
4.1.1. Estratégias de Controle de Rampa Local.....	14
4.1.1.1. Estratégia DC.....	14
4.1.1.2. ALINEA .....	17
4.1.2. Simulações de Controle Local – ALINEA .....	19
4.1.2.1. Entrada.....	19
4.1.2.2. Resultados.....	22
4.1.2.3. Análise de Resultados.....	24
4.1.2.4. Conclusão .....	26
4.2. Regulação de Demanda por Controle de Rampa Coordenado.....	27
4.2.1. O Sistema de Controle Coordenado HERO.....	28
4.2.2. Exemplo de Atuação do HERO .....	30

4.2.3. Análise da Atuação do HERO .....	33
4.3. Controle Seletivo de Velocidade.....	34
4.3.1. Avaliação do Impacto do Controle Seletivo numa Via Principal .....	37
4.3.2. Análise da Avaliação do Controle Seletivo de Velocidades.....	40
4.4. Análise das Estratégias Propostas .....	41
5. Verificação do Software .....	43
5.1. Conceito de “carro-seguidor” .....	43
5.2. Calibração de Parâmetros.....	50
5.3. Preparação da rede para verificação do CORSIM .....	51
5.4. Parâmetros das Simulações .....	53
5.5. Resultados e Comentários .....	58
5.6. Análise de Resultados .....	76
5.7. Conclusões .....	77
6. Criação da malha de estudo .....	78
6.1. Obtenção de Dados .....	80
6.2. Análise de Dados.....	82
6.3. Resultados de Simulação.....	85
6.4. Análise de Resultados .....	95
6.5. Conclusões .....	104
7. Conclusão .....	106

8.	Anexo .....	109
8.1.	Caso 1 .....	109
8.2.	Caso 4.....	113
8.3.	Caso 9.....	117
9.	Referências Bibliográficas.....	121

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 4-1: Esquema do objeto de estudo (laço aberto) .....	16
Figura 4-2: Esquema do objeto de estudo (laço fechado).....	18
Figura 4-3: (a) Esquema do local de estudo; (b) Perfil de demanda de veículos .....	20
Figura 4-4: Resultados da simulação de controle pelo sistema ALINEA .....	22
Figura 4-5: Via Monash, na Austrália .....	30
Figura 4-6: Gráficos das filas das rampas do circuito coordenado de Melbourne .....	31
Figura 4-7: Mudança do diagrama fundamental devido ao controle seletivo.....	35
Figura 5-1: gráficos de velocidade em função da distância de um veículo até seu líder (a) em uma via expressa em Orlando, Flórida, (b) no túnel Holland em Nova Iorque, (c) em uma via arterial no Reino Unido .....	45
Figura 5-2: ilustração da interface gráfico do software CORSIM.....	52
Figura 5-3: Malha de simulação gerada pelo software CORSIM.....	52
Figura 6-1: Representação do objeto de estudo no ambiente do software CORSIM .....	78
Figura 6-2: Imagem capturada de um dos vídeos gravados - trecho anterior à ponte ....	80
Figura 6-3: Imagem capturada de um dos vídeos gravados – trecho posterior à ponte..	81
Figura 6-4: Reprodução de parte da malha durante simulação com indicação de trechos de estudo e seções de controle .....	85
Figura 6-5: Ilustração de um incidente na pista expressa .....	96
Figura 6-6: Ilustração de um incidente na pista expressa .....	100

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 4-1: Fluxo de veículos resultante devido ao controle seletivo de velocidades (dias limpos) – Fonte: [4].....	38
Tabela 5-1: Condições da segunda simulação .....	55
Tabela 5-2: Fator de sensibilidade do condutor para a primeira simulação realizada....	55
Tabela 5-3: Parâmetros utilizados na segunda simulação .....	56
Tabela 5-4: Resumo dos parâmetros e condições utilizados nas simulações .....	57
Tabela 5-5: Dados da primeira simulação - Velocidade de gargalo: 100 km/h.....	58
Tabela 5-6: Dados da primeira simulação - Velocidade de gargalo: 80 km/h.....	60
Tabela 5-7: Dados da primeira simulação - Velocidade de gargalo: 60 km/h.....	62
Tabela 5-8: Dados da primeira simulação - Velocidade de gargalo: 40 km/h.....	64
Tabela 5-9: Dados da segunda simulação - 1º caso .....	66
Tabela 5-10: Dados da segunda simulação - 2º caso .....	68
Tabela 5-11: Dados da segunda simulação - 3º caso .....	70
Tabela 5-12: Dados da segunda simulação - 4º caso .....	72
Tabela 5-13: Dados da segunda simulação - 5º caso .....	74
Tabela 6-1: Tabela de dados obtidos em campo.....	81
Tabela 6-2: Resultados das simulações para a região anterior à bifurcação.....	88
Tabela 6-3: Resultados das simulações para a região da pista expressa.....	89
Tabela 6-4: Resultados das simulações para a região da pista local.....	90

Tabela 6-5: Resultados das simulações para a região do entrelaçamento .....	91
Tabela 6-6: Resultados das simulações para a região da rampa .....	92
Tabela 6-7: Resultados das simulações para a região da ponte .....	93
Tabela 6-8: Dados comparativos para os casos mais relevantes .....	103

## 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.

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.

A seguir, são apresentadas as justificativas para a aplicação de estratégias mencionadas e os algoritmos de controle que vêm sendo propostos.

## 2. RESUMO DO PROJETO

O projeto descrito nesse documento está inserido no campo de Engenharia de Tráfego. 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 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).

O fato da via estar controlada pode fazer com que motoristas alterem suas rotas e passem a usar vias arteriais, bem como o contrário, pode fazer com que mais motoristas passem a usar a via controlada, aumentando seu congestionamento e aliviando as vias arteriais. Assim, é importante avaliar o tempo de viagem utilizando-se a via expressa controlada. No entanto, este comportamento reativo não será considerado nas simulações a seguir.

### 3. METODOLOGIA E FERRAMENTAS DE ESTUDO

O estudo do tráfego pode ser realizado a partir de conceitos macroscópicos similares aos estudados em mecânica dos fluidos (vazões de entrada e de saída e densidades) ou microscópicos, que representam o comportamento individual dos veículos. Fazendo-se uma representação discreta para esses fenômenos, é possível criar estratégias iterativas que, aliadas a sistemas de controle, permitam reduzir o tempo de viagem dos motoristas.

Inicialmente, serão estudados modelos que consideram um controle de tráfego local, ou seja, modelos que levam em conta apenas cada rampa independente com trechos adjacentes à via principal. 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.

Um estudo efetivo requer a implementação destes modelos e uma posterior análise dos resultados obtidos. O estudo será realizado a partir de um software de simulação do tipo microscópico, chamado *CORSIM*, que simula e pode mostrar o comportamento de cada veículo na via em estudo, a partir de diversos parâmetros de simulação, como, por exemplo, a separação mínima entre veículos e a aceleração máxima que um veículo pode desenvolver enquanto segue um veículo à sua frente.

Como não é conhecida a relação explícita entre os parâmetros microscópicos e macroscópicos, é necessário verificar que o software utilizado representa adequadamente o que se espera observar na realidade. Dentro das estratégias clássicas que serão abordadas adiante, estes são os chamados “fenômenos das duas capacidades” e “efeito de retenção dos limites de velocidade”.

A seguir, serão descritos os métodos de controle que poderão ser empregados no estudo do problema, bem como os resultados obtidos desses estudos. Também, será descrito o resultado da verificação do software e o modelo básico definido para a área de estudo considerada no trabalho.

## 4. ESTRATÉGIAS DE CONTROLE DE TRÁFEGO

O objetivo principal de qualquer medida que vise um melhor comportamento do trânsito é reduzir o tempo de viagem de todos os motoristas que utilizam um determinado trecho.

O controle de demanda nos acessos às vias expressas, para a redução do tempo de viagem, incluindo eventuais pequenos congestionamentos nas rampas de acesso, é bastante estudado. Esse é um preço a pagar para que todos os motoristas sejam beneficiados. Mas, entretanto, Papageorgiou e Apostolos [1, p.271] consideraram também a seleção do método de controle mais eficiente.

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 e a estratégia de controle é o que será discutido a partir de agora.

A seguir, tem-se a caracterização de estratégias de controle por rampas, em modo local ou coordenado, e de controle seletivo de velocidade.

### 4.1. Regulação de Demanda por Controle de Rampa Local

Considerando o controle isolado através de uma rampa apenas, existem diversas formas de abordar este problema. As mais conhecidas estratégias são as chamadas DC (Demand-Capacity), e “ALINEA”.

A primeira é um sistema de controle em laço aberto (*open loop*), já que é implementada baseada apenas em dados à montante (antes) da rampa. Estes dados podem ser de fluxo

e ocupância. Por outro lado, ALINEA é um sistema de controle em laço fechado (*closed loop*), já que se baseia em dados à jusante (depois) da rampa.

A estratégia DC pode ser implementada com controle baseado em dados históricos. No entanto, em sistemas mais modernos, a disponibilidade de sensores de tráfego permite implementar um controle mais dinâmico. Com isso, ajusta-se o controle em tempo real a partir dos resultados obtidos na iteração anterior.

Na prática, de acordo com Papageorgiou e Smaragdis [2, p. 74] 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.

Serão discutidas, a seguir, as estratégias DC e ALINEA.

### 4.1.1. Estratégias de Controle de Rampa Local

A seguir serão discutidas as estratégias de controle citadas acima, DC e ALINEA.

#### 4.1.1.1. Estratégia DC

Este primeiro método de controle se baseia na seguinte equação:

$$r(t) = \begin{cases} q_{cap} - q_{in}(t-1), & \text{se } o_{in}(t-1) \leq o_{cr} \\ r_{min}, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

Para este equação, têm-se:

- $t = 1, 2, \dots$  = índice do tempo discreto (períodos de tempo tipicamente da ordem de segundos)
- $r(t)$  = fluxo de veículos na rampa ( $v/h$ ) que será liberado no instante  $t$
- $q_{in}(t-1)$  = último fluxo de entrada medido na via antes da rampa
- $o_{in}(t-1)$  = última ocupância de entrada medida na via antes da rampa
- $q_{cap}$  = fluxo máximo capaz de transitar pela via após a rampa
- $r_{min}$  = mínimo fluxo admissível na rampa
- $o_{cr}$  = ocupância crítica depois da rampa (valor para o qual o fluxo de veículos é máximo)

É interessante notar que a expressão dada acima para  $r(t)$  é função de  $q_{in}(t-1)$  e não de  $q_{in}(t)$ . O fluxo que deve escoar pela rampa no instante cujo índice é  $t$  está relacionado ao fluxo de entrada na via no instante anterior ao atual, cujo índice é  $t-1$ . Isso se deve ao fato de o fluxo no mesmo intervalo de tempo não ser conhecido enquanto este não se encerra.

Para se obter precisão maior no controle do tráfego, talvez fosse interessante uma expressão que levasse em conta medidas no mesmo instante de tempo, ou seja, algo como  $r(t) = q_{cap} - q_{in}(t)$ . Porém, a obtenção de uma expressão que relate  $q_{in}(t)$  com  $q_{in}(t-1)$  e até com  $q_{in}(t-2)$  poderia levar a erros consideráveis se fosse

proposto algo geral. A maneira como o fluxo se comporta pode ser função de muitas variáveis, como do dia, do horário, do tempo, entre outras.

Dessa forma, uma maneira de melhorar a precisão do sistema seria tentar reduzir ao máximo o intervalo de tempo entre cada atualização de cálculos.

Ocupância é uma medida relacionada à densidade de veículos na via e representa a parcela de tempo em que os detectores da pista estão ocupados.

Calcula-se a ocupância como  $O = T_o/T$ , sendo  $T_o$  o tempo em que o detector está ocupado. Na realidade,  $T_o$  é a soma de  $T_{o_i} = (l_i + l_d)/v_i$ , sendo  $l_i$  e  $v_i$  o comprimento e a velocidade do veículo  $i$ , respectivamente, e  $l_d$  o comprimento do detector.

Considerando comprimento e velocidade constantes para os veículos de um dado trecho, pode-se simplificar essa expressão para

$$O = \frac{Q}{V} \frac{(l_v + l_d)}{1000} = K \frac{(l_v + l_d)}{1000}$$

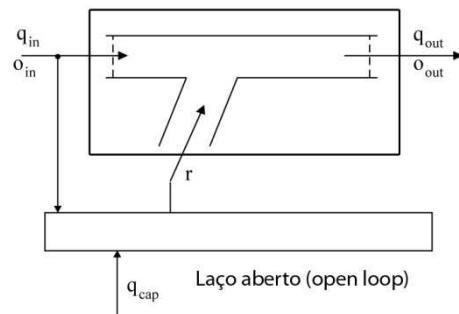
sendo:

- $O$ : ocupância para o trecho em questão (%)
- $Q$ : fluxo de veículos para o trecho em questão ( $v/h$ )
- $V$ : velocidade média dos veículos para o trecho em questão ( $km/h$ )
- $l_v$ : comprimento médio dos veículos para o trecho em questão ( $m$ )
- $K$ : densidade de veículos para o trecho em questão ( $v/km$ )

Como exemplo, calculando-se a ocupância para um trecho em que se tem  $V = 100 km/h$  e  $Q = 1000 v/h/f$  e considerando  $l_d = 2 m$  e  $l_v = 8 m$ , tem-se  $O = 10\%$ .

O termo  $Q/V$  representa a densidade  $K$  da via. Já o termo  $(l_d + l_v)/1000$  representa um fator de ajuste entre a densidade e ocupância.

A Figura 4-1 abaixo mostra as grandezas utilizadas neste desenvolvimento.



**Figura 4-1: Esquema do objeto de estudo (laço aberto)**

Este sistema de controle visa manter a soma do fluxo de entrada no trecho expresso com o fluxo que entra pela rampa sempre menor ou igual ao fluxo máximo capaz de transitar pelo trecho em questão. Esse fluxo máximo é a capacidade de tráfego, resultado de avaliações ao longo de grande período de tempo, o que representa uma determinação histórica.

O objetivo do controle é evitar que a seção à jusante fique congestionada tentando-se garantir  $q_{out} \leq q_{cap}$ . No entanto,  $q_{out}$  não é medido, por isso o laço de controle é chamado de aberto (*open loop*). Esta estratégia de controle é também chamada de *feedforward* (de alimentação para frente ou, segundo alguns autores, realimentação positiva).

A estratégia de fluxo mínimo é ativada quando o objetivo do controle falhou e o congestionamento não for evitado, de forma a atender de forma mínima o ramal de acesso e, desta forma, favorecer a recuperação da situação de congestionamento.

#### 4.1.1.2. ALINEA

O sistema ALINEA é um método de controle dado pela expressão

$$r(t) = \begin{cases} r(t-1) + K_R[\hat{o} - o_{out}(t-1)], & \text{se } r_{min} < r < r_{max} \\ r(t-1), & \text{caso contrário} \end{cases}$$

sendo

- $t = 1, 2, \dots$  = índice do tempo discreto (períodos de tempo também da ordem de segundos)
- $r(t)$  = fluxo de veículos na rampa ( $v/h$ ) que será liberado no instante  $t$
- $r(t-1)$  = fluxo de veículos na rampa ( $v/h$ ) que foi liberado no instante  $t-1$
- $o_{out}(t-1)$  = ocupância medida a jusante da rampa no instante  $t-1$
- $\hat{o}$  = ocupância de referência para o controle
- $K_R$  = parâmetro de regulação da rampa

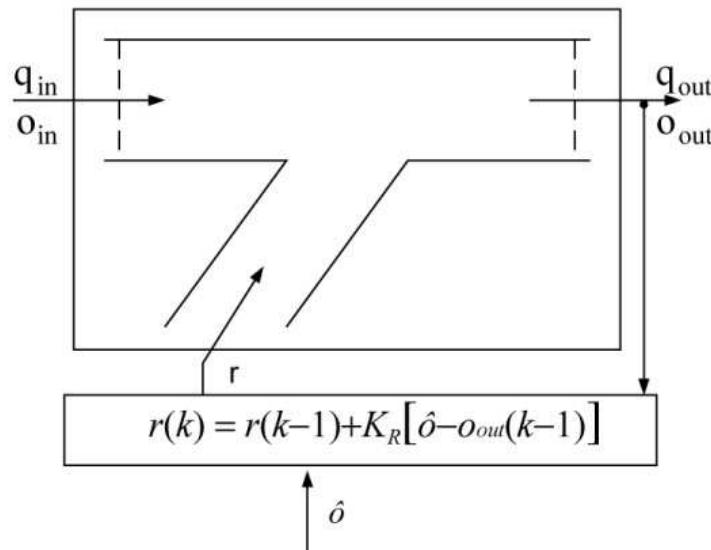
O termo  $K_R$  é um parâmetro regulador e  $\hat{o}$  é um valor desejável para a ocupância após a rampa. Tipicamente, mas não necessariamente, usa-se  $\hat{o} = o_{cr}$ . Dessa forma, aproxima-se  $q_{out}$  de  $q_{cap}$ . Caso o valor calculado de  $r(t)$  fique fora do intervalo  $[r_{min}; r_{max}]$ , adota-se o valor usado no passo anterior para que o ramo não fique prejudicado. Esta estratégia alternativa é ativada quando o objetivo do controle falhou (esta diferença é secundária e não altera a essência dos métodos em discussão).

