

DESEMPENHO DE PRAÇAS DE PEDÁGIO ATRAVÉS DE SIMULAÇÃO

Felipe Brum de Brito Sousa

Sousa Desenvolvimento Gerencial
MOB – Mobilidade em Transportes

RESUMO

Com o aumento da motorização nas áreas metropolitanas brasileiras observa-se o aumento de fluxos de tráfego nas rodovias, o que muitas vezes geram congestionamentos e atrasos nos tempos de viagens. Nas rodovias pedagiadas ocorre o mesmo fenômeno, gerando congestionamentos e filas no entorno das praças de pedágio. O surgimento dos softwares de microssimulação de tráfego, neste caso o software VISSIM, permitiu a simulação das praças de pedágio de forma a melhorar sua operação. Este trabalho tem como objetivo simular as praças de pedágio das concessionárias Empresa 1 e Empresa 2 (nomes mantidos em sigilo) de forma a propor soluções para melhorar sua operação, verificando o impacto nas filas e tempos de viagem com a redução dos tempos de arrecadação, aumento o percentual de pagamento automático, inclusão de novas cabines e crescimento do tráfego.

ABSTRACT

With the increase of motorization in the brazilian metropolitan areas there is an increase in traffic flows on the highways, which often leads to congestion and delays in travel times. In the toll roads, the same phenomenon occurs, generating congestion and queuing around the toll plazas. The advent of traffic microsimulation software, in this case the VISSIM software, allowed the simulation of the toll plazas in order to improve its operation. The objective of this work is to simulate the toll plazas of Company 1 and Company 2 (names confidential) in order to propose solutions to improve its operation, verifying the impact on queues and travel times with reduction of collection times, increase the percentage of automatic payment, inclusion of new cabins and traffic growth.

1 INTRODUÇÃO

A Concessionária Empresa 1 administra uma importante via expressa com 17,4 km de extensão. O contrato de concessão foi assinado em 1997. A Empresa 2, foi fundada no ano de 2000, com contrato de concessão firmado com o Governo do Estado por 35 anos abrangendo 217 km. Ambas possuem participação societária composta pelo Grupo A (sigiloso) com 91,5% e 8,5% do Grupo B (sigiloso).

Atualmente, essas duas concessionárias apresentam períodos pontuais de elevado tráfego em suas praças de pedágio, gerando filas e atrasos no deslocamento dos motoristas. Este trabalho objetiva simular o comportamento do tráfego das Praças de Pedágio da Empresa 1 e Empresa 2 usando o software Vissim, verificando o desempenho das diferentes soluções mitigadoras.

2 PROJETO E SIMULAÇÃO DE PRAÇAS DE PEDÁGIO

Bons projetos de praças de pedágio podem ter um impacto significativo no uso eficaz da infraestrutura e podem contribuir para o aumento da qualidade de vida dos moradores das áreas urbanas (Sadoun, 2005; Al-Deek *et al.*, 1997). Segundo Schaufler (1997), o projeto de uma praça de pedágio é determinado pela demanda de tráfego, perfil dos usuários, tipos de sistemas de pagamento, métodos de cobrança, programações de taxas de chegada e atendimento e localização da praça. Existem poucos guias ou diretrizes documentadas de projeto, fato que se tornou mais crítico com a implementação da cobrança eletrônica de pedágio (Stammer Jr. e McDonald Jr., 2001). Há muitos exemplos em que as praças de pedágio projetadas de forma inadequada causam transtornos aos viajantes e reduzem os benefícios de mobilidade que devem surgir de uma via expressa (Chakraborty *et al.*, 2016).

Ter padrões de design consistentes permite que os condutores experimentem uniformidade independentemente da localização da praça de pedágio. As inovações mais recentes têm o potencial de aumentar as velocidades dos veículos à medida que são processadas na praça e, assim, reduzir os comprimentos das filas de espera dos motoristas pagantes. Avanços no design também podem melhorar a segurança dos motoristas e trabalhadores das praças de pedágio. Em alguns casos, a nova tecnologia pode diminuir o número de cabines de pedágio necessárias para processar um número constante de veículos. Esses desenvolvimentos proporcionam benefícios monetários em potencial, reduzindo os custos de construção e operação, diminuindo o número de atendentes de pedágio (Stammer Jr. e McDonald Jr., 2001).

Estudo realizado para a agência norte-americana Oklahoma Turnpike concluiu que a adoção do pagamento eletrônico (AVI) baixou as concentrações de monóxido de carbono (CO) nas praças de pedágio com a redução das filas, marchas lentas e acelerações e desacelerações (Schaufler, 1997). O uso de pagamento automático também reduz os níveis de ruídos do tráfego, devido também à diminuição na aceleração dos veículos. Por outro lado, a cobrança eletrônica de pedágio criou novos desafios no projeto de instalações das praças. Além de lidar com altas velocidades, velocidades variáveis e congestionamento, outra dificuldade com a cobrança de pedágio eletrônico é a presença de violadores.

2.1. Teoria de Filas em Praças de Pedágio

Cabines de pedágio atuais aceitam dinheiro, cartões eletrônicos e pagamento automático. A vantagem neste caso é que se fornece mais flexibilidade operacional e, ao mesmo tempo, aumentam a eficiência (utilização) das cabines de pedágio. A desvantagem é que a ampla gama de tempos de serviço introduz variabilidade. A variabilidade nos tempos de serviço é uma das principais causas de surgimento de filas, essa desvantagem pode até superar o ganho de eficiência. Além disso, a eventual desordem criada pelos veículos cria oportunidades a motoristas agressivos. Uma outra opção a ser considerada é usar faixas especializadas de atendimento para manter a variabilidade por faixa no patamar mínimo. Um projeto melhor dá origem a uma variância de tempos de atendimento menor e um projeto ruim gera uma variância maior (Sadoun, 2005).

O fato de os veículos escolherem uma fila após avaliarem os comprimentos de fila de todas as faixas implica que o processo de chegada depende do comprimento de todas as outras filas. Esse processo de escolha cria uma dependência ou acoplamento entre as filas paralelas do sistema (Chakraborty et al., 2016). Segundo Hiramoto e Ito (2006), a seleção é baseada no lado esquerdo do tráfego, o que significa que os veículos têm tendência a selecionar a faixa mais externa.

