



Nota Técnica 270

O Trânsito Explicado por Paradoxos

Ming, Sun H.

Janeiro de 2022



1. APRESENTAÇÃO

Este artigo foi originalmente publicado no site www.sinaldetransito.com.br com o título “O Trânsito Explicado por Grãos de Arroz”, escrito em 2010¹.

A presente edição mantém praticamente na íntegra o texto original, porém com a devida atualização e/ou complementações quando necessário.

O título do trabalho original foi inspirado em um título semelhante (*The World of Transportation in a Grain of Rice*) de WSDOT Blog, de *Washington State Department of Transportation*², reportando um experimento que utilizava arroz para ilustrar um aparente paradoxo em sistemas de controle de acesso de vias expressas (*Ramp Metering*). Este experimento foi a principal razão motivadora para a realização deste trabalho e será objeto de discussão como sendo um dos casos de paradoxo de trânsito.

De forma geral, o presente trabalho tem como objetivo trazer à discussão alguns paradoxos encontrados no estudo da engenharia de tráfego, além do experimento de arroz que deu origem ao título original.

2. PARADOXO

O termo “paradoxo” significa “opinião contrária à comum; afirmação de um conceito mediante aparentes contradições ou termos incompatíveis”.

Segundo o Dicionário Houaiss: “proposição ou opinião contrária à comum; aparente falta de nexos ou de lógica; contradição; pensamento, proposição ou argumento que contraria os princípios básicos e gerais que costumam orientar o pensamento humano ou desafia a opinião consabida, a crença ordinária e compartilhada pela maioria”.

Por sua vez, o Dicionário Aurélio define paradoxo como: “Conceito que é ou parece contrário ao comum, contrassenso, absurdo, disparate; contradição, pelo menos na aparência.”

Seguem, como ilustração, alguns paradoxos clássicos.

a) Paradoxo do mentiroso

O paradoxo do mentiroso é atribuído ao filósofo grego Ebulides de Mileto³ que viveu no século IV a.C. Presumivelmente, Ebulides teria dito:

“Um homem diz que está mentindo. O que ele diz é verdade ou mentira?”

¹ Artigo original disponível em:

https://www.sinaldetransito.com.br/artigos/paradoxo_do_arroz.pdf

² Fonte: <http://wsdotblog.blogspot.com/2007/01/world-of-transportation-in-grain-of.html> (não mais disponível).

³ Ebulides de Mileto foi um filósofo grego da escola megárica, discípulo de sucessor de Euclides de Mégara, que viveu no Século IV a.C. Segundo Diógenes Laércio e Plutarco, foi ele quem ensinou a dialética a Demóstenes. Suas obras, se é que as escreveu, não chegaram aos nossos dias. Os seus detratores apresentam-no como um dialético sutil que, como Euclides e os eleatas, se apoiava sobre a unidade do ser permanente e idêntico para estabelecer a contradição inerente aos fenômenos e a tudo que não é a substância. Fonte: https://pt.wikipedia.org/wiki/Ebulides_de_Mileto.

b) Paradoxos de Zenão

Zenão (cerca de 495 a.C. – 430 a.C.) nasceu em Eleia, hoje Vélia, Itália. Zenão propôs vários paradoxos para demonstrar que o movimento é impossível, tratando-se apenas de mera ilusão.

A seguir, são apresentados dois paradoxos propostos por Zenão (“Aquiles e a tartaruga” e o “Paradoxo da dicotomia”).

b-1) Aquiles e a tartaruga

Aquiles, chamado "o dos pés ligeiros" e o mais hábil guerreiro dos Aqueos, decide perseguir uma tartaruga. Ao dar-se a saída, Aquiles percorre em pouco tempo a distância que os separava inicialmente, mas ao chegar ali a tartaruga já não estava mais lá, pois ela percorreu um pequeno trecho nesse período. Quando Aquiles chega à nova posição da tartaruga, ela se moveu mais um pouquinho e assim por diante, ao infinito. A Figura 1 ilustra esse processo.