É importante notar que o método ALINEA, se comparado às estratégias de controle clássicas, pode ser classificado como proporcional (P). De forma geral, uma estratégia deste tipo se caracteriza por uma formulação como a que segue [7]:

$$\beta(k) = \beta(k-1) + K_P[\alpha(k) - \alpha(k-1)]$$

sendo  $K_P$  o ganho proporcional. Os valores de  $\beta(k)$  resultantes da equação acima são truncados caso ultrapassem a região admissível  $[\beta_{min}; \beta_{max}]$ . No caso do ALINEA,  $\alpha(k)$  é um valor constante, de referência.

A Figura 4-2 mostra o esquema do ALINEA.



**Figura 4-2: Esquema do objeto de estudo (laço fechado)**

Mais uma vez, o objetivo do controle é tentar garantir um fluxo de saída adequado, sempre menor ou igual ao caracterizado por  $\hat{o}$ . No caso de  $\hat{o} = o_{cr}$ , tem-se que  $q_{out} = q_{cap}$ , como na estratégia DC. No entanto, agora a ocupância de saída é medida. Diz-se, então, que se trata de um laço de controle fechado (*closed loop*). Esta estratégia de controle é também chamada de *feedback* (de alimentação para trás ou, segundo alguns autores, realimentação negativa).

Neste caso, utiliza-se  $\hat{o}$  para identificar a capacidade da via. Assim, ele pode ser calculado da seguinte forma:

$$\hat{o} = \frac{Q_c}{V_c} (l_d + l_v)$$

sendo:

- $Q_c$ : capacidade da via
- $V_c$ : velocidade na situação de máximo fluxo

#### **4.1.2. Simulações de Controle Local – ALINEA**

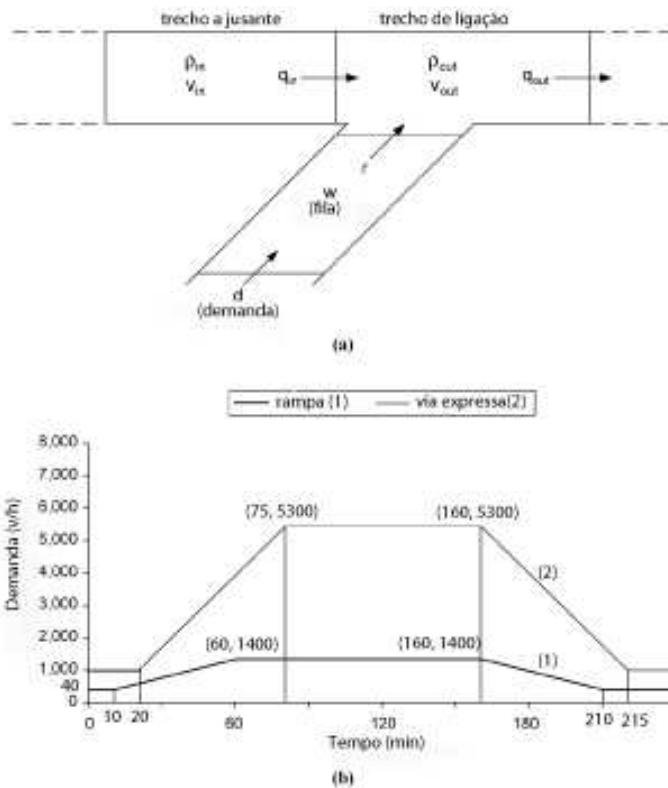
De acordo com Smaragdis e Papageorgiou [2, p.76], a comparação dos dois sistemas de controle descritos anteriormente, feita a partir de avaliações em vários países da Europa, revelou que o ALINEA é claramente superior ao DC.

Para demonstrar a eficiência do ALINEA, simulações de controle foram realizadas e seus resultados estão a seguir descritos.

##### **4.1.2.1. Entrada**

Para realizar simulações e verificar a efetividade dos projetos de controle, são necessárias entradas que, neste caso, serão demandas na via e na rampa. Os sistemas de controle deverão tratar esta entrada para que, assim, sejam obtidos melhores resultados quanto à ocupância (em %), fluxo de veículos (em v/h), velocidade e tempo de viagem resultantes.

A Figura 4-3(a) abaixo mostra um diagrama do objeto de estudo. A Figura 4-3(b) é a entrada que será usada para se obter todos os resultados que seguirão.



**Figura 4-3: (a) Esquema do local de estudo; (b) Perfil de demanda de veículos**

Na rampa, partindo-se de  $t = 0$  e de uma demanda na rampa de cerca de  $400 \text{ v}/\text{h}$ , a partir de aproximadamente  $t = 10 \text{ min}$ , esta demanda aumenta linearmente até que atinja um valor de  $1400 \text{ v}/\text{h}$  em  $t = 60 \text{ min}$ . Esta demanda se mantém até  $t = 160 \text{ min}$ , quando se reduz para, novamente,  $400 \text{ v}/\text{h}$ , de forma linear, entre  $t = 160 \text{ min}$  e  $t = 210 \text{ min}$ , mantendo-se então constante.

Para a demanda da via principal, tem-se uma demanda inicial de  $1000 \text{ v}/\text{h}$ , quando, em  $t = 20 \text{ min}$ , esta demanda cresce linearmente até cerca de  $5300 \text{ v}/\text{h}$  em  $t = 75 \text{ min}$ . Esta demanda se mantém constante até  $t = 160 \text{ min}$ , quando se reduz para  $1000 \text{ v}/\text{h}$  em  $t = 215 \text{ min}$ . A partir deste momento, a demanda na via se mantém constante.

Existem certos parâmetros adotados para estas simulações. Para a via, têm-se um fluxo máximo de veículos de  $6000 \text{ v}/\text{h}$  com uma densidade de  $40 \text{ v}/\text{km}/f$ , que correspondem à capacidade normal da via. Para a rampa, usam-se valores de  $r_{max} = 1600 \text{ v}/\text{h}$  e  $r_{min} = 400 \text{ v}/\text{h}$ . Além disso, usou-se como ocupância crítica  $\hat{o} =$

$37,5 v/km/f$ . Na situação de dissipação de fluxo a partir de filas (formadas por um congestionamento que não tenha sido evitado), admite-se que ocorre o fenômeno das duas capacidades, e o fluxo máximo escoado reduz-se para  $5500 v/h$ , que corresponde ao chamado fluxo de saturação.

Note que a soma das demandas máximas na via principal e no ramal de acesso supera a capacidade de tráfego da via. Na ausência de controle, o congestionamento ocorrerá e o fenômeno das duas capacidade produzirá uma redução do fluxo escoado, mesmo sem qualquer outra interferência ou restrição adiante.

Os exemplos a seguir mostram os efeitos decorrentes. As simulações serão realizadas de dois modos diferentes. Uma determinística, ou seja, com entradas muito bem definidas quanto a valores. Num outro momento, serão simulados casos com entradas estocásticas, ou seja, entradas com ruídos e distúrbios que possam prejudicar o sistema de controle.

#### 4.1.2.2. Resultados

O resultado obtido na Figura 4-4 abaixo é o da simulação com o controle ALINEA e sem controle.

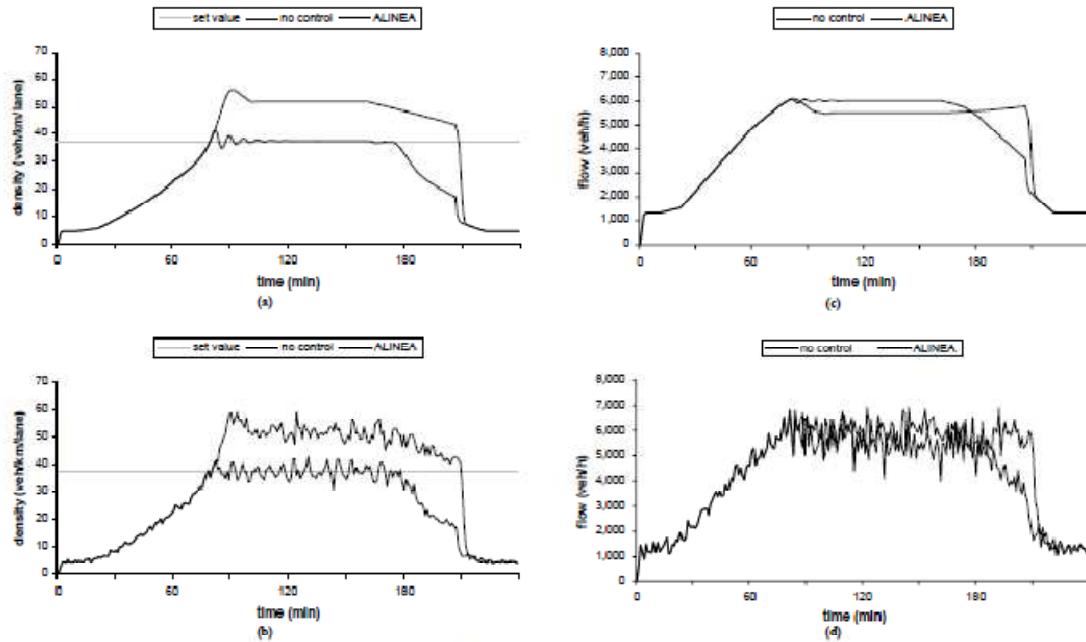


FIGURE 3 ALINEA versus no-control results: downstream traffic density  $\rho_{\text{out}}(t)$ , (a) deterministic scenario, (b) stochastic scenario; downstream traffic volume  $q_{\text{out}}(t)$ , (c) deterministic scenario, (d) stochastic scenario.

**Figura 4-4: Resultados da simulação de controle pelo sistema ALINEA**

Os gráficos 4-4a) e 4-4c) representam os resultados para as entradas determinísticas e mostram, como saída, densidade de veículos (v/km/f) e fluxo de veículos (v/h).

Nesse caso, obtiveram-se aumentos da ocupância e do fluxo de veículos até cerca de  $t = 75 \text{ min}$ .

No gráfico 4-4a), , para o caso controlado (ALINEA), a densidade aumentou até pouco mais de  $o = 37,5 \text{ v/km/f}$ , reduzindo-se então e oscilando em torno deste valor até cerca de  $t = 180 \text{ min}$ . A partir deste instante, a ocupância local só diminuiu. No caso não controlado, esse valor aumentou até  $o = 55 \text{ v/km/f}$  e depois reduziu levemente, estabilizando-se em  $o = 50 \text{ v/km /f}$  até cerca de  $t = 160 \text{ min}$ . Entre este instante e  $t = 210 \text{ min}$ , esta ocupância cai linearmente e levemente para um valor próximo de  $o = 40 \text{ v/km/f}$ . Após este instante, a ocupância cai drasticamente.

No gráfico 4-4c), no caso controlado, pôde-se observar que o fluxo de saída corresponde ao fluxo máximo na via,  $q = 6000 \text{ v/h}$ . Já no caso não controlado, tendo-se um fluxo de entrada total de  $q = 6700 \text{ v/h}$ , observa-se um fluxo de saída de  $s = 5500 \text{ v/h}$ .

Os gráficos 4-4b) e 4-4d), cujas entradas são estocásticas, mostraram comportamentos semelhantes, apesar das oscilações por causa dos ruídos. Isto mostra que a estratégia de controle é robusta às flutuações representadas (um aspecto prático essencial).

#### **4.1.2.3. Análise de Resultados**

Os resultados anteriores mostraram que, no caso não controlado, por saturação da via principal, a capacidade de escoamento se reduziu de  $v = 6000 \text{ v/h}$  para  $s = 5500 \text{ v/h}$ . Já no caso controlado, há formação de fila na rampa, com cerca de  $700 \text{ v/h}$ , mas a capacidade da via principal se manteve em torno do valor admitido como real, que é obtido a partir de medidas históricas.

Esse fenômeno de retenção de fluxo é o chamado “fenômeno das duas capacidades”, que representa uma queda do fluxo máximo que escoa num gargalo, que decorre da formação de fila no trecho anterior ao gargalo, que é resultado da falta de capacidade do próprio gargalo.

Por exemplo, o fluxo que sai de um gargalo, sem impedimento adiante, deve chegar a um máximo de cerca de 2100 ou 2200 veículos por hora por faixa nos casos em que não há fila antes do gargalo. A estratégia de controle tem o objetivo de manter este escoamento máximo, evitando a formação de filas.

Com demandas maiores, na ausência ou falha do controle que levarão à formação de filas, o fluxo na saída do gargalo cai para 2000 veículos por hora por faixa. Sem outras interferências, durante o período em que a via estiver saturada, o fluxo deve manter-se em 2000 veículos por hora por faixa, pois haverá mais fila antes do gargalo. Houve uma perda de eficiência de escoamento decorrente do aumento de demanda que causou a saturação da via.

Como dito anteriormente, existem diversas variações do projeto ALINEA, que levam em conta o tipo de dados disponíveis para tratamento, se estes são a jusante ou a montante.

Apesar destas diferenças, todas as variações do projeto ALINEA mostram resultados semelhantes e equivalentes, o que quer dizer que a idéia deste projeto é realmente efetiva, mas que deve ser adaptada para cada situação e para cada tipo de dado disponível.

A restrição para sua aplicação é o efeito das filas acumuladas nos ramais de acesso onde não é possível atender a demanda existente para viabilizar o objetivo do controle (evitar a saturação do gargalo de capacidade na via). A eficácia do controle pode ser ampliada pela sua extensão aos ramais de acesso anteriores e implantação de uma lógica coordenada, discutida adiante.

Em sistemas com maior demanda, pode haver a necessidade de controlar o fluxo nos trechos expressos anteriores para viabilizar o objetivo de evitar a saturação do gargalo de capacidade da via (adiante), melhorando sua condição de operação.

O controle por semáforos nas vias principais seria normalmente prejudicial. Já o efeito de limite de velocidade evidencia que estes fluxos na saída antes do gargalo irão diminuir, adiando sua saturação. Este efeito permite controlar a demanda em trechos de fluxo contínuo, sem introduzir semáforos e interrupções de tráfego, como também discutido adiante.

#### **4.1.2.4. Conclusão**

Dos resultados mostrados anteriormente, foi possível 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.

Por isso, 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.

## 4.2. Regulação de Demanda por Controle de Rampa Coordenado

O controle de demanda de veículos tem por objetivo melhorar as condições do trânsito a partir de uma efetiva regulação da injeção de veículos da rampa de acesso para a via principal. Este tipo de controle é baseado em medidas em tempo real a partir de sensores instalados na via em questão.

Pode-se realizar este controle agindo em uma única rampa. As estratégias então utilizadas são, basicamente, *DC* e *ALINEA*. A primeira é um exemplo de controle em laço aberto, ou seja, utilizam-se dados a montante (fluxo e ocupância, respectivamente), tratados como perturbações, para realizar o controle, que visa rejeitar essas perturbações. Já o *ALINEA* é um sistema com realimentação negativa, que utiliza dados a jusante (ocupância) para realizar o controle.

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.

No desenvolvimento de métodos de controle coordenados, algumas características são desejáveis em qualquer situação. Segundo Papamichail et al. [3, p.3], estas características são:

- Devem envolver algoritmos baseados em realimentação negativa de forma a reduzir a sensibilidade a perturbações não previstas.
- Devem possuir ação reativa, de modo que não sejam necessários modelos de interação em tempo real nem previsão de perturbações.
- Devem apresentar alta eficiência de métodos de controle ótimo sofisticados.
- Devem ser genéricos, de modo a não necessitar de calibração prévia em cada implantação realizada.

A seguir, é descrito um sistema de controle coordenado proposto para Melbourne, Austrália, como evolução da estratégia local de controle *ALINEA*.

#### 4.2.1. O Sistema de Controle Coordenado HERO

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, em tempo real, de sensores, 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.

É importante notar que 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 [3, p.2].

A partir dessa observação, foi criado o sistema HERO, que pode ser descrito da seguinte forma.

- HERO identifica os potenciais gargalos na via principal.
- O controle coordenado consiste em solicitar a algumas rampas à montante que trabalhem para a rampa à montante deste gargalo de modo a evitar seu congestionamento.
- Quando esta fila estiver suficientemente pequena, a malha de rampas coordenadas é dissolvida.

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 à montante.

Considerando um congestionamento iminente, os veículos que seriam responsáveis pelo início do congestionamento são aqueles que aumentariam o fluxo na via principal, incluindo aqueles que acessariam a via por alguma rampa semafORIZADA. Estes veículos

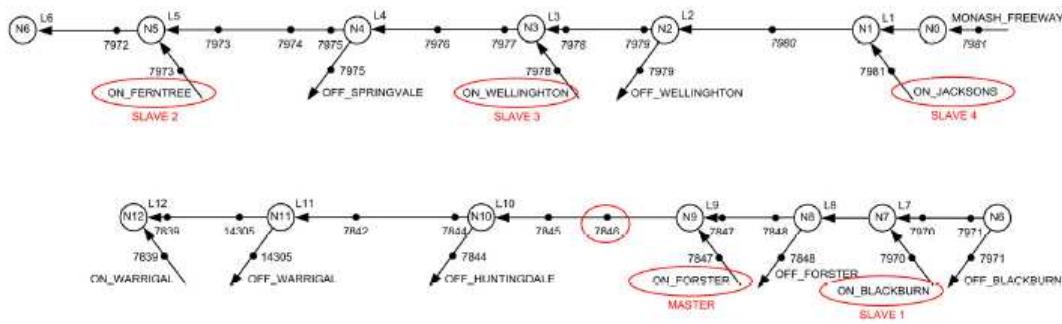
devem ser bloqueados em tempo hábil. Esse bloqueio é feito pela rampa à montante da rampa adjacente a esse gargalo, já que a própria rampa adjacente já realiza um controle local e sua restrição de fila máxima pode ser insuficiente para evitar o congestionamento. Caso o tempo de identificação do gargalo seja insuficiente, esses veículos 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.