À medida que os motoristas se aproximam das instalações do pedágio, eles naturalmente procuram a melhor opção de pista. A maioria dos motoristas entram em uma faixa de pedágio no mesmo lado de onde chegam na praça. Depois que os selecionam a metade da praça que desejam, eles selecionam a pista com a fila mais curta naquele lado. Alguns outros motoristas foram observados entrando na pista com a fila mais curta, independentemente do lado da estação de pedágio do qual eles chegam. Finalmente, uma pequena porcentagem de motoristas escolheu aleatoriamente uma faixa (Abdelwahab, 2016).

Conforme Chakraborty et al. (2016), as suposições usadas na formulação e na notação devem ser:

- Os veículos chegam de acordo com a distribuição de Poisson,
- Um veículo que chega escolhe uma faixa de pedágio ou fila, dependendo do estado do sistema (ou seja, dependendo dos comprimentos de fila em todas as faixas de pedágio),
- Quando um veículo se une a uma faixa de pedágio ou fila, ele não pode mudar para outra faixa de pedágio ou fila, e
- O tipo de veículo que chega não tem impacto no sistema de enfileiramento.

Na elaboração da teoria de filas os atrasos e filas antes e depois das cabines devem ser considerados (Gedizlioglu et al., 2014). Em algumas praças de pedágio o problema da fila está após a passagem das cabines e não antes como na maioria dos casos, caso por exemplo da Ponte Oakland-San Francisco. Semáforos podem ser aplicados a pistas individuais separadamente ou para grupos de faixas. Alternativamente, podem ser utilizadas barreiras físicas móveis para o controle de pistas individuais, por exemplo, na saída das praças (Papageorgiou et al., 2010).

Uma situação desordenada pode ser resultado de praças de pedágio onde diferentes métodos de pagamento coexistem. Neste caso, é uma questão política operacional distribuir ativamente entre os subgrupos de pistas correspondentes para equalizar tempos de espera ou favorecer alguns grupos de métodos de pagamento específicos (exemplo pagamento eletrônico) (Papageorgiou et al., 2010).

Conforme Hiramoto e Ito (2006) muitas vezes a solução passa pelo redesenho (*retrofit*) do layout da praça de pedágio, projetando um layout eficaz para reduzir os engarrafamentos. Muitas praças de pedágio foram projetadas e operadas antes da introdução do sistema automático. A questão é: Como projetar o layout para reduzir o tráfego e obter um desempenho mais eficiente? Apesar de existirem vários tipos de redesenho de layout de praças de pedágio possíveis de serem estudados, a reconstrução da praça nem sempre é possível por causa dos altos custos. Muitas vezes o que é possível fazer é refazer o regime de distribuição das faixas de chegada ao ingressarem no *taper* de expansão da praça, inclusive considerando diferentes meios de pagamento e classes de veículos nessa nova distribuição.

Schaufler (1997) propõe mais dois artifícios para organização das filas: cobrança conjunta em uma mesma fila (*"tandem toll booths"*) e cobrança ramificada ou subdividida (*"branch toll lanes"*). O conceito de pedágio em tandem, adotado por exemplo em 1981 na Golden Gate Bridge, envolve o uso de duas cabines manuais de pedágio colocadas em linha na mesma faixa de cobrança, processando simultaneamente os dois veículos. Já a cobrança ramificada em dois fornece ganho de 30% na taxa de arrecadação comparada à faixa manual convencional.

2.2. Parâmetros de Projeto

Stammer Jr. e McDonald Jr. (2001) sugerem medidas básicas para projeto de Praças de Pedágio. A Figura 1 mostra os parâmetros básicos presentes numa praça de pedágio. Schaufler (1997) também propõe medidas para os diferentes fatores de projeto de praças de pedágio. Por exemplo, observa-se que para vias de alta velocidade de projeto (120km/h) o comprimento mínimo proposto para o taper de chegada da praça é de 850 pés (255m). Schaufler (1997) também propõe os três tipos básicos de configuração de praças de pedágio:

i) duplo sentido com barreiras móveis; ii) praça com divisão física principal, e; iii) praça com via eletrônica expressa.

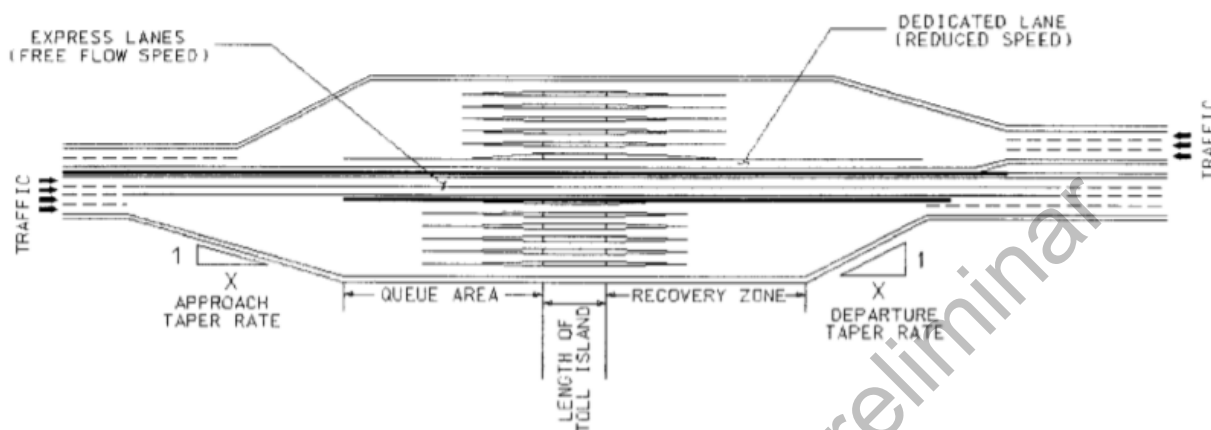


Figura 1: Parâmetros de Projeto de Praças de Pedágio (Stammer Jr. e McDonald Jr., 2001).