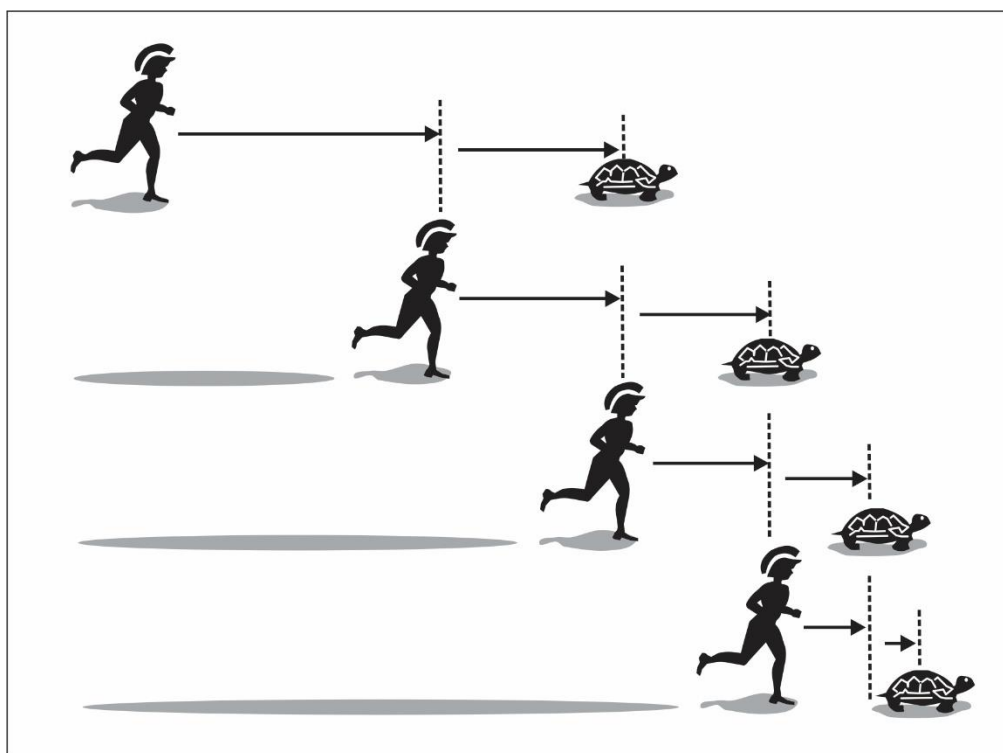


Figura 1 – Aquiles e a tartaruga

Fonte: <http://www.cognoscomm.com/arquivo/2528/88-a-tartaruga-de-zenao/>

Deste modo, Aquiles nunca alcançará a tartaruga, já que ela estará sempre um pouquinho adiante.

b-2) O paradoxo da dicotomia

Imagine uma pessoa que está no ponto A e quer chegar a um ponto B. Este movimento é impossível, pois antes de atingir o ponto B, a pessoa tem que atingir o meio do caminho entre A e B, isto é, um ponto C. Mas para atingir C, terá que primeiro atingir o meio do caminho entre A e C, isto é, um ponto D. E assim por diante, ao infinito. Logo, a pessoa nunca chegará ao ponto B. Na verdade, a pessoa nem consegue sair da sua posição inicial A! Daí a tese de Zenão de que todo o movimento é mera ilusão ...

c) Paradoxo do barbeiro

O paradoxo do barbeiro é um paradoxo que relaciona lógica matemática e teoria de conjuntos. O paradoxo considera uma aldeia onde, todos os dias, um barbeiro faz a barba de todos os homens que não barbeiam a si próprios e a mais ninguém. Ora, tal aldeia não pode existir:

- Se o barbeiro não se barbeia a si mesmo, então terá de fazer a barba a si mesmo.
- Se ele se barbear a si mesmo, de acordo com a regra, ele não poderá barbear a si mesmo.

O paradoxo costuma ser atribuído a Bertrand Russell, um matemático britânico que em 1901 elaborou o paradoxo que leva o seu nome para demonstrar a natureza autocontraditória da teoria de conjuntos de Georg Cantor. O paradoxo é também usado no teorema da incompletude de Gödel bem como na prova da indecidibilidade⁴ do problema de paragem de Alan Turing.

d) Paradoxo socrático

O paradoxo socrático diz que: “Ninguém comete o mal voluntariamente”.

Dentro do paradigma socrático, o paradoxo explica-se pelo tipo de relação que é estabelecida entre a sabedoria e o bem: um não pode existir sem o outro. Esta relação pode entender-se como uma ligação entre causa e efeito: o sábio, porque é sábio, só pode cometer atos bondosos. Então, aquele que comete o mal o faz porque não é sábio.