A seguir, é apresentada uma aplicação do sistema HERO de controle, instalado na Austrália. Esta aplicação permite um melhor entendimento dos critérios de recrutamento de rampas do HERO na prática.

#### 4.2.2. Exemplo de Atuação do HERO

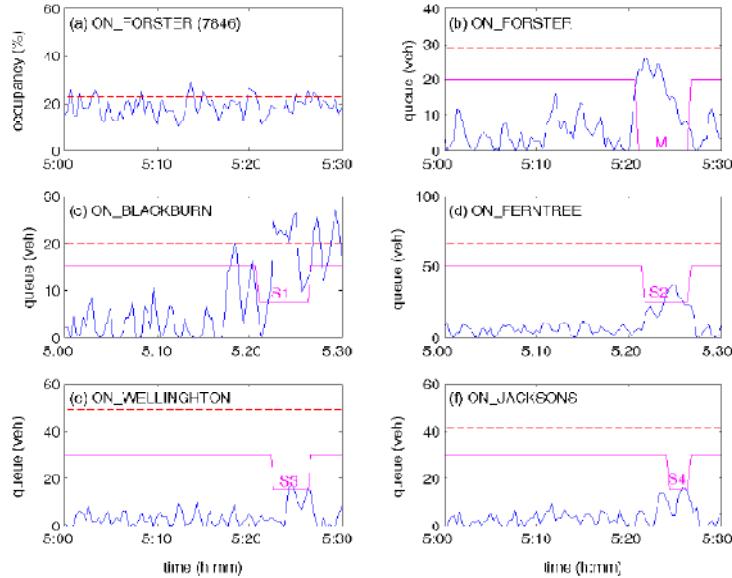
O sistema de controle coordenado foi implementado em Melbourne, na Austrália, no ano 2008. A seguir, será descrito o procedimento de ativação do HERO com dados de Melbourne de março de 2008, em horário de pico [3, p.5].

Parte da via Monash, na Austrália, pode ser observada na Figura 4-5 abaixo.



**Figura 4-5: Via Monash, na Austrália**

As rampas cujos nomes estão marcados em vermelho na Figura 4-5 acima têm, na Figura 4-6 abaixo, um gráfico de quantidade de veículos nas suas filas em função do tempo.



**Figura 4-6: Gráficos das filas das rampas do circuito coordenado de Melbourne**

A Figura 4-6 mostra o funcionamento do HERO em Melbourne, Austrália, no período de pico das 17h00 até as 17h30 do dia 28/03/2008.

Um gargalo iminente foi detectado a jusante da rampa ON\_FORSTER pelo detector 7846. Esta região está marcada em vermelho na Figura 4-6 acima, entre os pontos “N9” e “N10”. Às 17h21, foi detectado que a fila na rampa ON\_FORSTER (Figura 4-6b) estava crescente, chegando a um nível próximo do seu limite estabelecido, indicado pela linha tracejada laranja. Nesse momento, o HERO assume que o controle local desta rampa e a restrição de fila máxima não serão suficientes para conter esse congestionamento. Assim, a primeira rampa a montante, ON\_BLACKBURN, é recrutada para conter o fluxo de veículos na via principal. Esta rampa é definida como “escrava 1” (S1) e a rampa ON\_FORSTER é definida como “mestre” (M).

Mesmo com a ativação do HERO, o controle coordenado das duas rampas, M e S1, o gargalo persiste. Assim, rampas a montante de S1 são recrutadas para ajudar na extinção do gargalo. A rampa ON\_FERNTREE foi a segunda rampa escrava a ser recrutada (S2), o que ocorreu pouco tempo depois do recrutamento de S1. Em instantes posteriores, as rampas ON WELLINGTON e ON JACKSONS foram recrutadas também, respectivamente S3 e S4.

Nota-se que às 17h27, o gargalo já estava controlado e a malha de rampas criada foi dissolvida.

É importante notar que os recrutamentos de rampas escravas não são feitos apenas baseados nas filas das rampas, mas no risco conjunto de que o controle local do gargalo e de que o controle de filas máximas não sejam suficientes para conter o congestionamento.

#### 4.2.3. Análise da Atuação do HERO

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

Este exemplo 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.

Hoje, a via inteira Monash, de 75 km de extensão, está sendo incorporada ao sistema HERO.

A descrição de Papamichail et al. [3] deixou, entretanto, alguns aspectos sem discussão. O recrutamento de rampas é claramente exposto, mas não é discutido como fixar os parâmetros de controle (como  $\hat{\alpha}$  no controle ALINEA), de forma a produzir o alívio dos trechos adiante.

Deve-se esperar que o ajuste dos parâmetros (*fine tuning*) seja bastante mais complexo ou tenha de ser decidido de forma específica (pelas características de cada evento). Por este motivo, o uso de estratégias com base teórica mais firme (como o controle ótimo) pode ser um componente essencial de estratégias de controle coordenado.

### 4.3. 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.

Esse procedimento faz com que se reduza a velocidade média em situações em que a densidade é menor do que a crítica e com que se homogeneízem as velocidades, ou seja, ele reduz as diferenças de velocidade entre os veículos e a diferença de velocidades médias entre as faixas. A estratégia baseia-se na redução de fluxo que isso pode gerar como forma de contribuir para aliviar gargalos adiante, sem semáforos.

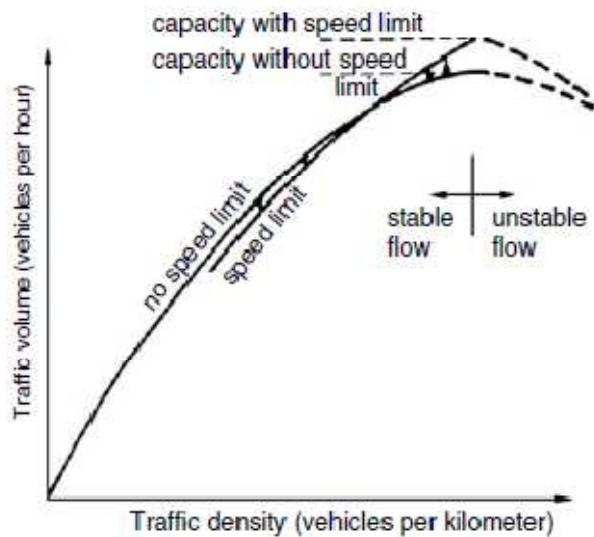
De acordo com Papageorgiou et al.[4, p.37; 5, p.3], em geral, um dos principais efeitos da instalação deste tipo de controle é o aumento da segurança viária, já que observou-se que o número de acidentes em vias dotadas deste tipo de dispositivo caiu consideravelmente.

Mas, ainda assim, deseja-se que o limite de velocidade variável possa melhorar o fluxo de veículos, ou seja, que os tempos de viagem se reduzam com a implantação desse sistema. Este é um efeito não comprovado em campo.

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 em um trecho posterior (potencial gargalo), o que atrasa a formação efetiva deste gargalo.

Caso esta redução de velocidade não seja efetuada, o fluxo no trecho anterior ao gargalo não poderá ser alterado, mas haverá perda de capacidade no gargalo. Caso seja efetuada a redução, o fluxo neste trecho será reduzido, mas o fluxo no gargalo não seria alterado.

Neste caso, o controle seletivo de velocidade seria aplicado como estratégia de retenção de demanda em trechos da via principal anteriores ao gargalo. Assim, seria possível aumentar a eficiência do sistema como um todo, mesmo que seja necessário reduzir o fluxo antes do gargalo [4, p.39; 5, p.6].



**Figura 4-7: Mudança do diagrama fundamental devido ao controle seletivo**  
Fonte: [4, p.39]

A Figura 4-7 acima evidencia o fato de que só há efeito positivo desse tipo de controle para baixas densidades. O gráfico mostra que o fluxo máximo é maior do que no caso sem controle seletivo se este for aplicado antes do ponto em que há fluxo máximo na situação sem controle. Este seria o efeito de homogeneização de velocidades citado anteriormente.

Para o estudo de controle seletivo de velocidade, faz-se a seguinte definição.

$$b = \frac{v_{VSL}}{v_{\bar{VSL}}}$$

sendo  $v_{VSL}$  a velocidade livre da via com controle seletivo aplicado e  $v_{\bar{VSL}}$  a velocidade livre da via sem controle seletivo aplicado.

Assim sendo,  $b = 1$  é referente ao caso em que não há controle seletivo de velocidade.

Quanto a este tipo de controle, as seguintes perguntas são essenciais para o desenvolvimento do estudo.

- O controle seletivo de velocidade pode ser implementado numa estratégia de retenção de demanda na via principal?
- Há algum ganho adicional de capacidade? Como obtê-lo?

Este segundo aspecto foi o mais detalhadamente discutido em Papageorgiou et al. [4, p.39], onde foram formuladas as seguintes questões adicionais:

- Onde se localiza o ponto de encontro (se é que ele existe) em relação ao ponto de ocupância crítica do diagrama sem controle seletivo?
- As ocupâncias críticas geradas pelo controle seletivo são maiores do que a ocupância crítica na situação em que não há controle?
- Os fluxos gerados pelo controle seletivo são maiores nos casos de ocupância além da crítica em relação ao caso sem controle nos mesmos casos de ocupância além da crítica?
- Existe algum real aumento de fluxo para algumas velocidades?

Essas questões serão discutidas a seguir.

#### **4.3.1. Avaliação do Impacto do Controle Seletivo numa Via Principal**

Para que se possam tirar conclusões sobre o efeito do controle seletivo de velocidades, é necessária algum tipo de sensor no controle velocidades.

A partir de observações realizadas, tanto em dias chuvosos como em dias sem chuvas, as seguintes conclusões puderam ser tiradas quanto à aplicação de um controle seletivo de velocidades [4, p.47].

- Como já foi mencionado, quanto menor o limite de velocidade imposto, menor é a velocidade média da via.
- A curva referente à situação com controle seletivo cruza a curva referente à situação sem controle seletivo no diagrama fundamental, de forma que o novo fluxo máximo ocorre para uma ocupância (crítica) maior.
- Em dias chuvosos, o fluxo máximo e a velocidade correspondente se reduzem em 10% em relação a seus valores em dias sem chuva. Apesar disso, a ocupância correspondente (ocupância crítica) parece não ser sensível a variações das condições do tempo.
- Quanto ao aumento do fluxo máximo da via, nada pode ser concluído com as observações realizadas. Em algumas situações, houve aumento do fluxo e em outras, não.

De forma mais quantitativa, é importante saber a redução de fluxo que se obtém ao se implantar um controle seletivo de velocidades em um trecho. A referência [4] mostra gráficos que foram obtidos de experimentos em campo em diferentes condições de tempo e locais, em que se têm fluxos em função da ocupância. Os dados foram obtidos para situações sem controle da via (sem limite de velocidade) e situações com controle seletivo de velocidades.

A tabela abaixo resume os dados dos gráficos. É importante deixar claro que os valores de retenção dados abaixo são relativos ao caso em que não há limite de velocidades.

**Tabela 4-1: Fluxo de veículos resultante devido ao controle seletivo de velocidades (dias limpos) – Fonte: [4]**

Limite de Velocidade	Locais			
	441A	402A	325B	345B
$v_L = 100 \text{ km/h}$	97%	107%	102%	104%
$v_L = 80 \text{ km/h}$	98%	98%	111%	105%
$v_L = 60 \text{ km/h}$	89%	87%	100%	87%

Os locais em que estes dados foram tirados são importantes na análise dos números. Os locais 325B e 345B se referem a trechos em que não há nenhum gargalo ativo, mas nada impede que em algum dia ou horário isso possa ocorrer. Assim, os valores altos obtidos podem ser resultados de flutuações, já que um limite mais baixo de velocidade pode não ser significativo visto que se trata de uma via sem grandes restrições.

Já o local 441A é um ponto próximo de um gargalo efetivo e o local 402A é um trecho que precede este gargalo. Nesses casos, observam-se reduções importantes de fluxo, pois o gargalo deve, também, ter efeito sobre o fluxo no trecho anterior a ele.

É importante lembrar que a queda de fluxo ocorre no trecho em que o limite é imposto, o que leva a uma redução de fluxo para o trecho seguinte. Isso pode ser usado para reter veículos que estejam indo em direção a um gargalo.

É também importante notar que, embora reduzido, há um aumento de capacidade (valor maior do que 100%) para limites altos de velocidade (maiores do que 80  $km/h$ ), mas apenas fora do gargalo, justificando a condução cética do estudo sobre este segundo efeito (aumento de capacidade no gargalo).

#### **4.3.2. Análise da Avaliação do Controle Seletivo de Velocidades**

Foi visto acima que a aplicação do controle seletivo induz um novo valor de ocupância crítica maior do que o original (sem controle), o que permite que seja desenvolvido um fluxo maior com densidade maior. Por outro lado, antes do ponto de encontro das curvas referentes ao tráfego sem controle e com controle, o fluxo é maior para o caso não controlado. Assim, se a ativação do controle seletivo de velocidade é feita em ocupâncias inferiores à do ponto de encontro das curvas com controle e sem controle, o efeito é de redução da eficiência do fluxo.

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. No entanto, para o 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.

Ainda, a ativação do controle seletivo na ocupância do ponto de encontro das curvas ou, no máximo, no ponto de ocupância crítica da curva sem controle faz com que a eficiência do fluxo aumente, pois, nessa situação, o fluxo no gargalo do caso controlado é maior do que o do não controlado. Isso evita ou atrasa o congestionamento e pode ser aplicado para melhorar a eficiência do fluxo no gargalo adiante.

Quantitativamente, os dados acima mostraram que, para os locais estudados em [4], o limite de velocidade fixado em  $60\ km/h$  foi aquele que trouxe maior efeito de retenção.

#### 4.4. 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. Agora, é importante deixar claro o que estes três métodos têm em comum e devem cumprir para que possam ser considerados bons sistemas de controle.

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

Esses dois métodos serão estudados e simulados no decorrer do projeto e seus resultados serão apresentados à medida que estiverem sendo obtidos.

## 5. VERIFICAÇÃO DO SOFTWARE

Como já foi citado, o uso do software CORSIM 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 “retenção pelo limite de velocidade” devem ser observados em simulações simples do software CORSIM, de forma a verificar como este pode ser usado como ferramenta confiável na continuidade do projeto.

### 5.1. Conceito de “carro-seguidor”

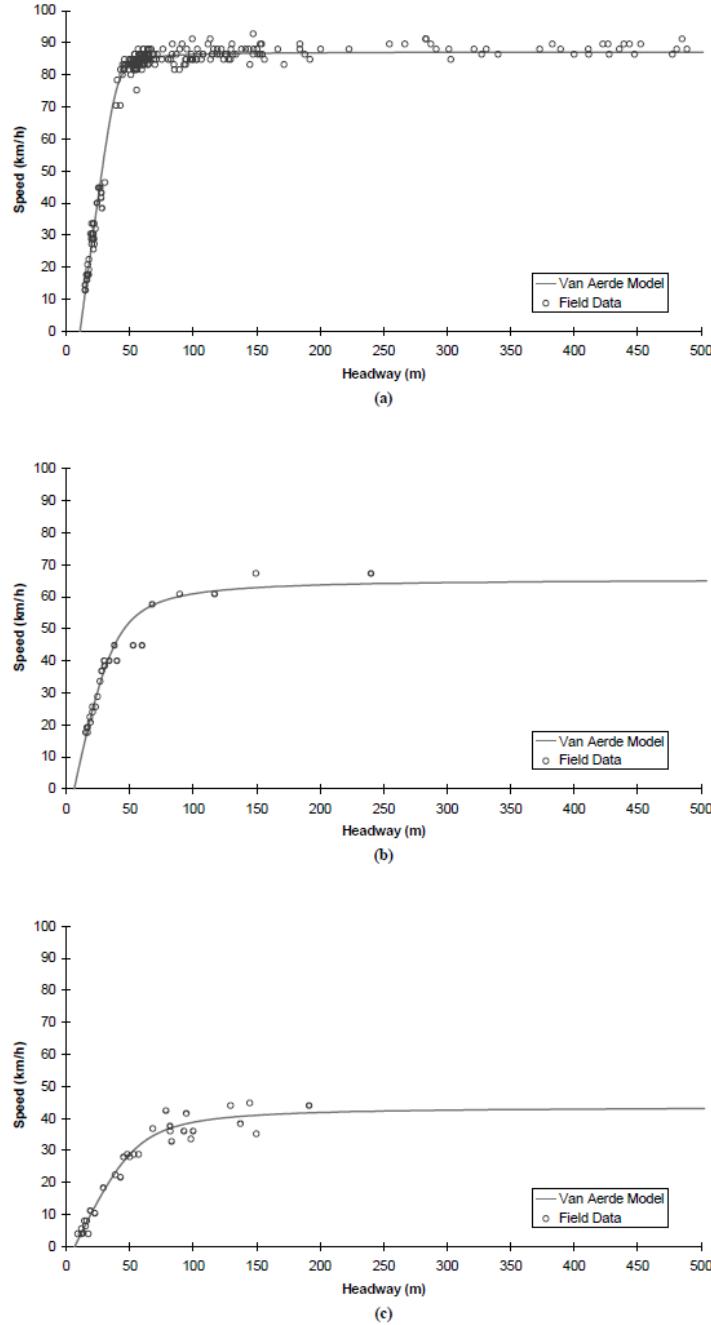
Como já citado, o CORSIM utilizado funciona a partir de modelos microscópicos, que levam em conta comportamento de veículo a veículo e a maneira com que dois veículos, líder e seguidor, interagem entre si, viajando sobre a mesma faixa. Hipóteses adicionais governam as mudanças de faixa demandadas pelos veículos e sua realização.