Nos sistemas com praças de via eletrônica expressa inúmeras medidas podem ser usadas para identificar, detectar e prevenir violações de pagamento, incluindo o seguinte (Schaufler, 1997):

- Instalação de alarmes sonoros e luzes vermelhas piscando em cima da via. Esses dispositivos são acionados quando um veículo que entrou em uma faixa de pedágio prossegue antes que a transação seja registrada.
- Instalação de cancelas automáticas. Esses dispositivos adicionam aproximadamente 1 a 1,5 segundos em casos de transações bem-sucedida;
- Monitorização das transações por meio de de cabine envidraçada. Esta técnica permite que o pessoal da operação e a polícia controlem periodicamente as transações e registrem os números das placas de violadores. Esta prática é usada na Garden State Parkway;
- Presença periódica de policiais em áreas de alta violação;
- Publicação dos nomes de violadores crônicos que foram identificados;
- Instalação de câmeras de vigilância.

Segundo Schauffer (1997), nos Estados Unidos dependendo da legislação estadual, para autuação uma foto simples de violação que contenha a placa traseira do veículo pode ser aceita (ex. Estado de Nova York). Outras jurisdições exigem foto da parte traseira do veículo, bem como o status do indicador de pagamento do usuário e o sinal de tráfego vermelho da via no momento da violação ou uma foto do motorista. Portanto, o design de uma via expressa é amplamente impulsionado por requisitos legais. As fotos normalmente são marcadas com hora, data, praça de pedágio, número da faixa e a natureza da violação, informações sobrepostas na foto.

Existem fatores relacionados à geometria da estrada e ao volume de tráfego das praças de pedágio que representariam desafios significativos para implantação de vias expressas automáticas. É necessário ter distância suficiente após a praça de pedágio para os motoristas voltarem para suas pistas e chegarem à velocidade da estrada antes de se fundirem com o tráfego das vias expressas. Além disso, se houver uma entrada ou saída muito próxima da praça de pedágio, os motoristas das rotas expressas não poderão acessá-la. Segundo Schauffer

(1997), operadores de pedágio localizam a coleta automatizada à esquerda, prestando o serviço completo de cobrança à direita. Este padrão tende a seguir a convenção da estrada, em que o tráfego mais rápido permanece na pista da esquerda.

Se as faixas expressas de alta velocidade forem necessárias, certifique-se as divisões de tráfego suportam seu uso, que são separadas por barreira com identificação adequada e que a coleta de pedágio é exclusivamente eletrônica (Stammer Jr. e McDonald Jr., 2001).

Quanto à sinalização de praças de pedágio norte-americanas (Schaufler, 1997), a maior parte da sinalização é colocada a 800m da praça de pedágio, com sinais de aviso começando de 800m a 1600m. Os avisos de restrição de velocidade iniciam tipicamente entre 800-1600m.

Abdelwahab (2016) realizou simulações usando Visual Basic.NET para determinar o número de cabines de pedágio, atraso médio e comprimento de fila, considerando o tráfego de chegada, número de cabines disponíveis e percentual de pagamento em dinheiro. À medida que o número de cabines de pedágio aumenta o tempo de processamento e de atraso diminui, o mesmo ocorre com o comprimento da fila. Schaufler (1997) também montou uma planilha com dados experimentais de capacidade de atendimento de 25 operadores de 58 praças de pedágio dos Estados Unidos, totalizando 180 a 550 veículos/h para vias manuais e de 500 a 1600 veículos/h para automáticas.

2.3. Microssimulação em Vissim

Conforme Abdelwahab (2016), os modelos microscópicos de simulação de tráfego surgiram com o crescente poder computacional dos computadores e sua capacidade de modelar a complexa dinâmica do fluxo de tráfego e da demanda. Benefícios da microssimulação sobre técnicas tradicionais de análise de tráfego são categorizadas em três áreas principais: clareza, precisão e flexibilidade.

O VISSIM é um software microscópico que serve para simular modelos de tráfego urbano e operações de transporte (Satria e Surbakti, 2018; Gedizlioglu et al., 2014). Este programa pode analisar o tráfego e os deslocamentos considerando restrições de modelagem, como layout geométrico, composição do tráfego, sinalização, linhas de parada, comportamento do motorista e outros. Tornando-se uma ferramenta útil para avaliar alternativas, permitindo a tomada de decisão acertiva e eficaz para o planejamento operacional de curto a longo prazo.

3 METODOLOGIA E PLANO DE TRABALHO

A Figura 2 resume as fases da metodologia realizada neste trabalho para o estudo de saturação de praça de pedágio. O processo começa com a revisão bibliográfica internacional sobre teoria de filas e design de praças de pedágio com problemas e soluções encontrados nos demais países. Depois são levantados os dados de tráfego, layout, e tempos de atendimento junto à concessionária para montagem da modelagem. Com base nisso se monta o cenário base de simulação no Vissim. Após a calibração do cenário base, iniciam-se os testes de cenários, obtendo-se resultados de tempo de viagem, atrasos e filas. A partir disso se propõe soluções para melhoria operacional.

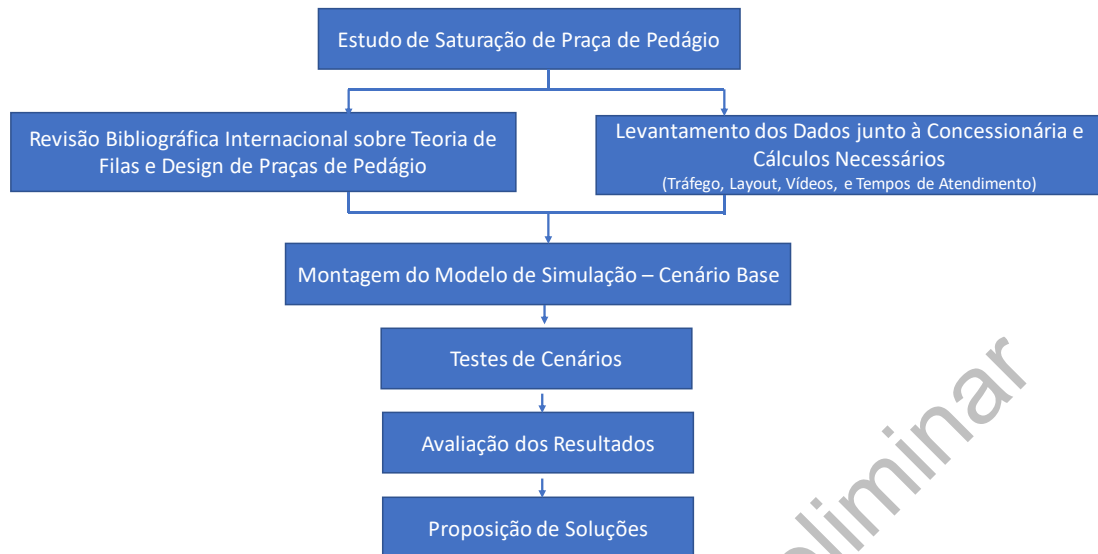


Figura 2: Metodologia Realizada.