O processo de seguimento de veículo é modelado como uma equação de movimento em condições de regime transitório, aliada a algumas restrições que governam o comportamento de veículos quando passam de um estado para outro. Estas restrições se referem à aceleração, desaceleração, agressividade do condutor e condições de tempo e do pavimento [6, p.2].

No modelo de carro-seguidor do CORSIM, considera-se que o carro líder se mantém em velocidade constante e que a diferença de velocidade entre um carro qualquer e um carro à sua frente tende a zero. Um gráfico que mostre a velocidade de um veículo em função da distância que este tem até o próximo carro colocará em evidência um aumento de velocidade com o aumento da distância, sendo que se atinge um valor limite (assíntota horizontal), que é a velocidade livre da via.

Dependendo do tipo de via em que os veículos se encontram, a variação de velocidade, entre zero e a velocidade livre, em função da distância entre veículos, assume

comportamentos diferentes. No caso de vias expressas, essa variação pode ser linear, enquanto que no caso de um túnel, por exemplo, a variação é mais sutil e não linear, demonstrando um comportamento menos agressivo. Isso pode ser observado na Figura 6-1 a seguir, extraída do trabalho de Rakha e Crower [6, p. 250].



**Figura 5-1:** gráficos de velocidade em função da distância de um veículo até seu líder (a) em uma via expressa em Orlando, Flórida, (b) no túnel Holland em Nova Iorque, (c) em uma via arterial no Reino Unido

Para uma modelagem mais próxima da realidade, no caso microscópico, levam-se em conta o comportamento de cada motorista individualmente e a interação deste com aquele à sua frente. Parâmetros importantes, nesse caso, são, por exemplo, aceleração

máxima, desaceleração máxima, distância entre carros parados, tempo entre carros em movimento. Alguns destes fatores dependem do tipo de motorista, se este é considerado mais ou menos agressivo.

No caso do CORSIM, admite-se o modelo de carro seguidor de Pipes (na versão que ficou conhecida por modelo de Pittsburg) definido por

$$e = e_j + c_3 \cdot v + b \cdot c_3 \cdot \Delta v$$

ou, em condições estacionárias e homogêneas, por

$$e_s = e_j + c_3 \cdot v$$

sendo:

- $e$ : distância entre as partes frontais do veículo líder e de seu seguidor
- $e_j$ : distância entre veículos quando estes estão completamente parados
- $v$ : velocidade constante do veículo líder

Algumas variáveis macroscópicas não aparecem diretamente neste modelo.

- A capacidade da via,  $q_c$ : esta representa o fluxo da via em seu valor máximo. Assim,  $q_c = q_{max}$ , medido em veículos por hora por faixa. Isso corresponde ao inverso do intervalo mínimo de tempo entre dois veículos:  $q_c = 1/h_{min}$  ou  $h_{min} = 1/q_c$ .
- 
- A velocidade de fluxo livre,  $v_f$ : é a máxima velocidade média do tráfego, que ocorre com a via livre de restrições causadas por outros veículos (em fluxo baixo).

O intervalo entre veículos em condição estacionária é obtido dividindo  $e_s$  pela velocidade dos veículos, tendo-se

$$h_s = \frac{e_j}{v} + c_3,$$

pois, em condições estacionárias e homogêneas, o modelo do CORSIM leva a

$$e_s = e_j + c_3 \cdot v$$

(eliminando o diferencial de velocidade).

Isso mostra que  $h_s$  diminui com a velocidade e é mínimo para  $v = v_{max}$  e  $v_{max} = v_f$ .

Assim,  $h_{min} = c_3 + e_j/v_f$  e, então

$$1/q_c = c_3 + e_j/v_f$$

Logo,

$$c_3 = \frac{1}{q_c} - \frac{e_j}{v_f}$$

No caso estacionário, os parâmetros importantes que podem influenciar na simulação são a sensibilidade do carro seguidor (*car-following sensitivity*)  $c_3$  e a constante do carro seguidor (*Pitt car-following constant*)  $e_j$ . O primeiro representa a “distância” em tempo que um motorista fica daquele à sua frente, o que depende do comportamento de cada motorista. Já o segundo se refere à distância que os carros mantêm entre si quando estão parados, o que é fixo para qualquer tipo de motorista, mas pode variar por tipo de veículo. No caso dinâmico, o parâmetro de ajuste  $b$  também é relevante.

O parâmetro de sensibilidade (*car-following sensitivity*) é representado pela variável  $c_3$  e a expressão acima [6, p.20] permite calibrá-lo a partir da capacidade de tráfego  $q_c$  de cada trecho de via (uma característica básica de operação).

sendo:

- $q_c$ : fluxo máximo da via (v/s)
- $e_j$ : espaçamento entre carros, incluindo um veículo, quando estão parados em fila (m/v)
- $v_f$ : velocidade livre da via (m/s)

Nota-se que os parâmetros do CORSIM são solicitados em unidades imperiais. Por este motivo, alguns valores apresentados a seguir estarão em unidades imperiais.

Ainda, deve-se ressaltar que  $e_j$  não representa apenas o comprimento do carro. É levada em conta, também, a distância entre carros parados e a mínima distância entre dois carros. Assim, tem-se

$$e_j = L + d_j$$

sendo:

- $e_j$ : mínima distância entre dois carros parados,
- $L$ : comprimento do veículo ( $14\ ft$  para veículos de passeio; valores diferentes são adotados para os diversos tipos de veículos considerados),
- $d_j$ : constante de Pitt (fixado, em  $10\ ft$  ou cerca de  $3,05\ m$ ).

Caso seja conhecida a densidade de saturação, ou seja, a densidade quando os carros estão completamente parados em um congestionamento, pode-se obter  $e_j$  sem passar por este cálculo, já que a seguinte relação é válida.

$$e_j = 1/k_j$$

sendo  $k_j$  a densidade crítica (que corresponde a uma fila parada).

Existem modelos mais flexíveis que o de Pipes, como o implícito no modelo de van Aerde, e a calibração pode ser feita com dados microscópicos ou macroscópicos. Um exemplo de calibração com dados microscópicos apresentado por Rakha e Crowther [6] está na Figura 5.1 anterior e é baseado no uso do modelo de van Aerde, cuja a calibração pode ser feita com dados microscópicos ou macroscópicos.

No entanto, o CORSIM utiliza o modelo de Pipes e por este motivo será admitida esta relação.

A possibilidade de calibrar seus parâmetros a partir do conhecimento de características de cada trecho é uma decidida vantagem. Pode-se, por exemplo, ajustá-lo para aumentar ou reduzir a capacidade de escoamento de tráfego em um dado trecho da via.

## 5.2. Calibração de Parâmetros

Como será apresentado adiante, foi observado que o cálculo simples de  $e_j$  e  $c_3$  não fornece os resultados esperados com a necessária precisão. Assim, uma vez que esta estimativa inicial esteja feita, é necessário um ajuste destes parâmetros.

Como mostra a expressão abaixo, são necessários dois parâmetros microscópicos para verificar que a simulação forneça o mesmo  $q_c$  e o mesmo  $v_f$ :  $c_3$  e  $e_j$ . Estes parâmetros devem ser combinados de forma correta para que a simulação retorne os resultados esperados.

A calibração inicial é dada por:

$$c_3 = \frac{1}{q_c} - \frac{e_j}{v_f}$$

Lembrando,  $e_j = L + d_j$ , sendo  $L$  o comprimento efetivo do veículo e  $d_j$  a constante de Pitt. Assim, como o comprimento do veículo não é algo que se altera na prática, têm-se apenas dois parâmetros a serem alterados:  $c_3$  e  $d_j$ .

A fórmula  $c_3 = (1/q_c - e_j/v_f)$  mostra que quanto maior  $c_3$ , menor o valor de  $q_c$  e vice-versa. Porém, observou-se que, para certo valor já baixo de  $c_3$ , não há mais um aumento significativo de  $q_c$ , o que torna necessária alteração no valor da constante de Pitt,  $d_j$ . Reduzindo o valor de  $d_j$ , fica possível atingir alguns valores de  $q_c$  mais altos que não o foram com os melhores valores de  $c_3$ . Por sua vez, para se obterem valores mais baixos de  $q_c$ , valores altos de  $c_3$  são suficientes.

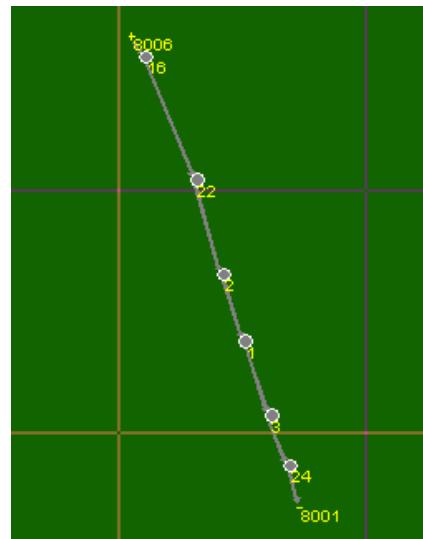
Assim, o comportamento do  $q_c$  simulado depende de dois parâmetros:  $c_3$  e  $d_j$ . A redução nos valores destes dois parâmetros contribui para o aumento de  $q_c$ . Então, existem combinações diferentes destes parâmetros que fornecem o mesmo valor de  $q_c$  simulado. A seguir, foi possível variar apenas  $c_3$ .

### 5.3. Preparação da rede para verificação do CORSIM

A verificação do CORSIM visa avaliar sua capacidade de reproduzir os chamados “fenômenos das duas capacidades” e “retenção pelo limite de velocidade”, de forma a verificar como pode ser usado como ferramenta confiável na continuidade do projeto.

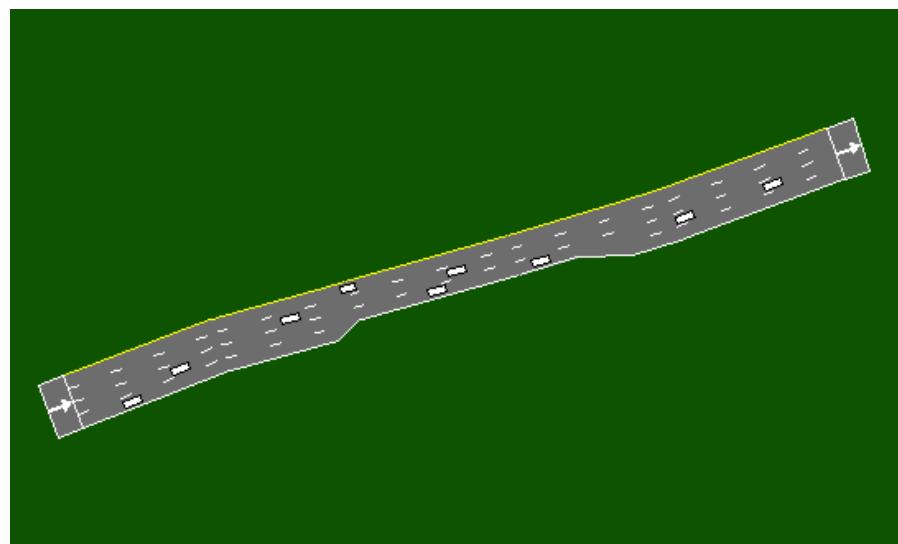
A malha criada, no CORSIM, para as simulações de verificação, é composta de sete trechos, sendo o primeiro aquele por onde os veículos são injetados. Este primeiro trecho possui quatro faixas, assim como o segundo. O terceiro é uma redução de uma faixa no número total de faixas e o quarto é um trecho com três faixas (este trecho será chamado de gargalo). O quinto trecho possui um aumento de uma faixa, sendo o sexto um trecho com o mesmo número de faixas que o trecho inicial (quatro faixas). O último trecho tem função apenas para o software e não pode ser configurado. Todos estes trechos carregam informações quanto a velocidades livres, comprimentos da pista, número de faixas, entre outros dados. Dois trechos menores (primeiro e último) são mais discretos, que são aqueles que estão conectados aos nós 8006 e 8001, que representam aqueles por onde o fluxo entra no sistema e sai, respectivamente.

A Figura 5-2 a seguir ilustra a interface gráfica do software CORSIM. Nela, podem ser vistos os trechos e os nós, num total de oito: dois são o inicial e o final. O nó 8006 é quem carrega a informação de demanda da simulação. Já o nó 8001 não é configurável por ser um nó que carrega informações resultantes da malha.



**Figura 5-2: ilustração da interface gráfico do software CORSIM**

Na Figura 5-3 a seguir, tem-se o trecho da maneira como ocorre a simulação, onde se podem ver alguns veículos.



**Figura 5-3: Malha de simulação gerada pelo software CORSIM**

A seguir, será descrito como foram realizadas as simulações de verificação, quais as condições em que ocorreram, quais os parâmetros utilizados, entre outros detalhes.

## 5.4. Parâmetros das Simulações

O objetivo da primeira simulação é identificar o fluxo que gera a ativação do gargalo (momento a partir do qual se considera que não há mais aumento no fluxo escoado, mas perda de capacidade) e verificar a influência da velocidade livre no gargalo no fluxo máximo escoado. Pode-se, desta forma, verificar o fenômeno das duas capacidades e o efeito de retenção pelo limite de velocidade.

Esta primeira simulação foi realizada mantendo os parâmetros básicos do CORSIM e variando a velocidade livre no gargalo, usando valores de  $100 \text{ km/h}$ ,  $80 \text{ km/h}$ ,  $60 \text{ km/h}$  e  $40 \text{ km/h}$ . A velocidade no primeiro trecho (entre os sete) é sempre de  $100 \text{ km/h}$ . A velocidade, nos três trechos subsequentes, foi imposta de forma a se ter uma mudança progressiva de velocidades entre  $100 \text{ km/h}$  e aquela desejada no gargalo. A variação foi feita de forma linear e com três reduções de velocidade. Nos trechos posteriores ao gargalo, a velocidade foi mantida sempre em  $100 \text{ km/h}$ .

Como o objetivo deste experimento foi verificar o fenômeno das duas capacidades e o efeito de retenção de demanda pelo limite de velocidades, o fluxo e as velocidades médias em cada trecho foram registrados, variando-se o fluxo de entrada de veículos, entre zero e  $10000 \text{ v/h}$ .

A segunda simulação foi realizada variando-se não só os valores de velocidade livre, mas também valores de parâmetros que se referem ao comportamento dos motoristas. O objetivo foi verificar se o fluxo máximo pretendido era obtido para algumas velocidades específicas no gargalo. Assim, variando os valores destes parâmetros, foi possível entender como eles interferem no fluxo máximo da via ( $q_c$ ).

Quanto a esta segunda simulação, o objetivo foi aprender o processo de calibração do software através de alterações nos parâmetros e estudo dos resultados. Na prática, foram colocados objetivos a serem atingidos, de forma que se pudesse observar como se comporta o software face aos parâmetros entrados.

Serão analisadas algumas das situações descritas na Tabela 4-1 anterior, ou seja, casos de redução de velocidade e suas respectivas retenções de demanda, calculando o valor inicial de  $c_3$  em cada situação (que pressupõe valores estacionários e uniformes). Caso este valor não forneça os resultados esperados no CORSIM, será buscado um novo  $c_3$  iterativamente. Este  $c_3$  será verificado e, então, adotado para futuras simulações.

Deve-se lembrar que estes valores de  $q_c$  e de  $v_f$  ocorrem apenas no gargalo.

Retomando alguns dados da Tabela 4-1, tem-se que, em uma via próxima de um gargalo, a retenção para um limite de 60 km/h é de 11% e, para um limite de 80 km/h, 2%. Considerando que para a velocidade de 100 km/h não há retenção, serão feitas interpolações para outras velocidades usando a interpolação com polinômio de Lagrange a partir dos três pontos citados acima.

Para esse cálculo, serão considerados os pontos genéricos  $(x_0, f_0)$ ,  $(x_1, f_1)$  e  $(x_2, f_2)$ . A função que melhor representa esses pontos é dada pelo seguinte polinômio de Lagrange:

$$P(x) = \frac{(x - x_1)(x - x_2)}{(x_0 - x_1)(x_0 - x_2)} f_0 + \frac{(x - x_0)(x - x_2)}{(x_1 - x_0)(x_1 - x_2)} f_1 + \frac{(x - x_0)(x - x_1)}{(x_2 - x_0)(x_2 - x_1)} f_2$$

Os pontos, neste caso, são (100; 0), (80; 2) e (60; 11). Aplicando a expressão acima, tem-se:

$$P(x) = \frac{(x - 100)(x - 60)}{(80 - 100)(80 - 60)} \cdot 2 + \frac{(x - 100)(x - 80)}{(60 - 100)(60 - 80)} \cdot 11$$

Usando a expressão acima para velocidades de 50 km/h e 70 km/h, têm-se, respectivamente, 18,1% e 5,6% de retenção para esses limites.

Considerando um fluxo inicial por faixa de 2000 v/h/f, a tabela abaixo mostra as cinco situações que serão estudadas.