O projeto de experimentos consistiu de 55 simulações para Empresa 1 (ver Figura 3) e 50 simulações para Empresa 2. No VISSIM, se faz necessário simular um mesmo *layout* diversas vezes, através da ferramenta chamada *Random Seed*. Esta ferramenta permite replicar a natureza estocástica do fluxo de tráfego e suas variações temporais no simulador, alterando o padrão de chegada de veículos. O indicado na literatura é no mínimo 5 replicações totalizando, portanto, 525 simulações ($55 \cdot 5 + 50 \cdot 5$). Dessa forma, é possível simular o mesmo *layout* representando vários dias assim como acontecimentos atípicos. Como exemplo, podemos ter na segunda-feira um VDM de 70 mil veículos, que gerou uma fila de congestionamento de “n” metros. Este mesmo VDM de 70 mil pode gerar uma fila completamente diferente na terça-feira. Por isso o simulador tem este artifício de testar várias vezes o mesmo cenário para garantir uma resposta conjunta mais adequada.

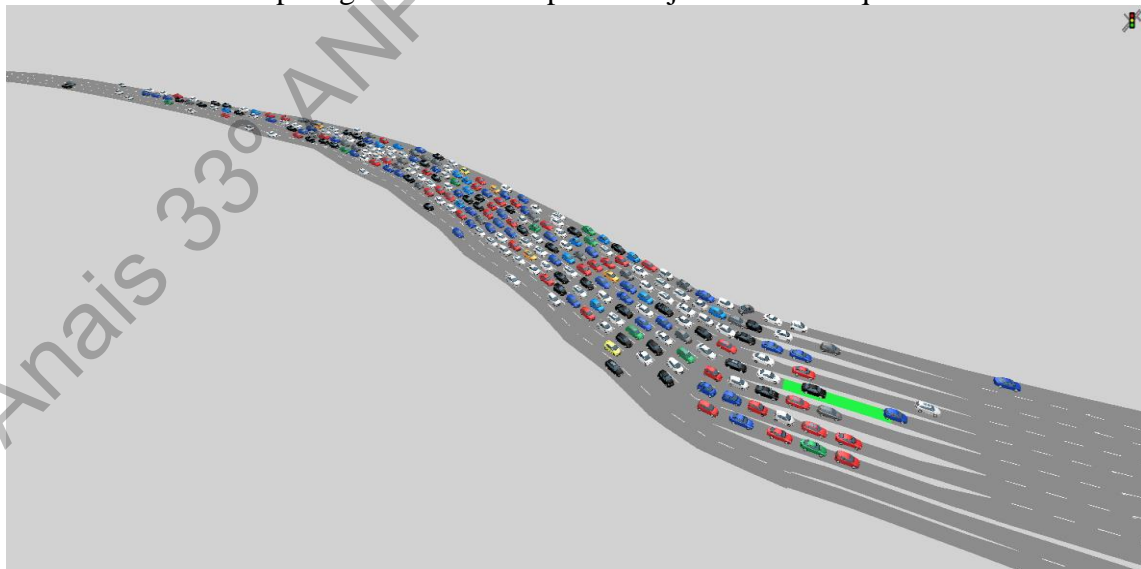


Figura 3: Simulação no VISSIM (Empresa 1).

A Figura 4, mostra uma imagem da Praça de Pedágio da Empresa 1. Observa-se que a mesma possui 150m (de Taper + Área de Fila) de um lado e 250m do outro, contudo conforme o referencial bibliográfico é necessário 500m de cada lado (250m de Taper e 250m de Área de

Fila). Este fato dificulta a visibilidade dos motoristas e o acomodamento dos veículos, restringindo a mudança de faixa e agravando as filas e os tempos de espera. O mesmo fato acontece com a Praça da Empresa 2, onde os dois lados possuem 130m (de Taper + Área de Fila).



Figura 4: Praça de Pedágio da Empresa 1 e medidas de Taper + Área de Fila.

Os dados de tráfego utilizados da Empresa 1 foram: Tráfego Horário por Pista e Sentido (01/Jan – 30/Set de 2018); Tráfego Histórico Mensal por Categoria (Jan/13 a Set/18); Perfil de Operação das cabines - Feriado (06-09/09/2018); Vídeos para calibração e cálculo da velocidade de fluxo livre - período 27-29/11/18; Tempos de Atendimento - por categoria e meio de pagamento calculados com dados de 06/09/2018 a 09/09/2018 (feriado saturado).

Conforme a Figura 5 da Empresa 1 (tráfego horário médio diário para dia mais carregado da semana), observa-se que o pico ocorre em dias úteis (quartas-feiras), entre 6hs e 12hs sentido 2 (vermelho). Este será o período considerado nas análises a seguir.

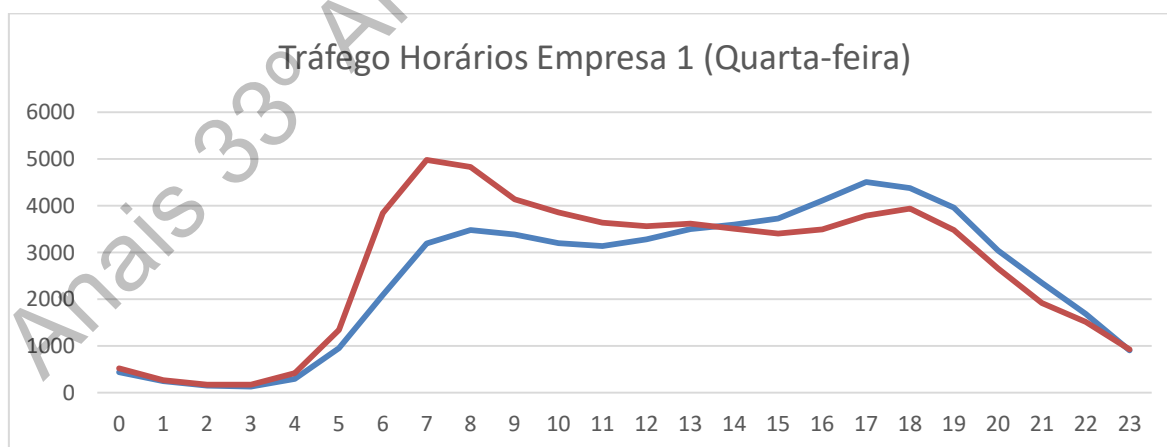


Figura 5: Tráfego utilizado para Simulação da Empresa 1.

Os dados de tráfego utilizados da Empresa 2 foram: Tráfego Horário por Pista e Sentido (01/Jan/17 – 10/Set/18); Tráfego Histórico Mensal por Categoria (Jan/15 a Ago/18); Operação de Cabines - Feriado (06-10/09/2018); Vídeos para Calibração - 27-29/11/18; Tempos de

Atendimento - por categoria e meio de pagamento calculados para dias úteis e finais de semana com dados de 01/10/2018 a 31/10/2018.

Conforme a Figura 6 da Empresa 2 (tráfego horário médio diário para dia mais carregado da semana), observa-se que o pico ocorre em domingos (retorno da praia sentido 2 - vermelho), entre 14hs e 20hs. Este será o período considerado nas análises.

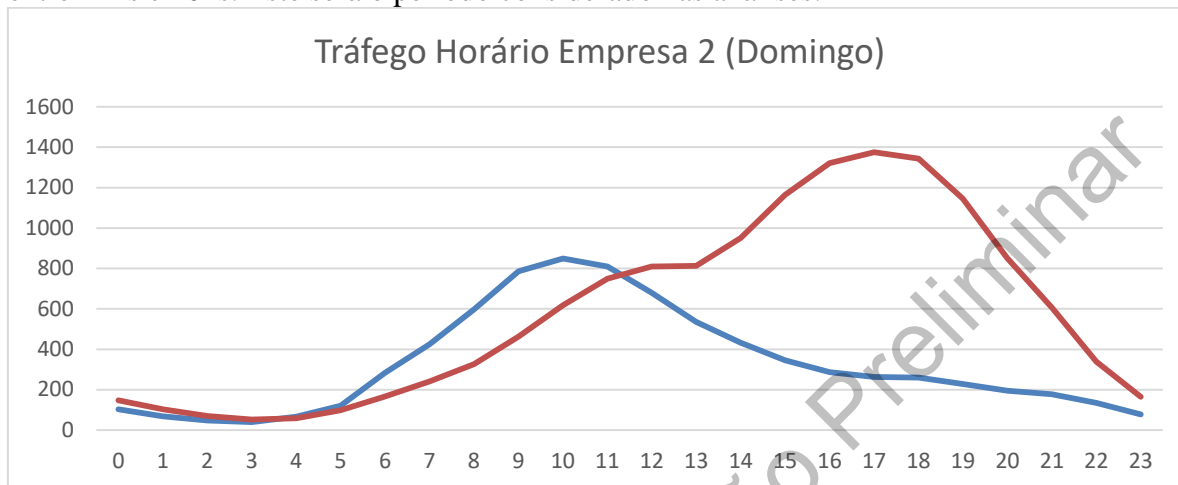


Figura 6: Tráfego utilizado para Simulação da Empresa 2.

4 RESULTADOS

Em relação à Empresa 1, considerando o atual cenário (tempo de atendimento médio manual de 12s, 8 cabines manuais e 2 AVI à direita, sendo 55% de cobrança AVI) para o sentido de cobrança 2, podem ocorrer atrasos de até 7min com fila máxima de 2463m. Totalizando uma produtividade média de 195 veículos por faixa manual, produtividade baixa comparada aos parâmetros propostos por Schaufler (1997) (180-550 veículos/h). A configuração operacional de capacidade mínima permite uma produtividade total de 3.700 veic/h, sendo 1.600 destes referentes às 8 pistas manuais disponíveis. Observou-se que a operação da Praça de Pedágio com três pistas AVIs ao invés de duas prejudica o desempenho da mesma. Antecipar a orientação dos motoristas para escolha do uso da pista AVI apresenta impacto favorável no desempenho da Praça de Pedágio. O teste de um layout com duas pistas AVI à esquerda tem melhor desempenho que a configuração com duas pistas AVIs à direita, conforme relatado pela bibliografia.

Para a Empresa 2, considerando a capacidade mínima (tempo de atendimento médio manual de 17s, 5 cabines manuais e 1 AVI à direita, sendo 29% de cobrança AVI) ocorre uma fila máxima de 6226m, podendo ocorrer atrasos de até 10min. Totalizando uma produtividade média de 166 veículos por faixa manual, produtividade bastante baixa comparada aos parâmetros propostos por Schaufler (1997) (180-550 veículos/h). Observa-se que 01 cabine AVI é suficiente para atendimento da demanda do percentual de adesão atual.

4.1 Análise dos Tempos de Transação

A Figura 7 mostra o tempo de viagem das 6hs-12hs da Empresa 1 considerando tempos de transação manual de 12s a 8s. Observa-se que cada segundo de melhoria no tempo de transação manual representa um ganho considerável de desempenho da Praça de Pedágio. A redução de 2s do tempo médio de transação manual representa um ganho de

aproximadamente 20 veic/h/pista manual. A redução de 1seg do tempo médio de transação manual reduz em 60% a fila máxima, de 2463m para 977m.