**Tabela 5-1: Condições da segunda simulação**

	1º caso	2º caso	3º caso	4º caso	5º caso
$q_c (v/h/f)$	2000	1960	1888	1780	1638
$v_f (km/h)$	100	80	70	60	50

A partir dos dados da Tabela 5-1 e usando a expressão

$$c_3 = \frac{1}{q_c} - \frac{e_j}{v_f},$$

podem-se calcular os valores iniciais de  $c_3$  para esses casos.

Para o primeiro caso, tem-se:

$$c_{3,1} = \frac{3600}{2000} - 0,3048 \cdot (14 + 10) \cdot \frac{1}{\frac{100}{3,6}} = 1,537$$

Procedendo de forma análoga para os outros casos, têm-se:

- $c_{3,2} = 1,508$
- $c_{3,3} = 1,531$
- $c_{3,4} = 1,584$
- $c_{3,5} = 1,671$

Na primeira simulação de verificação, os valores básicos no CORSIM de  $c_3$ , para os diferentes tipos de motorista, foram os seguintes:

**Tabela 5-2: Fator de sensibilidade do condutor para a primeira simulação realizada**

Tipo de motorista	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$c_3$ (s)	1,25	1,15	1,05	0,95	0,85	0,75	0,65	0,55	0,45	0,35

Estes valores de  $c_3$  mostram que foi adotada uma progressão aritmética entre os valores, cuja média entre o maior valor e o menor valor é 0,8 s. Estes são os valores básicos ou padrão do CORSIM.

Já na a segunda simulação de verificação, para que se pudesse obter o valor de  $q_c$  simulado no gargalo igual àquele desejado em cada um dos casos, os seguintes parâmetros tiveram de ser adotados. Estes valores foram obtidos por tentativas sucessivas e estão mostrados na Tabela 5-3.

**Tabela 5-3: Parâmetros utilizados na segunda simulação**

	1º caso	2º caso	3º caso	4º caso	5º caso
$\bar{c}_3$ (s)	1,10	1,12	1,22	1,26	1,38
Multiplicador	138%	140%	153%	158%	173%

Como foi dito anteriormente, as mudanças ocorreram apenas no gargalo. Assim, os valores de  $\bar{c}_3$  acima valem apenas neste link. Em todos os outros, os valores de  $c_3$  são aqueles indicados nas tabelas 5-1 e 5-2 anteriores.

Para que isso pudesse ser feito, deve-se entrar com um parâmetro chamado de multiplicador do fator de sensibilidade de *car-following*. Este fator é uma porcentagem do valor indicado como padrão do CORSIM. Ou seja, se este fator vale 180%, tem-se  $\bar{c}_3 = 1,44$ . Assim, não é necessário mudar o fator de sensibilidade de todos os motoristas em cada simulação, mas apenas o valor do multiplicador no link desejado.

A Tabela 5-4 a seguir resume os parâmetros das simulações realizadas.

**Tabela 5-4: Resumo dos parâmetros e condições utilizados nas simulações**

	1 <sup>a</sup> simulação	2 <sup>a</sup> simulação 1º caso	2 <sup>a</sup> simulação 2º caso	2 <sup>a</sup> simulação 3º caso	2 <sup>a</sup> simulação 4º caso	2 <sup>a</sup> simulação 5º caso
$q_c (v/h/f)$	<i>Sem especificação</i>	2000	1960	1888	1780	1638
$v_f (km/h)$	100 a 40 km/h	100	80	70	60	50
Retenção esperada	—	0%	2%	5,6%	11%	18,1%
$\bar{c}_3 (s)$ inicial	—	1,537	1,508	1,531	1,584	1,671
$\bar{c}_3 (s)$ final	0,8	1,10	1,12	1,22	1,26	1,38
Multiplicador	100%	138%*	140%*	153%*	158%*	173%*

\*: valores obtidos iterativamente, mantendo  $d_j$  com o valor padrão (10ft).

## 5.5. Resultados e Comentários

Os resultados que seguem referem-se à primeira simulação de verificação, aquela em que os fatores de sensibilidade do condutor ( $c_3$ ) são os valores padrão do software.

**Tabela 5-5: Dados da primeira simulação - Velocidade de gargalo: 100 km/h**

<i>Link: Gargalo – 3 faixas</i>			
<i>Velocidade no link</i>	100 km/h ou 62 mph		
$c_3$	0,80		
% $c_3$ padrão	100%		
Constante Pitt	10 ft		
<i>Fluxo na Entrada</i>	<i>Fluxo no link</i>	<i>Velocidade no link</i>	
Total (v/h)	Total	mph	km/h
0	0,00	0,00	0,00
400	399,00	61,65	99,22
800	797,80	61,63	99,18
1200	1199,80	61,54	99,04
1600	1598,90	61,41	98,83
2000	1999,40	61,28	98,62
2400	2398,90	61,15	98,41
2800	2798,70	61,03	98,22
3200	3199,10	60,79	97,83
3600	3599,30	60,50	97,36
4000	4000,30	60,13	96,77
4400	4397,80	59,55	95,83
4800	4799,20	58,50	94,15
5200	5191,50	54,59	87,86
5600	5586,30	49,43	79,55
6000	5966,10	45,67	73,51
6400	6105,90	45,24	72,80
6800	6128,70	44,83	72,14
7200	6141,90	45,14	72,65
7600	6131,40	44,97	72,38
8000	6149,10	44,95	72,34
8400	6132,60	45,13	72,63
8800	6141,80	44,91	72,27
9200	6132,20	45,07	72,53
9600	6128,90	45,03	72,46
10000	6131,80	44,94	72,32

Observando-se os dados acima, pode-se notar que a ativação do gargalo ocorre ao redor de 6000  $v/h$  (quando o fluxo passa a ser sistematicamente menor que a demanda alimentada). Note-se que não há uma queda de capacidade efetiva no caso simulado. Há um fluxo máximo no gargalo, porém os valores de fluxo para os fluxos de entrada seguintes não são significativamente menores de forma que possa ser considerada uma queda de capacidade (uma queda ao redor de 10% levaria a 5400  $v/h$ ).

Pode-se afirmar que a ativação do gargalo ocorreu para um fluxo total na entrada menor que 6400  $v/h$ , pois o consequente fluxo na saída do gargalo é de 6105,90  $v/h$ . Até o valor de 6000  $v/h$  na entrada, a diferença entre os valores é desprezível.

Para a simulação com velocidade de gargalo de 80 km/h, têm-se os seguintes dados.

**Tabela 5-6: Dados da primeira simulação - Velocidade de gargalo: 80 km/h**

<i>Link: Gargalo – 3 faixas</i>			
<i>Velocidade no link</i>	80 km/h ou 50 mph		
$c_3$	0,80		
% $c_3$ padrão	100%		
Constante Pitt	10 ft		
<i>Fluxo na Entrada</i>	<i>Fluxo no link</i>	<i>Velocidade no link</i>	
Total (v/h)	Total	mph	km/h
0	0,00	0,00	0,00
400	399,00	50,81	81,78
800	798,00	50,80	81,75
1200	1200,20	50,61	81,45
1600	1599,10	50,43	81,16
2000	1999,80	50,34	81,01
2400	2398,70	50,24	80,86
2800	2799,10	50,08	80,60
3200	3198,20	49,96	80,41
3600	3598,90	49,69	79,97
4000	3999,10	49,50	79,67
4400	4398,70	49,17	79,14
4800	4799,50	48,82	78,57
5200	5195,20	47,85	77,00
5600	5584,70	46,00	74,03
6000	5977,10	43,99	70,79
6400	6102,70	44,13	71,02
6800	6114,00	44,25	71,21
7200	6109,00	44,29	71,28
7600	6110,30	44,15	71,05
8000	6110,70	44,26	71,23
8400	6109,30	44,09	70,96
8800	6117,30	44,20	71,13
9200	6104,00	44,27	71,25
9600	6117,40	44,31	71,30
10000	6117,20	44,17	71,09

Da mesma maneira que no caso anterior, não foi possível observar uma queda de capacidade nesta simulação. Quanto à ativação do gargalo, nota-se que esta ocorreu para um fluxo na entrada menor que  $6400 \text{ v/h}$  e um correspondente fluxo na saída do gargalo de  $6102,70 \text{ v/h}$ .

Para a simulação com velocidade de gargalo de 60 km/h, têm-se os seguintes dados.

**Tabela 5-7: Dados da primeira simulação - Velocidade de gargalo: 60 km/h**

<i>Link: Gargalo – 3 faixas</i>			
<i>Velocidade no link</i>	60 km/h ou 37 mph		
$c_3$	0,80		
% $c_3$ padrão	100%		
<i>Constante Pitt</i>	10 ft		
<i>Fluxo na Entrada</i>	<i>Fluxo no link</i>	<i>Velocidade no link</i>	
Total (v/h)	Total	mph	km/h
0	0,00	0,00	0,00
400	399,20	39,30	63,25
800	798,10	39,33	63,29
1200	1200,00	39,09	62,91
1600	1599,00	38,95	62,68
2000	1999,70	38,78	62,42
2400	2399,50	38,63	62,17
2800	2799,60	38,44	61,86
3200	3199,10	38,20	61,47
3600	3599,80	37,97	61,10
4000	4000,00	37,64	60,58
4400	4398,00	37,38	60,17
4800	4799,10	37,00	59,55
5200	5197,60	36,55	58,82
5600	5587,80	36,77	59,17
6000	5985,20	36,33	58,46
6400	6090,00	36,52	58,77
6800	6101,20	36,49	58,73
7200	6086,10	36,48	58,72
7600	6092,30	36,51	58,76
8000	6084,80	36,49	58,73
8400	6095,80	36,49	58,72
8800	6078,70	36,47	58,69
9200	6080,70	36,47	58,69
9600	6091,60	36,47	58,69
10000	6082,80	36,46	58,67

Novamente, os dados da simulação em que a velocidade do gargalo é  $v = 60 \text{ km/h}$  não puderam mostrar uma efetiva queda de capacidade. A ativação do gargalo ocorreu para um fluxo total de entrada menor que  $6400 \text{ v/h}$  e um fluxo total na saída do gargalo de  $6090,00 \text{ v/h}$ .

Assim como nos casos anteriores, não houve neste caso uma evidencia da ocorrência do fenômeno das duas capacidades.

Para a simulação com velocidade de gargalo de 40 km/h, têm-se os seguintes dados.

**Tabela 5-8: Dados da primeira simulação - Velocidade de gargalo: 40 km/h**

<i>Link: Gargalo – 3 faixas</i>			
<i>Velocidade no link</i>	40 km/h ou 25 mph		
$c_3$	0,80		
% $c_3$ padrão	100%		
Constante Pitt	10 ft		
<i>Fluxo na Entrada</i>	<i>Fluxo no link</i>	<i>Velocidade no link</i>	
Total (v/h)	Total	mph	km/h
0	0,00	0,00	0,00
400	399,10	28,35	45,63
800	797,60	28,21	45,40
1200	1199,70	28,04	45,12
1600	1598,60	27,89	44,88
2000	2000,10	27,61	44,43
2400	2398,60	27,39	44,08
2800	2799,10	27,15	43,69
3200	3198,80	26,79	43,12
3600	3598,40	26,43	42,54
4000	3999,70	25,97	41,80
4400	4398,80	25,43	40,92
4800	4798,60	24,69	39,73
5200	5197,00	24,02	38,66
5600	5595,20	24,01	38,65
6000	5990,70	20,94	33,70
6400	6054,40	20,19	32,49
6800	6054,90	20,04	32,26
7200	6057,40	20,12	32,38
7600	6045,90	20,09	32,33
8000	6065,00	20,05	32,27
8400	6053,10	20,08	32,32
8800	6049,00	20,16	32,44
9200	6048,50	20,17	32,46
9600	6053,70	20,34	32,73
10000	6063,00	20,31	32,68

Mais uma vez não foi possível evidenciar uma queda de capacidade. Novamente, a ativação do gargalo ocorreu para um fluxo total na entrada menor que  $6400 \text{ v/h}$  com um correspondente fluxo na saída do gargalo de  $6054,40 \text{ v/h}$ .

Conclusão:

Os resultados anteriores permitiram concluir que o software CORSIM não representa o fenômeno das duas capacidades. O que se nota é que com o aumento do fluxo na entrada da malha, há aumento do fluxo escoado no gargalo, mesmo após sua ativação, quando era esperada uma queda devido à saturação da via.

A redução do fluxo escoado no gargalo foi observada, indicando a existência de um limite de capacidade. No entanto, para todas as velocidades de fluxo livre analisadas, o limite de capacidade ocorreu para um fluxo na entrada menor que  $6400 \text{ v/h}$ , tendo-se, então, um fluxo médio no gargalo de  $6100 \text{ v/h}$ .

Desse fato, conclui-se que a capacidade deste trecho nas condições em que as simulações foram realizadas não depende da velocidade de fluxo livre no gargalo, mas que esta é sempre de  $2000 \text{ v/h/f}$ . Esta observação indica que o simples limite de velocidade não produziria um efeito de retenção (ativação do gargalo). Esta conclusão será alterada nas simulações seguintes, mas levou a estudar a alteração do valor de  $c_3$ .

Para verificar a dependência da capacidade com o valor de  $c_3$  e da velocidade livre no gargalo, foram realizadas outras simulações cujos resultados estão a seguir.

A seguir, estão os resultados da segunda simulação de verificação, em que foram estudados cinco casos. Serão indicados apenas os dados para o gargalo.

**Tabela 5-9: Dados da segunda simulação - 1º caso**

<i>Link: Gargalo – 3 faixas</i>			
<i>Velocidade no link</i>	100 km/h ou 62 mph		
$c_3$	1,10		
% $c_3$ padrão	138%		
Constante Pitt	10 ft		
Capacidade desejada	$qc = 2000 v/h/f$		
Fluxo na Entrada	Fluxo no link	Velocidade no link	
Total (v/h)	Total	mph	km/h
0	0,00	0,00	0,00
400	399,00	61,65	99,22
800	797,80	61,63	99,19
1200	1200,20	61,58	99,10
1600	1599,00	61,16	98,42
2000	1999,60	61,04	98,23
2400	2398,50	60,80	97,85
2800	2798,50	60,57	97,49
3200	3199,20	60,23	96,93
3600	3598,30	59,82	96,27
4000	3999,70	59,26	95,37
4400	4398,30	58,36	93,92
4800	4799,90	57,07	91,84
5200	5194,20	50,79	81,74
5600	5582,30	45,54	73,29
6000	5834,30	27,29	43,93
6400	5889,90	27,57	44,37
6800	5832,20	24,87	40,02
7200	5858,30	26,48	42,62
7600	5859,60	25,49	41,02
8000	5835,30	24,69	39,74
8400	5872,70	26,45	42,57
8800	5832,40	24,73	39,80
9200	5819,90	23,99	38,61
9600	5837,50	24,22	38,98
10000	5814,5	24,26	39,05

A Tabela 5-9 acima evidencia o efeito de retenção de fluxo, o que também pôde ser observado nas simulações anteriores. Nesse caso, foi alterado o valor de  $c_3$ , aumentado para 1,1, e utilizou-se a velocidade de 100 km/h no gargalo.

O efeito de retenção ocorreu para um fluxo na entrada de 6400 v/h e um consequente fluxo no gargalo de 5889,90 v/h ou 1963,30 v/h/f, o que representa um distanciamento do valor desejado (2000 v/h/f) de 1,8%.

Fazendo uma simulação semelhante à anterior, porém com uma velocidade no gargalo de 40 km/h, notou-se que o efeito de retenção aconteceu para um fluxo na entrada de 5600 v/h e obteve-se um correspondente fluxo no gargalo de 5420 v/h.

Isso mostra que para este o valor de  $c_3$ , a velocidade de fluxo livre no gargalo tem influência na capacidade da via, o que não foi observado quando  $c_3 = 0,8$  foi usado.

**Tabela 5-10: Dados da segunda simulação - 2º caso**

Link: Gargalo – 3 faixas			
Velocidade no link		80 km/h ou 50 mph	
<i>c3</i>			1,12
% <i>c3</i> padrão			140%
Constante Pitt			10 ft
Capacidade desejada		$qc = 1960 v/h/f$	
Fluxo na Entrada		Fluxo no link	Velocidade no link
Total (v/h)	Total	mph	km/h
0	0,00	0,00	0,00
400	399,00	50,81	81,78
800	798,00	50,81	81,77
1200	1199,70	50,60	81,43
1600	1599,20	50,32	80,99
2000	1999,90	50,16	80,73
2400	2398,90	49,93	80,35
2800	2799,50	49,78	80,11
3200	3198,50	49,51	79,68
3600	3598,70	49,21	79,20
4000	3999,70	48,86	78,63
4400	4398,90	48,38	77,87
4800	4799,90	47,56	76,54
5200	5195,20	45,24	72,81
5600	5587,50	43,28	69,66
6000	5810,80	28,21	45,40
6400	5821,90	26,41	42,50
6800	5851,70	27,55	44,34
7200	5751,90	23,78	38,28
7600	5787,50	24,96	40,17
8000	5834,10	26,56	42,75
8400	5809,50	26,21	42,18
8800	5806,60	25,21	40,57
9200	5780,20	24,48	39,39
9600	5858,00	28,36	45,64
10000	5803,30	25,76	41,46

Neste caso, vale a mesma observação que anteriormente. Aumentando o valor de  $c_3$ , foi possível reduzir o valor do fluxo máximo da via. Para uma velocidade livre da via de  $80 \text{ km/h}$ , aumentando o parâmetro em 40% em relação ao valor padrão do CORSIM, foi possível reduzir o fluxo máximo em cerca de 3,2% (para  $q_c = 5810,80 \text{ v/h}$  ou  $1934 \text{ v/h/f}$ ) em relação à situação sem redução de velocidade ( $100 \text{ km/h}$ , com  $q_c = 6000 \text{ v/h}$  ou  $2000 \text{ v/h/f}$ ), o que não está distante da retenção esperada de 2%, cujo fluxo correspondente é  $1960 \text{ v/h/f}$ .