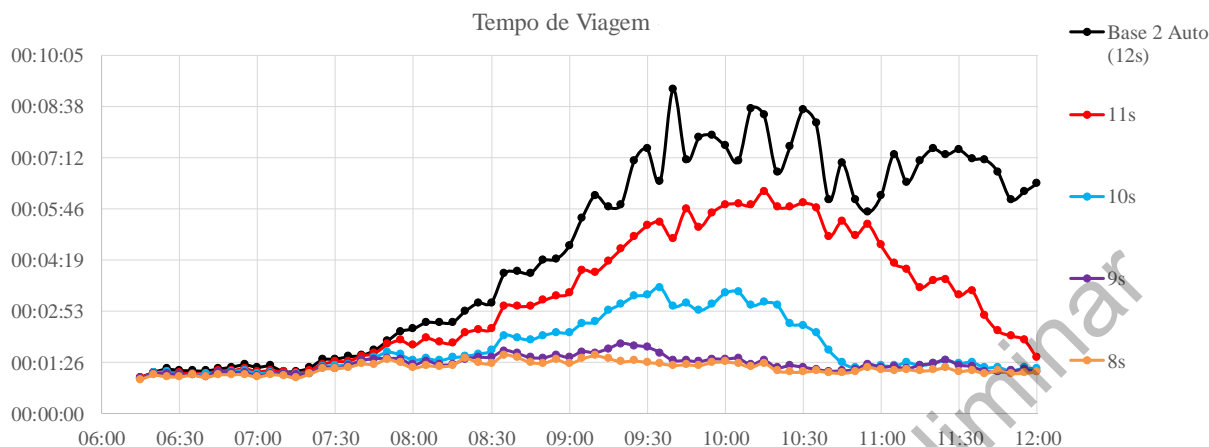


Figura 7: Tempos de Viagem versus Tempo de Transação (Empresa 1).

A Figura 8 mostra o tempo de viagem das 14hs-20hs da Empresa 2 considerando tempos de transação manual de 17s a 14s. Ao contrário da Empresa 1, observa-se a redução do tempo de transação não representa impacto relevante na redução da fila máxima. Observa-se relevante melhoria quando se coloca uma via manual adicional.

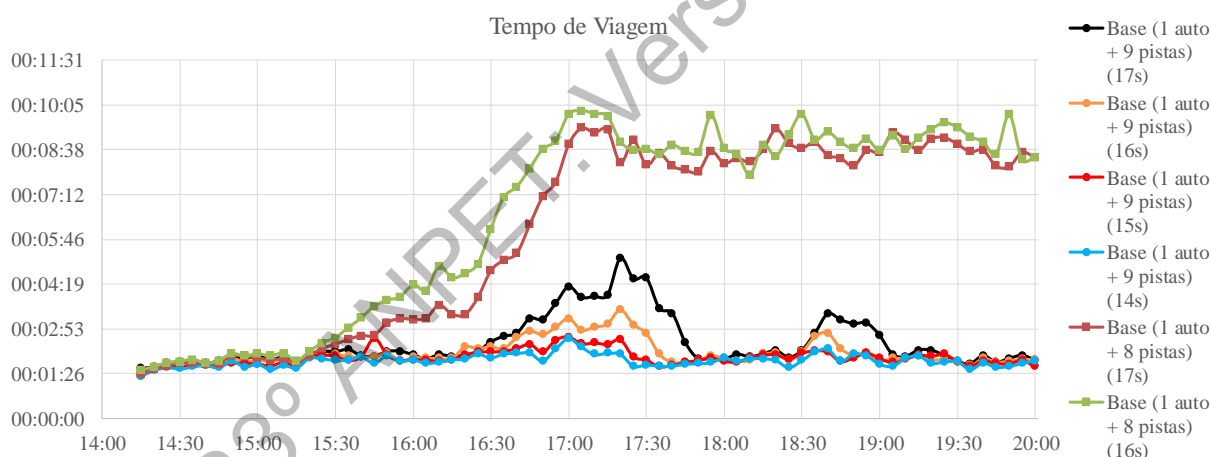


Figura 8: Tempos de Viagem versus Tempo de Transação (Empresa 2).

4.2 Análise do Percentual de Adesão ao Pagamento Automático (AVI)

A Figura 9 mostra o tempo de viagem das 6hs-12hs da Empresa 1 considerando percentuais de adesão AVI de 55% a 70%. O aumento da adesão ao AVI em 5% representa uma redução média de 90% da fila máxima, ou seja, de 2463m para 150m. Após 65% de cobrança AVI, não se observa ganho expressivo no desempenho da Praça de Pedágio.

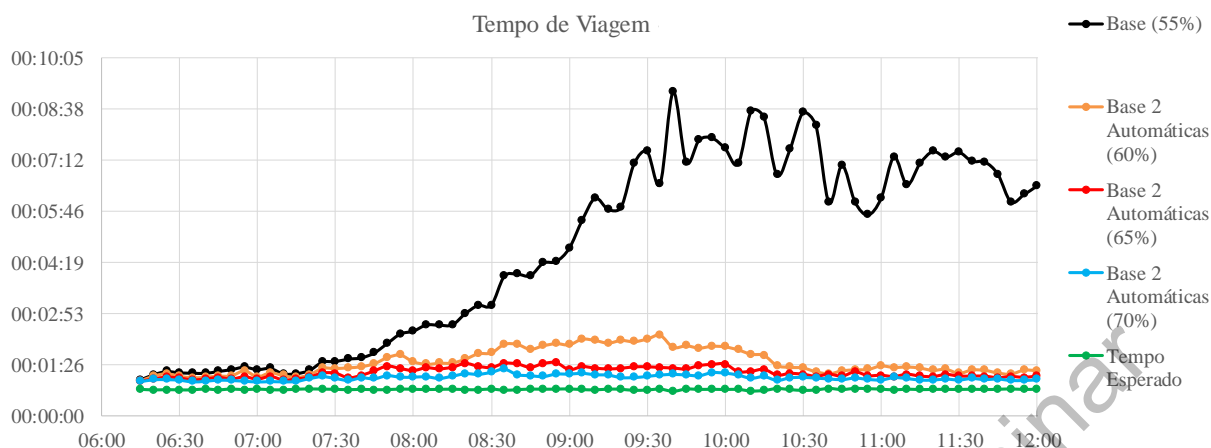


Figura 9: Tempos de Viagem versus Percentual de Adesão AVI (Empresa 1).