**Tabela 5-11: Dados da segunda simulação - 3º caso**

Link: Gargalo – 3 faixas			
Velocidade no link		70 km/h ou 43 mph	
<i>c3</i>			1,22
% <i>c3</i> padrão			153%
Constante Pitt			10 ft
Capacidade desejada			$qc = 1888 v/h/f$
Fluxo na Entrada		Fluxo no link	Velocidade no link
Total (v/h)	Total	mph	km/h
0	0,00	0,00	0,00
400	399,00	44,70	71,93
800	797,80	44,69	71,92
1200	1200,00	44,49	71,60
1600	1598,80	44,19	71,12
2000	1998,90	44,03	70,87
2400	2398,40	43,76	70,42
2800	2798,60	43,56	70,10
3200	3199,10	43,28	69,65
3600	3599,40	42,92	69,08
4000	3999,50	42,54	68,47
4400	4397,80	41,97	67,54
4800	4799,50	41,24	66,37
5200	5195,30	39,49	63,55
5600	5588,10	38,83	62,50
6000	5468,40	21,89	35,23
6400	5452,90	21,31	34,29
6800	5434,80	20,73	33,37
7200	5459,20	21,14	34,02
7600	5428,80	20,88	33,61
8000	5411,50	20,44	32,90
8400	5384,50	20,00	32,19
8800	5372,10	19,97	32,14
9200	5408,90	20,28	32,64
9600	5375,30	19,88	31,99
10000	5384,40	20,11	32,36

Como nos casos anteriores, foi possível reduzir ainda mais o fluxo máximo com o aumento do valor de  $c_3$ . Desta vez, com um aumento de 53% na valor padrão de  $c_3$  do CORSIM e uma velocidade livre no gargalo de 70 km/h, obteve-se um fluxo máximo de 5468,40 v/h ou 1822,80 v/h/f, o que representa uma retenção de 8,9% em relação ao caso sem nenhuma retenção (100 km/h e  $q_c = 2000$  v/h/h) ao invés dos 5,6% (que correspondem a um fluxo máximo de 1888 v/h/f) calculados pelo polinômio de Lagrange.

**Tabela 5-12: Dados da segunda simulação - 4º caso**

Link: Gargalo – 3 faixas			
Velocidade no link		60 km/h ou 37 mph	
<i>c3</i>			1,26
% <i>c3</i> padrão			158%
Constante Pitt			10 ft
Capacidade desejada		$qc = 1780 v/h$	
Fluxo na Entrada		Fluxo no link	Velocidade no link
Total (v/h)	Total	mph	km/h
0	0,00	0,00	0,00
400	399,20	39,30	63,25
800	798,40	39,36	63,34
1200	1199,80	39,05	62,85
1600	1598,60	38,75	62,37
2000	1999,90	38,50	61,97
2400	2398,80	38,24	61,54
2800	2798,80	37,99	61,15
3200	3198,50	37,65	60,60
3600	3599,80	37,25	59,94
4000	4000,40	36,71	59,08
4400	4398,20	36,08	58,06
4800	4799,00	35,15	56,56
5200	5197,50	32,76	52,72
5600	5562,30	31,59	50,84
6000	5333,90	20,20	32,52
6400	5315,60	19,93	32,07
6800	5303,10	19,70	31,70
7200	5308,30	19,74	31,76
7600	5313,40	19,87	31,98
8000	5314,50	19,78	31,83
8400	5297,20	19,78	31,83
8800	5292,40	19,83	31,91
9200	5302,10	19,79	31,85
9600	5301,00	19,78	31,84
10000	5311,50	19,86	31,97

O quarto caso simulado também apresentou redução na capacidade da via. Desta vez, o  $c_3$  foi aumentado em 58% e foi utilizada uma velocidade livre no gargalo de 60 km/h. Com essas entradas, o fluxo máximo obtido ficou em 5333,90 v/h ou 1778,00 v/h/f, quando o fluxo máximo esperado era 1780 v/h/f, o que corresponde a um erro relativo de 0,1%. Com esse fluxo máximo (1778,00 v/h/f), tem-se uma retenção de 11,1% em relação à situação sem redução de velocidade (100 km/h e  $q_c = 2000$  v/h/f).

**Tabela 5-13: Dados da segunda simulação - 5º caso**

Link: Gargalo – 3 faixas			
Velocidade no link	50 km/h ou 31 mph		
c3	1,38		
% c3 padrão	173%		
Constante Pitt	10 ft		
Capacidade desejada	$qc = 1638 v/h$		
Fluxo na Entrada	Fluxo no link	Velocidade no link	
Total (v/h)	Total (10)	mph (10)	km/h
0	0,00	0,00	0,00
400	399,10	34,11	54,90
800	798,40	33,86	54,50
1200	1200,00	33,54	53,97
1600	1599,30	33,24	53,49
2000	2000,00	32,95	53,03
2400	2399,60	32,62	52,50
2800	2798,80	32,29	51,96
3200	3198,60	31,70	51,02
3600	3598,60	31,05	49,97
4000	3999,00	30,18	48,57
4400	4398,90	28,67	46,13
4800	4799,60	25,29	40,70
5200	5092,90	19,48	31,35
5600	5078,20	18,99	30,57
6000	5089,20	18,99	30,56
6400	5081,20	18,98	30,55
6800	5076,00	18,98	30,54
7200	5070,20	19,01	30,59
7600	5082,30	18,97	30,54
8000	5081,80	19,00	30,58
8400	5078,00	18,99	30,57
8800	5084,00	19,00	30,57
9200	5074,90	18,99	30,56
9600	5082,50	19,00	30,58
10000	5084,70	18,97	30,53

Por fim, o quinto e último caso também apresentou redução na capacidade da via. Foi simulado o caso com um aumento de  $c_3$ , em relação ao valor padrão do CORSIM, de 73% e uma velocidade livre no gargalo de 50 km/h.

O fluxo máximo obtido foi de 5078,20 v/h ou 1692,73 v/h/f. Isso representa uma retenção de 15,4% em relação ao caso sem retenção (100 km/h e  $q_c = 2000$  v/h/f), levemente abaixo dos 18,1% calculados pelo polinômio de Lagrange.

Conclusão:

As retenções obtidas nestes casos ficarem bem próximas daquelas calculadas, o que confirma que estes valores de  $c_3$ , junto das velocidades respectivas no gargalo, podem ser usados para reter demanda em uma via comum.

Os fluxos máximos obtidos em cada caso (linhas com fundo vermelho) são aqueles que ocorrem antes de haver queda de capacidade devido ao aumento da demanda na via, o que não pode ser bem visto nestes dados devido à limitação do software em representar o fenômeno das duas capacidades.

## 5.6. Análise de Resultados

Levando-se em conta os resultados das simulações anteriores, conclui-se que nenhum dos resultados anteriores (nem a primeira e nem a segunda simulação) pôde evidenciar a presença do fenômeno das duas capacidades.

Por outro lado, ambas as simulações representaram o efeito de retenção de demanda. Porém, no caso da primeira simulação, com  $c_3 = 0,8$  mantido constante, a redução de velocidade não evidenciou o fenômeno de retenção por variação de velocidade, ou seja, a retenção era constante para qualquer velocidade no gargalo. Já na segunda simulação, em que se alterou o valor de  $c_3$ , houve a retenção por variação de velocidade, ou seja, variando-se o  $c_3$  e a velocidade livre do gargalo, foi possível atingir um fluxo máximo na saída do gargalo desejado.

A segunda simulação permitiu observar que quanto maior o  $c_3$ , menor o fluxo máximo da via. Assim, verificando os casos propostos da segunda simulação, foi possível relacionar certos valores de retenção (em porcentagem) com um par específico de  $c_3$  e velocidade livre no gargalo.

Estes valores de retenção poderão ser considerados nas simulações futuras caso sejam usados os valores de  $c_3$  e de velocidade adequados.

## 5.7. Conclusões

Os resultados obtidos nestas simulações mostram que o software CORSIM pode ser usado como ferramenta de estudo para este projeto se for ajustado de forma adequada.

As duas simulações evidenciaram que o software CORSIM não representa o fenômeno das duas capacidades. Já o efeito de retenção pôde ser notado em ambas as simulações.

Porém, a segunda simulação, com seus cinco casos, permitiu entender como alterar certos parâmetros de modo a se ter uma retenção desejada e um consequente fluxo máximo na via.

De qualquer forma, deve haver uma calibração e, portanto, diversas simulações, para que se determinem os valores mais adequados dos parâmetros a serem inseridos, já que as expressões dadas neste documento não se mostraram precisas.

Assim, pode-se concluir que o CORSIM exige ajustes para se tornar uma boa ferramenta de estudo. Deve ainda ser levada em conta a necessidade de calibração de parâmetros.

## 6. CRIAÇÃO DA MALHA DE ESTUDO

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.

Como ponto de partida, deve-se ter uma malha (usando o mesmo software, CORSIM), capaz de representar a região da forma mais fiel possível. Abaixo, está uma figura que mostra a malha (com a imagem de região ao fundo) e alguns veículos em tráfego.



**Figura 6-1: Representação do objeto de estudo no ambiente do software CORSIM**

A Figura 6-1 mostra uma representação feita a partir do visualizador do CORSIM (o TRAFVU). Os trechos em cinza são a superposição da representação gerada sobre a imagem obtida do *Google Earth*.

Pode-se notar que, na Figura 6-1 anterior, há uma região marcada na cor vermelha. Trata-se de um ramal de entrada de veículos que não existe na realidade. Devido às limitações do software, esse ramal teve de ser inserido para que a malha pudesse ser gerada sem erros. Algumas opções de adaptação estavam disponíveis e esta representação foi aquela que poderia gerar menor quantidade de erros no que diz respeito aos resultados das simulações.

Tendo-se esse ramal em excesso, é necessário indicar que o fluxo de veículos que entra no trecho a partir dele é nulo (ou quase nulo, já que o software não permite entradas nulas). Desta forma, a sua existência no modelo adotado não deve interferir nos resultados das simulações a serem realizadas.

## 6.1. Obtenção de Dados

O primeiro passo para uma simulação mais real da situação é a obtenção dos dados da forma mais precisa possível. Para isso, foi feita uma pesquisa em campo, em que se gravaram alguns minutos do escoamento do tráfego no local de estudo e se contou o número de veículos que passaram pela via na gravação.

Essa gravação foi feita no dia 26/10/2010 às 7:40 da manhã. Foram gravados trechos de quinze minutos para que valores mais precisos de fluxo fossem obtidos.

As regiões analisadas estão indicadas por números e setas nas figuras que seguem (Figura 6-2 e Figura 6-3) e estão dispostas na primeira coluna da Tabela 6-1 abaixo. A segunda coluna apresenta a quantidade de veículo que passou em cada uma dessas regiões no período de quinze minutos mencionado. Por fim, tem-se o fluxo resultante no trecho.

As Figuras 6-2 e 6-3 abaixo mostram a disposição das regiões. A Figura 6-2 é uma imagem do trecho anterior à ponte.



**Figura 6-2: Imagem capturada de um dos vídeos gravados - trecho anterior à ponte**

A Figura 6-3 é uma imagem do trecho posterior à ponte.



**Figura 6-3: Imagem capturada de um dos vídeos gravados – trecho posterior à ponte**

A Tabela 6-1 a seguir mostra os dados coletados.

**Tabela 6-1: Tabela de dados obtidos em campo**

Região	Quantidade	Fluxo Médio
Expressa (1)	2516	10064 v/h
Local (2)	812	3248 v/h
Jockey (3)	37	148 v/h
Entrada (4)	579	2316 v/h
Ponte (5)	554	2216 v/h
Chegada (1+2+3)	3365	13460 v/h

Com esses dados, pode-se concluir que, em um dia útil, no pico da manhã, passam na Marginal Pinheiros, até a região da ponte Cidade Jardim, cerca de 13460 v/h.

Observou-se que este valor está abaixo do limite de capacidade da via, mas o trecho de entrelaçamento da pista local mostra já uma sensível redução da velocidade.

## 6.2. Análise de Dados

Nas imagens acima, podemos notar que há três bifurcações diferentes deste trecho.

Primeiramente, os veículos se separam entre a pista local e a pista expressa (1). Depois, há separação entre a seção Jockey (3) e o que restou da pista local (2) e, por fim, entre a local (2) e a seção Ponte (5).

Para o modelo, é importante saber a fração de veículos que segue e aquela que parte para outro caminho, em cada uma das bifurcações. A partir dos dados acima, representando cada valor da Tabela 6-1 (coluna 2) pelo número referente à região, tem-se:

- Expressa/local+Jockey:

$$\text{expressa} = \frac{1}{1 + 2 + 3} = \frac{2516}{3365} = 75\%$$

$$\text{local + jockey: } \frac{2 + 3}{1 + 2 + 3} = \frac{812 + 337}{3365} = 25\%$$

- Local/Jockey:

$$\text{Local} = \frac{2}{2 + 3} = \frac{812}{849} = 93\%$$

$$\text{Jockey} = \frac{3}{2 + 3} = \frac{37}{849} = 7\%$$

- Local/Ponte:

$$\text{Ponte} = \frac{5}{2 + 4} = \frac{554}{1391} = 40\%$$

$$\text{Local} = 60\%$$

Essas proporções devem ser indicadas em cada nó do modelo onde há separação de pistas para que o software possa direcionar a quantidade correta de veículos para cada lado no decorrer da simulação.

No entrelaçamento da pista local, é importante estabelecer a chamada matriz de origem-destino, que permite considerar diferentes trajetos em uma mesma região. Por exemplo,

o veículo que se aproxima do entrelaçamento (região que une a pista local com os veículos que chegam à Marginal) pode seguir em frente, continuando na Marginal, ou sair da Marginal, utilizando a alça de acesso à ponte Cidade Jardim. O congestionamento que ocorre no entrelaçamento é consequência, justamente, deste cruzamento de trajetos. Se for considerado, simplesmente, que 40% dos veículos deixam a pista local da Marginal para pegar a ponte Cidade Jardim, conclusões muito erradas serão tiradas do software.

De forma mais direta, a simulação resultante dessa consideração leva a uma situação no entrelaçamento não observada na realidade, ou seja, uma ausência de congestionamento nessa região da via. Isso ocorre, pois não há necessidade de um veículo que chega pela pista local da marginal sair pela alça de acesso à ponte se este pode fazer parte dos 60% que seguem adiante.

Assim, é de extrema importância indicar o trajeto dos veículos. Porém, houve falha no planejamento da análise das gravações, visto que essa importância não tinha sido detectada até então. De qualquer forma, essa falha poderia ter sido compensada por novas análises, as quais não foram feitas. Por isso, nessa simulação, foram atribuídos valores estimados e não precisamente contados nos vídeos.

Inicialmente, devem-se indicar as proporções referentes à separação entre pista local e pista expressa que, a partir dos cálculos anteriores, determinou-se que 75% dos veículos seguem em frente pela pista expressa e 25%, pela pista local. Considerando o fato de dois nós estarem gerando os veículos da simulação devido ao limite do software de cinco faixas por trecho, deve-se pensar na maneira como os veículos gerados nas duas faixas da direita podem chegar à pista expressa. As simulações mostraram que essa situação não é desprezível, dado que houve retenção de demanda devido aos veículos que paravam antes da bifurcação para poder se deslocar para a pista expressa ou, ao contrário, do lado esquerdo da via para a pista local. Assim, considerando a proporção já calculada e o fluxo de entrada por cada nó, ficou definido que 88% dos veículos gerados nas duas faixas da extrema direita (dentre as sete totais) seguiriam pela pista local e apenas 12% cruzariam para chegar à pista expressa. Por outro lado, todos os

veículos gerados nas cinco faixas da esquerda (dentre as sete totais) seguiriam pela pista expressa. Os 12% dos veículos gerados nas duas faixas da direita correspondem aos 25% que seguem pela pista local.

Da mesma forma, essa indicação de trajeto deve ser feita com os veículos que, na pista local, vão seguir adiante na Marginal, vão sair pela lateral antes do entrelaçamento (saída 1) ou que vão sair pela alça de acesso à ponte Cidade Jardim. Considerando as proporções calculadas anteriormente, ficou definido que 4% dos veículos que pegam a pista local saem pela saída 1, 77% segue adiante na Marginal e 19% sai pela alça em direção à ponte.

### 6.3. Resultados de Simulação

Os dados obtidos foram entrados na malha criada e a simulação de aplicação foi então realizada. A imagem a seguir mostra um trecho da malha durante a reprodução da simulação.



**Figura 6-4: Reprodução de parte da malha durante simulação com indicação de trechos de estudo e seções de controle**

Os casos interessantes para análise foram gerados a partir de incidentes na via, dada a observação de que a demanda medida está abaixo da capacidade da via. Uma simulação como essa gera diversos tipos de resultados, como fluxos e velocidades, por exemplo. Além disso, têm-se vários trechos passíveis de ser analisados. Como não é possível indicar aqui todos os resultados obtidos, serão analisadas as questões mais relevantes.

Foram simulados nove casos diferentes, 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, têm-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), rampa (três faixas – trecho V) e ponte (seis 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 do trecho de entrelaçamento.

Os nove casos simulados estão descritos a seguir:

- 1) Sem incidentes e sem controle;
- 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  $60 \text{ km/h}$  (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  $50 \text{ km/h}$  (para retenção de 18% da demanda) em trecho anterior com sete faixas;
- 6) Sem incidentes e com controle ALINEA na rampa;
- 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.

Os resultados serão dispostos na forma da tabela. Será apresentada uma tabela para cada região estudada, na qual haverá quatro colunas representando, nesta ordem: fluxo total, fluxo por faixa, velocidade média e tempo de viagem médio. Serão apresentadas, também, nove linhas, cada uma referente a cada um dos nove casos citados acima.

Fluxos totais e por faixa são referentes a um dado trecho da região, enquanto que velocidade média e tempo de viagem médio são referentes à região como um todo.

O experimento 0 corresponde ao caso 1 e se refere a uma situação normal de trânsito. Este serve para calibrar a simulação de aplicação.

O experimento 1 corresponde aos casos 2, 3, 4 e 5, cuja característica principal é a presença de um incidente na pista expressa (trecho II). O caso 2 mostra que há saturação na pista expressa, enquanto que o caso 3 introduz o efeito de perda de capacidade. O caso 4 é uma primeira tentativa de se reter demanda, em que se reduz a velocidade de um trecho para  $60 \text{ km/h}$  bem como o valor de  $c_3$  deste trecho. O caso 5 também apresenta uma de retenção de demanda, porém a velocidade do trecho fica em  $50 \text{ km/h}$  e não em  $60 \text{ km/h}$ , tentando-se assim um resultado mais eficiente.

O experimento 2 corresponde ao caso 6 e se refere a um caso sem incidentes, mas com ALINEA funcionando no entrelaçamento de modo a ver qual o comportamento do tráfego em um caso normal com controle por rampa.

O experimento 3 corresponde aos casos 7, 8 e 9, cuja característica principal é a presença de um incidente no entrelaçamento. O caso 7 mostra que há saturação na pista local, enquanto que o caso 8 introduz o efeito de perda de capacidade. O caso 9 é uma tentativa de controle, utilizando para isso o ALINEA, de modo a se tentar reduzir o congestionamento na região.

A Tabela 6-2 apresenta os dados referentes ao trecho anterior à bifurcação, onde, em alguns casos, é observada a demanda injetada na via. Em outros casos, isso não ocorre devido à fila gerada pelo congestionamento quando esta atinge os trechos desta região ou quando o controle seletivo de velocidade adota um limite de velocidade determinado para reter demanda nesta seção de alimentação de forma a impedir a saturação da via no gargalo adiante.

**Tabela 6-2: 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

Para essa região, os fluxos são referentes ao trecho logo anterior à bifurcação, enquanto que os cálculos de velocidade e de tempo de viagem consideram mais três trechos anteriores a esse. Quando se consideram os casos em que há retenção de demanda em um dos quatro trechos dessa região, essa informação é relevante porque, como se tratam de tempos e velocidades médias, todos os trechos envolvidos têm seu peso no valor final.

A Tabela 6-3 apresenta os dados referentes à região da pista expressa (trecho II). É nessa região que se encontra o incidente da pista expressa, porém os fluxos indicados são referentes a um trecho anterior ao do incidente.

**Tabela 6-3: 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

Na região da pista expressa, não há retenção de demanda. Assim, apesar de os fluxos terem sido calculados no segundo trecho dessa região, não haverá grandes diferenças entre os fluxos de cada trecho. Este trecho se estende da separação entre pistas expressa e local até um trecho próximo à ponte, ainda na pista expressa.

A Tabela 6-4 apresenta os dados referentes à região da pista local, entre a separação com a pista expressa (trecho II) e a chegada ao entrelaçamento.

**Tabela 6-4: Resultados das simulações para a região da pista local**

<i>Região: pista local – trecho III (287 m)</i>					
Caso	Fluxo Total (v/h)	Fluxo por faixa (v/h/f)	v (km/h)	Tempo viagem (s)	Veículo-Hor
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

Para esta região da malha, valem as mesmas considerações feitas para a região da pista expressa. Como não há retenção de demanda, os fluxos por faixa podem ser considerados os mesmos. Esta região se estende da bifurcação entre pistas expressa e local até o trecho anterior ao entrelaçamento.

A Tabela 6-5 apresenta os dados referentes à região do entrelaçamento. Este é o trecho em que, para os casos 7, 8 e 9, há incidente logo embaixo da ponte.

**Tabela 6-5: 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-Horário</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

Essa região é composta de apenas um trecho. Assim, os valores médios de velocidade e tempo de viagem e os valores de fluxo se referem, todos, ao único trecho considerado, o entrelaçamento.

A Tabela 6-6 apresenta os dados referentes ao ramal, região que leva os veículos da ponte ao entrelaçamento. Nessa região, há atuação do controle ALINEA para os casos 6 e 9.

**Tabela 6-6: 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</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

Os valores de fluxo, nesse caso, são referentes ao trecho da rampa que se une à Marginal, que possui duas faixas, enquanto que o resto da região possui três faixas. Como explicado anteriormente, isso ocorre devido à limitação nos parâmetros da estratégia ALINEA embutida no software.

A Tabela 6-7 apresenta os resultados referentes à região anterior ao ramal, onde há opção de seguir sentido o bairro do Morumbi ou seguir para a Marginal Pinheiros.

**Tabela 6-7: 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</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

Como no caso da região da pista local ou da pista expressa, como não há retenção, os fluxos podem ser considerados os mesmo em cada trecho desta região.

A seguir, estão os comentários acerca destes resultados para cada experimento computacional (as simulações de aplicação). Em todos os casos, os incidentes são gerados automaticamente pelo CORSIM, definindo-se a faixa afetada, o instante de início e a duração do incidente. Em todos os casos, o período de simulação tem uma hora, o incidente inicia-se após 10 minutos e tem duração de 20 minutos. Portanto, os resultados incluem a formação do congestionamento e a normalização do tráfego.

É importante deixar claro que os resultados apresentados nas tabelas anteriores 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.

Como mostram os resultados acima, a variância é maior no trecho do entrelaçamento em relação aos outros trechos da malha, assim como era esperado.

## 6.4. Análise de Resultados

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.

Como mostrado na Tabela 6-1, chegam da ponte Eusébio Matoso cerca de 13460  $v/h$ . Para a pista expressa, tem-se um fluxo de 10064  $v/h$  e, para a pista local, 3248  $v/h$ . Por outro lado, tem-se, na rampa de acesso à Marginal, um fluxo de 2316  $v/h$ . Somando, tem-se, para o entrelaçamento, um fluxo de 5564  $v/h$ .

Da simulação, para as regiões indicadas acima, na mesma ordem, têm-se os seguintes fluxos: 13357,07  $v/h$  (Tabela 6-2), 10278,30  $v/h$  (Tabela 6-3), 3079,71  $v/h$  (Tabela 6-4) e 2267,46  $v/h$  (Tabela 6-6). No entrelaçamento (Tabela 6-5), tem-se um fluxo, consequência da união da pista local com a rampa, de 5273,93  $v/h$ . Portanto, os fluxos estão adequadamente reproduzidos.

Quanto às velocidades médias, têm-se: 85,07  $km/h$  (Tabela 6-2), 81,98  $km/h$  (Tabela 6-3), 55,75  $km/h$  (Tabela 6-4) e 62,03  $km/h$  (Tabela 6-6) e 39,18  $km/h$  (Tabela 6-5). Comparando os dados de campo com os da simulação, nota-se uma grande proximidade e coerência de valores, particularmente a redução de velocidade no entrelaçamento.

Quanto aos fluxos, os resultados são os esperados, já que o CORSIM foi calibrado para gerar estes resultados. Quanto à velocidade, na região de sete faixas, onde o limite de velocidade é 90  $km/h$ , encontra-se uma média de velocidade de 85  $km/h$ . Já na pista expressa, com cinco faixas, com mesmo limite de velocidade, a velocidade verificada cai levemente para 82  $km/h$ . Por outro lado, logo após a separação entre as pistas expressa e local, na região da pista local, a velocidade média cai para 56  $km/h$ , bem abaixo do limite de 70  $km/h$  para este trecho. Esta queda pode ser explicada pelo congestionamento no entrelaçamento, que reduz a velocidade neste trecho e, consequentemente, gera fila nos trechos anteriores, reduzindo também a velocidade nestes trechos (é a redução de velocidade no entrelaçamento).

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. A Figura 6-5 abaixo ilustra o incidente na pista.



**Figura 6-5: Ilustração de um incidente na pista expressa**

Na Figura 6-5 acima, a área vermelha, na parte inferior da imagem, representa o incidente. Os veículos vêem isso como um bloqueio na pista e devem, portanto, desviar para seguir adiante.

O segundo caso simula um bloqueio na pista expressa, como mostrado acima, na faixa da extrema direita, logo embaixo da ponte. Espera-se que isso gere um congestionamento, reduzindo o fluxo escoado e, principalmente, a velocidade na região. Este bloqueio gera fila nos trechos anteriores a ele, a qual se estende até a região de sete faixas. Isso faz com que não só a pista expressa seja prejudicada, como também a pista

local. Por outro lado, o entrelaçamento acaba sendo beneficiado pelo bloqueio da pista expressa, já que isso faz com que a demanda no entrelaçamento seja reduzida devido à dificuldade dos veículos lá chegarem em condição normal de operação. O fluxo fica reduzido e a velocidade também, o que reduz o efeito de congestionamento no entrelaçamento.

Os detalhes do caso 2 serão omitidos aqui, visto que os dados do caso 3 é que serão bases para comparação.

No caso 3, a geração desta fila faz com que, na região de sete faixas, o fluxo caia de  $13357 \text{ v/h}$  para  $11929 \text{ v/h}$ , a velocidade caia de  $85 \text{ km/h}$  para  $34 \text{ km/h}$  e o tempo de viagem aumente de  $19 \text{ s}$  para  $48 \text{ s}$ . Na pista expressa, o efeito também é importante: o fluxo caiu de  $10278 \text{ v/h}$  para  $9005 \text{ v/h}$ , a velocidade caiu de  $82 \text{ km/h}$  para  $36 \text{ km/h}$  e o tempo de viagem subiu de  $24 \text{ s}$  para  $54 \text{ s}$ . Na pista local, o efeito da fila foi menos importante, levando a uma queda no fluxo de  $3079 \text{ v/h}$  para  $2834 \text{ v/h}$ , mas sem queda na velocidade nem aumento no tempo de viagem. Como comentado anteriormente, a condição de operação do entrelaçamento melhorou, mesmo que levemente, com uma pequena redução no fluxo escoado (passando de  $5274 \text{ v/h}$  para  $5034 \text{ v/h}$ ), mas um pequeno aumento na velocidade e consequente redução no tempo de viagem. Na rampa e na ponte, não houve nenhuma influência no que diz respeito a fluxo escoado, velocidade média e tempo de viagem.

Este terceiro caso se trata de 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.

A queda foi simulada alterando-se a velocidade no trecho do bloqueio para  $60 \text{ km/h}$  e o valor de  $c_3$ , colocando um multiplicador de 158%, simulando assim uma queda de 11% na capacidade (a estimativa usual do efeito decorrente do fenômeno das duas capacidades é uma perda de 5% a 15%). 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 e 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  $60 \text{ km/h}$  (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.

Com essa retenção, observou-se um fluxo médio de  $12010 \text{ v/h}$  nas sete faixas ao invés dos  $13357 \text{ v/h}$  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  $11929 \text{ v/h}$  e chegando a  $12010 \text{ v/h}$ . 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  $36 \text{ km/h}$  e chegou a  $46 \text{ km/h}$ , e consequente redução no tempo de viagem, que caiu de 54 s para 42 s. Já na pista local, não houve grandes mudanças, mas apenas um fluxo ligeiramente maior pôde ser observado. No entrelaçamento, na rampa e na ponte, observam-se as mesmas coisas: variações pouco significativas de fluxo, velocidade e tempo de viagem.

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  $50 \text{ km/h}$ , 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. Porém, o objetivo da piora na região anterior é proposital, de forma que haja melhora no gargalo formado pela presença do bloqueio. Assim, houve melhora em relação ao caso anterior, mas não foi significativa. 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. O resultado relevante é correspondente ao caso 6 apenas, em comparação com o primeiro caso (ou seja, demanda normal sem nenhum bloqueio).

Neste sexto caso, deve-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, consequentemente, 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. A Figura 6-6 ilustra o incidente no entrelaçamento.



**Figura 6-6: Ilustração de um incidente na pista expressa**

Da mesma forma que na Figura 6-5, a área em vermelho, na parte inferior da Figura 6-6 acima, representa o bloqueio na pista da extrema direita do entrelaçamento.

O sétimo caso 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, 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  $39 \text{ km/h}$  para  $18 \text{ km/h}$  e o tempo de viagem sobe de  $10 \text{ s}$  para  $21 \text{ s}$ . Também, a rampa fica bastante prejudicada, com uma queda de velocidade média muito significativa, saindo de  $62 \text{ km/h}$  para  $10 \text{ km/h}$ . O tempo de viagem também sobe, saindo de  $15 \text{ s}$  para  $93 \text{ s}$  ou  $1 \text{ min } 33 \text{ s}$ . Conseqüentemente, a ponte sofre com queda de qualidade nas condições de operação: a velocidade média cai de  $61 \text{ km/h}$  para  $23 \text{ km/h}$  e o tempo de viagem sobe de  $11 \text{ s}$  para  $30 \text{ s}$ . Além disso, a pista local tem sua velocidade diminuída de  $56 \text{ km/h}$  para  $32 \text{ km/h}$  e o tempo de viagem aumentado de  $19 \text{ s}$  para  $33 \text{ s}$ . A região de sete faixas, devido à fila gerada por causa do bloqueio, sofre uma queda de velocidade razoável, que sai de  $85 \text{ km/h}$  e chega a  $56 \text{ km/h}$ , e há aumento considerável no tempo de viagem, que sai de  $19 \text{ s}$  e vai para  $29 \text{ s}$ .

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  $31 \text{ km/h}$  para  $39 \text{ km/h}$ , 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.

Uma vez que os dados tenham sido apresentados, é interessante se ter uma comparação mais direta dos casos mais relevantes. Esses casos estão aos pares e são: 1x6, 3x4, 3x5, 8x9.

Os fluxos referentes a cada par são diferentes e, por isso, deve haver uma correção para que a comparação dos valores de veículo-hora possa ser feita corretamente.

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 6-8: Dados comparativos para os casos mais relevantes**

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).

Estes valores, decorrentes dos tempos de viagem, 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 6-8 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.

## 6.5. Conclusões

Nas simulações de aplicação anteriores 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 em 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 melhorias 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).

## 7. CONCLUSÃO

Este documento apresenta propostas para a melhoria do fluxo de veículos na via expressa da Marginal Pinheiros, em São Paulo. A melhoria deste fluxo não pode mais ser realizada a partir de reformas físicas do espaço já construído, devido à limitação de espaço e ao grande número de veículos que circulam nas ruas nos dias de hoje.

As propostas referem-se a métodos de controle de tráfego que possam reorganizar a maneira como o fluxo escoa e não o espaço disponível para tal. Duas técnicas de controle podem ser adotadas: controle de demanda nas rampas de acesso à Marginal e controle de demanda na própria Marginal.

Estas duas técnicas, juntas, podem permitir uma melhor eficiência do fluxo se comparada a uma técnica isolada. No que diz respeito ao controle de demanda nas rampas, pode-se distinguir dois métodos: controle local e controle coordenado. O controle coordenado, que envolve mais de uma rampa no esforço de reduzir congestionamentos e evitar gargalos, mostrou-se 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.

Para isso, foi usado o software de simulação microscópica chamado *CORSIM*. Este software simula o comportamento de veículos de forma individual, motivo pelo qual se trata de um simulador microscópico. 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.

Os fenômenos em questão são os 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. Quando não há congestionamento, o trecho apresenta um fluxo máximo de veículos capaz de escoar por

ele. No momento em que há congestionamento, o fluxo máximo cai, o que demonstra a queda na capacidade do trecho e o efeito das duas capacidades.

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.

Uma vez que o software foi verificado, uma malha de estudo foi gerada, tentando reproduzir da maneira mais fiel a região de estudo. Simulações foram realizadas e as estratégias de controle foram implementadas na região da Ponte Cidade Jardim, em São Paulo.

Para que os resultados deste trabalho estivessem mais próximos da realidade, uma pesquisa de campo foi realizada. Foram gravados vídeos do escoamento de veículos através da ponte Cidade Jardim de modo que se tenham valores de fluxo mais reais.

De posse destes dados, simulações foram realizadas na ponte Cidade Jardim. O que se notou foi 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. Dúvidas em relação ao seu comportamento no software e resultados duvidosos foram os motivos que colocaram a sua eficiência, neste projeto, em questão. Eventualmente, novas versões do software já tragam melhorias neste aspecto.

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.

## 8. ANEXO

A seguir, estão exemplos de arquivo de entrada do software CORSIM. O primeiro exemplo é referente ao caso 1 das simulações de aplicação. Os outros casos indicados abaixo são o 4 (com retenção de demanda e variação do valor do  $c_3$ ) e o 9, que contém a estratégia ALINEA junto de um bloqueio no entrelaçamento.