A Figura 10 mostra o tempo de viagem das 14hs-20hs da Empresa 2 considerando percentuais de adesão AVI de 29% a 44%. Observa-se que a pista AVI pode aumentar sua ocupação (saturação), considerando o baixo impacto na fila máxima com o incremento de até 15% na adesão.

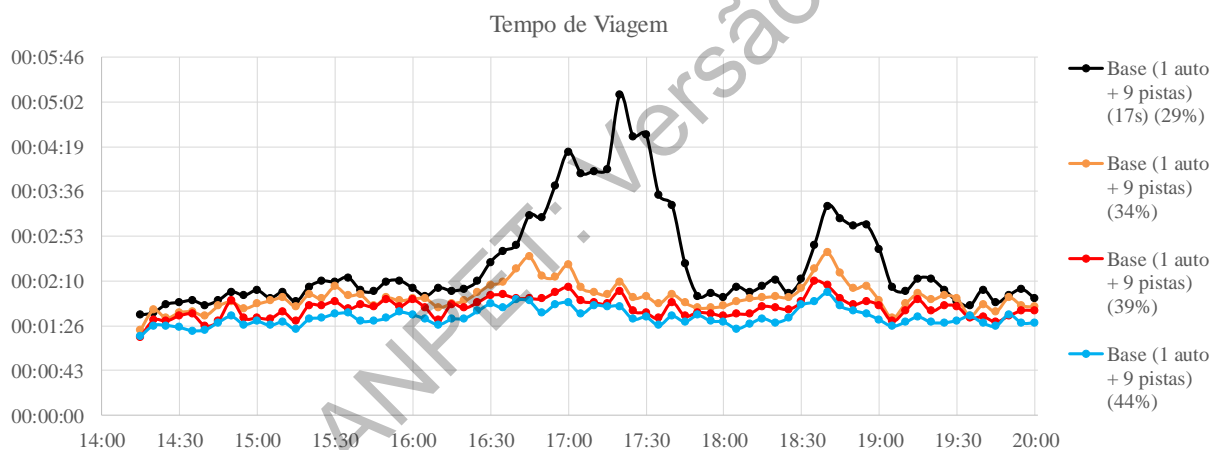


Figura 10: Tempos de Viagem versus Percentual de Adesão AVI (Empresa 2).

4.3 Crescimento de Tráfego

A Figura 11 mostra o tempo de viagem das 6hs-12hs da Empresa 1 considerando percentual de crescimento de tráfego de 3% ao ano para os horizontes de 5 e 10 anos. O crescimento de tráfego de 3% a.a. amplia a fila máxima em 5 anos em 63%, ou seja, de 2463m para 4012m. O crescimento de 3% a.a gera um tráfego em 10 anos que provoca a saturação do túnel de 3 faixas presente antes da Praça de Pedágio, que possui capacidade em torno de 5900 veic/h. A saturação do túnel limita ganhos de desempenho operacional na Praça de Pedágio, tanto em relação à redução do tempo de transação como no % de adesão ao AVI. O incremento de 5% de adesão no AVI absorve o crescimento de tráfego de 3% a.a em 5 anos. O incremento de 10% de adesão no AVI diminui a onda de choque no túnel provocada pelo crescimento de 3% a.a em 10 anos.

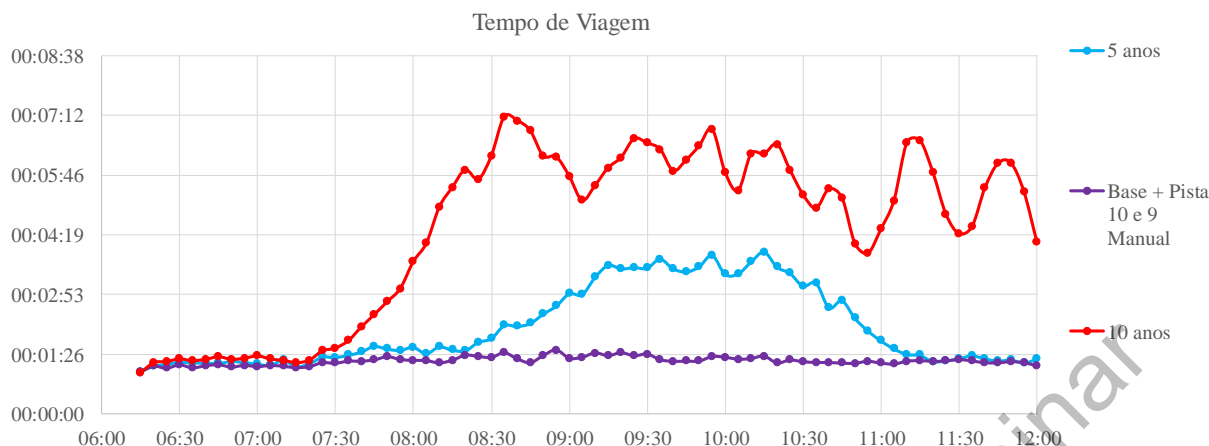


Figura 11: Tempos de Viagem versus Crescimento de Tráfego 3% ao ano (Empresa 1).

A Figura 12 mostra o tempo de viagem das 14hs-20hs da Empresa 2 considerando percentual de crescimento de tráfego de 3% ao ano para os horizontes de 5 e 10 anos para capacidade máxima (01 AVI + 09 MANUAL). Em 5 anos, atinge-se a capacidade para o layout de capacidade máxima atual considerando o crescimento de 3% a.a e sem crescimento % de adesão ao AVI. Observou-se a necessidade de ampliação física do número de cabines no futuro próximo.