### 8.1. Caso 1

```

Created by TSIS Fri Dec 10 15:21:55 2010 from TNO Version 61
12345678 1 2345678 2 2345678 3 2345678 4 2345678 5 2345678 6 2345678 7 234567
          10 162009      0      1
          1   0   0   3    7981 0000   0      8 700      7781    7581   2
3600
          60
          0   0   0   0   0   0   0   0   0   0   0
47  2 20 3760 5 93 376103 376      110
17  1 35 2620 5
3   4 23 1860 5
9   1 35 1241 2      10
8003 6 8 1 2
37  7 17 1050 5
6   8 9 1401 2
8   9 1 2001 2
49  18 25 1471 2      10
22  3 4 2230 5
20  21 22 2060 5
21  22 3 1640 5
4   23 24 1820 5
23  248002 3270 5
25  26 27 1640 4 93 164      1 9
26  278005 2450 4
30  288007 861 2
26  31 34 951 2
5   18 25 1700 2
11  5 18 1660 2
29  138004 1471 1
11  29 13 1461 1
34  30 28 931 2
31  34 30 801 2
1   35 48 2600 5 93 260103 260
2   20 21 4700 5
2   15 10 1461 2      6
8008 14 15 0 1
14  15 10 1830 1
15  10 16 1420 1 63 142 73 142
10  16 11 1660 3
16  11 5 1520 2      1 1
7   17 1 1760 5
8001 37 7 0 5
18  25 26 3460 3 93 346103 346      2
44  12 45 980 3 93 98103 98      110
12  36 38 1321 3
36  38 39 1101 3
38  39 19 1001 3
8006 40 41 0 5
40  41 42 1280 5
41  42 43 1180 5
42  43 44 1080 5
43  44 12 1830 5      10
45  468009 1240 3

```

12	45	46	1680	3		1		19
48	47	2	4320	5 93	432103	432	1	19
35	48	47	4190	5 93	419103	419	1	19
19	49	18	1991	3		1		19
39	19	49	1601	3		1		19
47	2	0 0	0	11056	300	300		100 20
17	1	0 0	0	11056				100 20
3	4	0 0	0	11056				100 20
9	1	0 0	0	11056				100 20
8003	6	0 0	0	11056				20
37	7	0 0	0	11056				100 20
6	8	0 0	0	11056				100 20
8	9	0 0	0	11056				100 20
49	18	0 0	0	11043				100 20
22	3	0 0	0	11056				100 20
20	21	0 0	0	11056				100 20
21	22	0 0	0	11056				100 20
4	23	0 0	0	11056				100 20
23	24	0 0	0	11056				100 20
25	26	0 0	0	11043	1200	1200		100 20
26	27	0 0	0	11043				100 20
30	28	0 0	0	11034				100 20
26	31	0 0	0	11043				100 20
5	18	0 0	0	11043				100 20
11	5	0 0	0	11043				100 20
29	13	0 0	0	11034				100 20
11	29	0 0	0	11034				100 20
34	30	0 0	0	11034				100 20
31	34	0 0	0	11034				100 20
1	35	0 0	0	11056			37 330	100 20
2	20	0 0	0	11056				100 20
2	15	0 0	0	11056				100 20
8008	14	0 0	0	11065				20
14	15	0 0	0	11065				100 20
15	10	0 0	0	11056			431500	100 20
10	16	0 0	0	11043				100 20
16	11	0 0	0	11043	55	2500		100 20
7	17	0 0	0	11056				100 20
8001	37	0 0	0	11056			431500	100 20
18	25	0 0	0	11043				100 20
44	12	0 0	0	11043	600	600		100 20
12	36	0 0	0	11043				100 20
36	38	0 0	0	11043				100 20
38	39	0 0	0	11043				100 20
8006	40	0 0	0	11043				20
40	41	0 0	0	11043				100 20
41	42	0 0	0	11043				100 20
42	43	0 0	0	11043				100 20
43	44	0 0	0	11043				100 20
45	46	0 0	0	11065				100 20
12	45	0 0	0	11065				100 20
48	47	0 0	0	11056				100 20
35	48	0 0	0	11056				100 20
19	49	0 0	0	11065				100 20
39	19	0 0	0	11065				100 20
47	2	20	75	15 25				25
17	1	35	100					25
3	4	23	100					25
9	1	35	100					25
8003	6	8	100					25
37	7	17	100					25
6	8	9	100					25
8	9	1	100					25
49	18	25	100					25
22	3	4	100					25
20	21	22	100					25
21	22	3	100					25
4	23	24	100					25
23	248002	100						25
25	26	27	60	31 40				25



5	1215	1126	195
18	1251	960	195
19	954	1032	195
20	1155	1423	195
21	1243	1237	195
22	1299	1083	195
23	1381	503	195
24	1301	186	195
25	1323	622	195
26	1297	460	195
27	1249	220	195
28	1083	513	195
31	1225	398	195
11	1138	1273	195
13	989	1080	195
15	922	1679	195
29	1128	1127	195
30	1112	432	195
34	1159	352	195
35	381	2932	195
10	991	1555	195
14	747	1733	195
16	1071	1409	195
17	165	3407	195
37	50	3663	195
12	1134	607	195
36	1032	690	195
38	965	777	195
39	938	873	195
40	1769	612	195
41	1641	611	195
42	1523	612	195
43	1415	609	195
44	1232	601	195
45	966	610	195
46	843	623	195
47	738	2159	195
48	547	2547	195
49	1150	1067	195
1	0	0	210

```
<AdditionalData>
<BitmapBackgroundPath>cj2.bmp</BitmapBackgroundPath>
<BitmapBackgroundBounds><MinX>-1310</MinX><MinY>-1678</MinY><MaxX>5846</MaxX><MaxY>3105</MaxY></BitmapBackgroundBounds>
</AdditionalData>
```

## 8.2. Caso 4

```

Created by TSIS Fri Dec 10 15:29:58 2010 from TNO Version 61
12345678 1 2345678 2 2345678 3 2345678 4 2345678 5 2345678 6 2345678 7 2345678
                                                 10 162009
                                                 0   1
      1   0   0   3     7981 0000  0     8 700     7781    7581  2
3600
      60
      0   0   0   0   0   0   0   0   0   0   0
47  2 20 3760 5 93 376103 376     110
17  1 35 2620 5
3   4 23 1860 5
9   1 35 1241 2     10
8003 6 8 1 2
37 7 17 1050 5
6   8 9 1401 2
8   9 1 2001 2
49 18 25 1471 2     10
22 3 4 2230 5
20 21 22 2060 5
21 22 3 1640 5
4   23 24 1820 5
23 248002 3270 5
25 26 27 1640 4 93 164     1 9
26 278005 2450 4
30 288007 861 2
26 31 34 951 2
5   18 25 1700 2
11 5 18 1660 2
29 138004 1471 1
11 29 13 1461 1
34 30 28 931 2
31 34 30 801 2
1   35 48 2600 5 93 260103 260
2   20 21 4700 5
2   15 10 1461 2     6
8008 14 15 0 1
14 15 10 1830 1
15 10 16 1420 1 63 142 73 142
10 16 11 1660 3
16 11 5 1520 2     1 1
7   17 1 1760 5
8001 37 7 0 5
18 25 26 3460 3 93 346103 346
44 12 45 980 3 93 98103 98
12 36 38 1321 3
36 38 39 1101 3
38 39 19 1001 3
8006 40 41 0 5
40 41 42 1280 5
41 42 43 1180 5
42 43 44 1080 5
43 44 12 1830 5
45 468009 1240 3
12 45 46 1680 3
48 47 2 4320 5 93 432103 432
35 48 47 4190 5 93 419103 419
19 49 18 1991 3
39 19 49 1601 3
47 2 0 0 0 11056     300     300
17 1 0 0 0 11056
3   4 0 0 0 11056
9   1 0 0 0 11056
8003 6 0 0 0 11056
37 7 0 0 0 11056
6   8 0 0 0 11056
8   9 0 0 0 11056
49 18 0 0 0 11043

```

22	3	0	0	0	11056			100	20
20	21	0	0	0	11056			100	20
21	22	0	0	0	11056			100	20
4	23	0	0	0	11056			100	20
23	24	0	0	0	11056			100	20
25	26	0	0	0	11043	1200	1200	100	20
26	27	0	0	0	11043			100	20
30	28	0	0	0	11034			100	20
26	31	0	0	0	11043			100	20
5	18	0	0	0	11043			100	20
11	5	0	0	0	11043			100	20
29	13	0	0	0	11034			100	20
11	29	0	0	0	11034			100	20
34	30	0	0	0	11034			100	20
31	34	0	0	0	11034			100	20
1	35	0	0	0	11037			37	330
2	20	0	0	0	11056			100	20
2	15	0	0	0	11056			100	20
8008	14	0	0	0	11065				20
14	15	0	0	0	11065			100	20
15	10	0	0	0	11056			431500	100
10	16	0	0	0	11043			100	20
16	11	0	0	0	11043	55	2500	100	20
7	17	0	0	0	11056			100	20
8001	37	0	0	0	11056				20
18	25	0	0	0	11043			431500	100
44	12	0	0	0	11043	600	600	100	20
12	36	0	0	0	11043			100	20
36	38	0	0	0	11043			100	20
38	39	0	0	0	11043			100	20
8006	40	0	0	0	11043				20
40	41	0	0	0	11043			100	20
41	42	0	0	0	11043			100	20
42	43	0	0	0	11043			100	20
43	44	0	0	0	11043			100	20
45	46	0	0	0	11065			100	20
12	45	0	0	0	11065			100	20
48	47	0	0	0	11056			100	20
35	48	0	0	0	11056			100	20
19	49	0	0	0	11065			100	20
39	19	0	0	0	11065			100	20
47	2	20	75	15	25				25
17	1	35	100						25
3	4	23	100						25
9	1	35	100						25
8003	6	8	100						25
37	7	17	100						25
6	8	9	100						25
8	9	1	100						25
49	18	25	100						25
22	3	4	100						25
20	21	22	100						25
21	22	3	100						25
4	23	24	100						25
23	24	8002	100						25
25	26	27	60	31	40				25
26	27	8005	100						25
30	28	8007	100						25
26	31	34	100						25
5	18	25	100						25
11	5	18	100						25
29	13	8004	100						25
11	29	13	100						25
34	30	28	100						25
31	34	30	100						25
1	35	48	100						25
2	20	21	100						25
2	15	10	100						25
8008	14	15	100						25
14	15	10	100						25



11	1138	1273	195
13	989	1080	195
15	922	1679	195
29	1128	1127	195
30	1112	432	195
34	1159	352	195
35	381	2932	195
10	991	1555	195
14	747	1733	195
16	1071	1409	195
17	165	3407	195
37	50	3663	195
12	1134	607	195
36	1032	690	195
38	965	777	195
39	938	873	195
40	1769	612	195
41	1641	611	195
42	1523	612	195
43	1415	609	195
44	1232	601	195
45	966	610	195
46	843	623	195
47	738	2159	195
48	547	2547	195
49	1150	1067	195
1	0	0	210

```
<AdditionalData>
<BitmapBackgroundPath>cj2.bmp</BitmapBackgroundPath>
<BitmapBackgroundBounds><MinX>-1310</MinX><MinY>-1678</MinY><MaxX>5846</MaxX><MaxY>3105</MaxY></BitmapBackgroundBounds>
</AdditionalData>
```

### 8.3. Caso 9

```

Created by TSIS Fri Dec 10 15:17:48 2010 from TNO Version 61
12345678 1 2345678 2 2345678 3 2345678 4 2345678 5 2345678 6 2345678 7 2345678
                                                 10 162009
                                                 0   1
      1   0   0   3     7981 0000  0     8 700     7781    7581  2
3600
      60
      0   0   0   0   0   0   0   0   0   0   0
47  2 20 3760 5 93 376103 376     110
17  1 35 2620 5
3   4 23 1860 5
9   1 35 1241 2     10
8003 6 8 1 2
37 7 17 1050 5
6   8 9 1401 2
8   9 1 2001 2
49 18 25 1471 2     10
22 3 4 2230 5
20 21 22 2060 5
21 22 3 1640 5
4   23 24 1820 5
23 248002 3270 5
25 26 27 1640 4 93 164     1 9
26 278005 2450 4
30 288007 861 2
26 31 34 951 2
5   18 25 1700 2
11 5 18 1660 2
29 138004 1471 1
11 29 13 1461 1
34 30 28 931 2
31 34 30 801 2
1   35 48 2600 5 93 260103 260
2   20 21 4700 5
2   15 10 1461 2     6
8008 14 15 0 1
14 15 10 1830 1
15 10 16 1420 1 63 142 73 142
10 16 11 1660 3
16 11 5 1520 2     1 1
7   17 1 1760 5
8001 37 7 0 5
18 25 26 3460 3 93 346103 346
44 12 45 980 3 93 98103 98
12 36 38 1321 3
36 38 39 1101 3
38 39 19 1001 3
8006 40 41 0 5
40 41 42 1280 5
41 42 43 1180 5
42 43 44 1080 5
43 44 12 1830 5
45 468009 1240 3
12 45 46 1680 3
48 47 2 4320 5 93 432103 432
35 48 47 4190 5 93 419103 419
19 49 18 1991 3
39 19 49 1601 3
47 2 0 0 0 11056     300     300
17 1 0 0 0 11056
3   4 0 0 0 11056
9   1 0 0 0 11056
8003 6 0 0 0 11056
37 7 0 0 0 11056
6   8 0 0 0 11056
8   9 0 0 0 11056
49 18 0 0 0 11043

```

22	3	0	0	0	11056			100	20
20	21	0	0	0	11056			100	20
21	22	0	0	0	11056			100	20
4	23	0	0	0	11056			100	20
23	24	0	0	0	11056			100	20
25	26	0	0	0	11043	1200	1200	100	20
26	27	0	0	0	11043			100	20
30	28	0	0	0	11034			100	20
26	31	0	0	0	11043			100	20
5	18	0	0	0	11043			100	20
11	5	0	0	0	11043			100	20
29	13	0	0	0	11034			100	20
11	29	0	0	0	11034			100	20
34	30	0	0	0	11034			100	20
31	34	0	0	0	11034			100	20
1	35	0	0	0	11056			37	330
2	20	0	0	0	11056			100	20
2	15	0	0	0	11056			100	20
8008	14	0	0	0	11065				20
14	15	0	0	0	11065				100
15	10	0	0	0	11056			431500	100
10	16	0	0	0	11043				20
16	11	0	0	0	11043	55	2500		100
7	17	0	0	0	11056				20
8001	37	0	0	0	11056			431500	100
18	25	0	0	0	11043				20
44	12	0	0	0	11043	600	600		100
12	36	0	0	0	11043				20
36	38	0	0	0	11043				100
38	39	0	0	0	11043				20
8006	40	0	0	0	11043				20
40	41	0	0	0	11043				100
41	42	0	0	0	11043				20
42	43	0	0	0	11043				100
43	44	0	0	0	11043				20
45	46	0	0	0	11065				100
12	45	0	0	0	11065				20
48	47	0	0	0	11056				100
35	48	0	0	0	11056				20
19	49	0	0	0	11065				100
39	19	0	0	0	11065				20
47	2	20	75	15	25				25
17	1	35	100						25
3	4	23	100						25
9	1	35	100						25
8003	6	8	100						25
37	7	17	100						25
6	8	9	100						25
8	9	1	100						25
49	18	25	100						25
22	3	4	100						25
20	21	22	100						25
21	22	3	100						25
4	23	24	100						25
23	24	8002	100						25
25	26	27	60	31	40				25
26	27	8005	100						25
30	28	8007	100						25
26	31	34	100						25
5	18	25	100						25
11	5	18	100						25
29	13	8004	100						25
11	29	13	100						25
34	30	28	100						25
31	34	30	100						25
1	35	48	100						25
2	20	21	100						25
2	15	10	100						25
8008	14	15	100						25
14	15	10	100						25



28	1083	513	195
31	1225	398	195
11	1138	1273	195
13	989	1080	195
15	922	1679	195
29	1128	1127	195
30	1112	432	195
34	1159	352	195
35	381	2932	195
10	991	1555	195
14	747	1733	195
16	1071	1409	195
17	165	3407	195
37	50	3663	195
12	1134	607	195
36	1032	690	195
38	965	777	195
39	938	873	195
40	1769	612	195
41	1641	611	195
42	1523	612	195
43	1415	609	195
44	1232	601	195
45	966	610	195
46	843	623	195
47	738	2159	195
48	547	2547	195
49	1150	1067	195
1	0	0	210

```
<AdditionalData>
<BitmapBackgroundPath>cj2.bmp</BitmapBackgroundPath>
<BitmapBackgroundBounds><MinX>-1310</MinX><MinY>-
1678</MinY><MaxX>5846</MaxX><MaxY>3105</MaxY></BitmapBackgroundBounds>
</AdditionalData>
```

## 9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. **Papageorgiou, Markos and Kotsialos, Apostolos.** Freeway Ramp Metering: An Overview. *IEEE - Transactions on Intelligent Transportation Systems*. n°4, 2002, Vol. 3.
2. **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.
3. **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.
4. **Carlson, Rodrigo Castelan, et al.** Variable Speed Limits as a Mainline Metering Device for Freeways. *TRB 2010 Annual Meeting CD-ROM*. 2010.
5. **Rakha, Hesham and Crowther, Brent.** Comparison and calibration of FRESIM and INTEGRATION steady-state car-following behavior. *Transportation Research Part A*. 2003, Vol. 37, pp. 1-27.
6. **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.
7. **Wang, Yibing, Messmer, Albert e Papageorigou, Markos.** Freeway Network Simulation and Dynamic Traffic Assignment with METANET Tools. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. 1776, 2007.