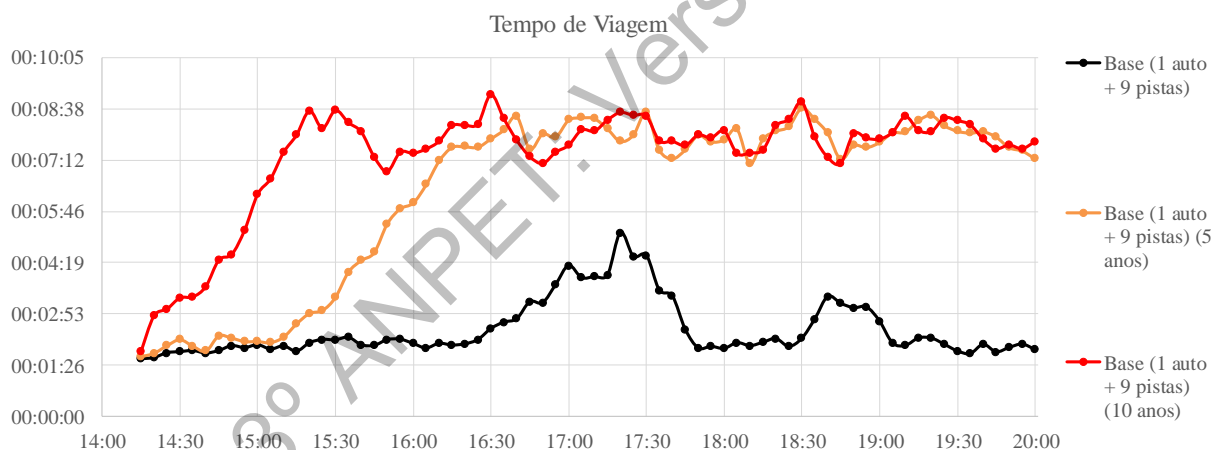


Figura 12: Tempos de Viagem versus Crescimento de Tráfego 3% ao ano (Empresa 2).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve como objetivo elaborar a análise da evolução da saturação das Praça de Pedágio da Empresa 1 e Empresa 2 e do desempenho de soluções mitigadoras. A revisão bibliográfica sobre o assunto auxiliou bastante na conformação de cenários e análises de forma a obter-se as melhores combinações de projeto de experimentos dos diversos cenários. Observou-se que a ferramenta de simulação Vissim mostrou-se bastante eficiente para análise dos mais diversos casos, auxiliando na tomada de decisões operacionais e estratégicas futuras para enfrentamento de filas e aumentos dos tempos de viagem.

Observou-se soluções distintas para Empresa 1 e Empresa 2. Para a Empresa 1 a solução futura encontra-se na redução dos tempos de atendimento manual e aumento incremental da adesão de cobrança AVI. Para a Empresa 2 a solução está no incremento de cabines manuais e no incremento de adesão AVI. Em relação à Empresa 1, considerando o atual cenário (tempo

de atendimento médio manual de 12s, 8 cabines manuais e 2 AVI à direita, sendo 55% de cobrança AVI) para o sentido de cobrança 2 podem ocorrer atrasos de até 7min com fila máxima de 2463m. O aumento da adesão ao AVI em 5% representa uma redução média de 90% da fila máxima, ou seja, de 2463m para 150m. Após 65% de cobrança AVI, não se observa ganho expressivo no desempenho da Praça de Pedágio. O incremento de 5% de adesão no AVI absorve o crescimento de tráfego de 3% a.a em 5 anos. O incremento de 10% de adesão no AVI diminui a onda de choque no túnel próximo da praça provocada pelo crescimento de 3% a.a em 10 anos.

Para a Empresa 2, considerando a capacidade mínima (tempo de atendimento médio manual de 17s, 5 cabines manuais e 1 AVI à direita, sendo 29% de cobrança AVI) ocorre uma fila máxima de 6226m, podendo ocorrer atrasos de até 10min. Totalizando uma produtividade média de 166 veículos por faixa manual, produtividade bastante baixa comparada aos parâmetros propostos pela literatura (180-550 veículos/h). Observa-se que 01 cabine AVI é suficiente para atendimento da demanda do percentual de adesão atual. Ao contrário da Empresa 1, observa-se a redução do tempo de transação não representa impacto relevante na redução da fila máxima. Observa-se relevante melhoria quando se coloca uma via manual a mais. Constatou-se que a pista AVI pode aumentar sua ocupação/saturação, considerando o baixo impacto na fila máxima com o incremento de até 15% na adesão. Em 5 anos, atinge-se a capacidade para o layout de capacidade máxima atual considerando o crescimento de 3% a.a e sem crescimento % de adesão ao AVI. Constatou-se a necessidade de ampliação física da praça no futuro próximo.

Após as análises deste estudo, sugere-se a implantação e validação das medidas mitigadoras propostas, e avaliação de seus resultados na prática.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdelwahab, Hassan (2017) Traffic Micro-Simulation Model for Design and Operational Analysis of Barrier Toll Stations. *Ain Shams Engineering Journal* (2017) 8, 507–513.
- Al-Deek, H. M., Zarrillo, M. L and Radwan, A. E. (1997) Modeling Traffic Operations at Electronic Toll Collection and Traffic Management Systems. *Computers ind. Engng* Vol. 33, Nos 3-4, pp. 857-860.
- Chakraborty, P.; Chakraborty P.; e Gill R. (2016) Analysing Queueing at Toll Plazas Using a Coupled, Multiple-queue, Queueing System Model: Application to Toll Plaza Design. *Transportation Planning and Technology*, 2016. VOL. 39, NO. 7, 675–692.
- Gedizlioglu, E., Aksoya G. and Celikoglu, H. B. (2014) Analysis of Toll Queues by Micro-simulation: Results from a Case Study in Istanbul. *Social and Behavioral Sciences* 111 (2014) 614 – 623.
- Hiramoto, T. and Ito, T. (2006) A General Simulator Approach to ETC Toll Traffic Congestion. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 17:597–607.
- Papageorgiou, M.; Spiliopoulou, A. D.; Papamichail, I (2010) Toll Plaza Merging Traffic Control for Throughput Maximization. *J. Transp. Eng.*, 2010, 136(1): 67-76.
- Sadoun, B. (2005) Optimizing the Operation of a Toll Plaza System Using Simulation: A Methodology. *SIMULATION*, Vol. 81, Issue 9, September 2005 657-664.
- Satria, T e Surbakti, M. (2018) Simulation of Queue Length on Amplas Entrance Toll Before and After the Ramp Off Development with Vissim Software. *MATEC Web of Conferences* 181, 07002.
- Schaufler, A. E. (1997) Toll Plaza Design. A Synthesis of Highway Practice. *Transportation Research Board*.
- Stammer Jr., R. and McDonald Jr., D. (2001) Contribution to The Development of Guidelines for Toll Plaza Design. *Journal of Transportation Engineering/May/June 2001*.