Assim, tal como a causa de uma boa ação é atribuída à sabedoria, o mal é também uma consequência inevitável da ignorância. Se aquele que comete o mal o faz por ignorância, então não o faz voluntariamente, porque, sendo ignorante, nem sequer sabe que o comete. Neste contexto, “voluntariamente” acaba por ser sinónimo de “conscientemente”. Eu posso decidir cometer qualquer má ação de forma premeditada, sem ter consciência de que essa ação é má. Cometendo voluntariamente algo que não sei que é mau, não cometo voluntariamente o mal⁵.

Os paradoxos, como os aqui apresentados, não são mero jogo de palavras. Eles intrigaram por séculos os mais renomados pensadores, filósofos e matemáticos de todos os tempos e são objeto de estudo e discussão até os dias de hoje⁶.

3. OS PARADOXOS NO TRÂNSITO

Como se poderá ver ao longo da discussão dos casos, os paradoxos no trânsito derivam do fato de que as pessoas têm uma visão dos problemas sob uma ótica imediatista, individual e pontual, não tendo a percepção de uma perspectiva mais ampla e coletiva. No trânsito, o que parece ser bom para um indivíduo, não o é para o conjunto do sistema. O ganho de um é sempre obtido às custas do prejuízo de todos os outros. Em resumo, a contradição dos paradoxos que envolvem trânsito é baseada no

⁴ A identificação dos problemas indecidíveis é uma das maiores aplicações da Teoria da Computação, pois permite demonstrar os limites teóricos dos computadores “reais”.

Fonte: <https://web.fe.up.pt/~jmoreira/wwwtc1/acetatos6.pdf>.

⁵ Fonte: Cristina Costa: <http://apmesquita.net/Files/Cristina%20Costa.pdf> (não mais disponível).

⁶ Veja, por exemplo, o artigo “Zenão de Eleia e o exercício da filosofia através do paradoxo: um ensaio acerca da intenção filosófica da dialéctica zenónica” de Alexandre Costa (2005) (http://www.uc.pt/fluc/dfci/publicacoes/zenao_de_eleia).

senso comum equivocado de que se cada um procurar o que for melhor para si estará levando vantagem, quando, na verdade, todos sairão perdendo (incluindo ele próprio)⁷.

O que é bom para um, é pior para todos ...

Reciprocamente, o paradoxo está configurado na seguinte assertiva: se cada um perder um pouco, todos sairão ganhando (incluindo aquele que perdeu ou cedeu).

Existem vários exemplos da vida cotidiana nos grandes centros urbanos que demonstram isso.

Um bom exemplo pode ser visto nas estações do Metrô de São Paulo. Numa plataforma saturada, onde todos querem embarcar e desembarcar ao mesmo tempo (todos procurando levar vantagem), o sistema trava e ninguém entra e nem sai. Contudo, se os que querem embarcar abrirem espaço na plataforma e esperarem as pessoas desembarcarem para depois embarcar, o sistema ganha fluidez e todos saem ganhando.

É perdendo que se ganha ...

Não é à toa que nas plataformas do Metrô de São Paulo eram vistos cartazes com dizeres do tipo: “Antes de embarcar, aguarde o desembarque, em fila”; “Faça um grande gesto: dê passagem para quem sai do trem” ou “Antes de entrar no trem, deixe as pessoas saírem”, conforme a Figura 2.



Figura 2 – Cartazes no Metrô de São Paulo

Os mesmos dizeres: “Faça um grande gesto: dê passagem a quem quer sair do trem” também podiam ser vistos no interior dos trens. O que se observa é que as pessoas se acotovelam na região das portas, dificultando ou mesmo impedindo a saída dos que querem desembarcar. Ora, esse comportamento gera tumultos e acaba prejudicando o desempenho do sistema, acarretando perdas para todos os usuários.

É importante ressaltar aqui que o gesto de ceder espaço e/ou de esperar não é apenas “gentileza”, “cidadania”, “educação” ou algo similar, mas, trata-se, simplesmente, de racionalidade, ganho de eficiência, não passando de um mero e frio balanço de ganhos e perdas. Não é necessário tomar tal atitude como um ato “nobre” ou “altruísta”, pois não envolve nenhum

⁷ É o Paradoxo da Lei do Gerson: quem quer levar vantagem, acaba perdendo!

“sacrifício”. Deve-se fazer tal gesto, não porque ele beneficia outras pessoas, mas porque tal atitude beneficia a si mesmo. Ou seja, devemos nos comportar dessa forma em benefício próprio⁸.

Aqui, pode-se perguntar: então, por que as pessoas não tomam, naturalmente, tal atitude ou comportamento se ela as beneficia? A resposta talvez possa ser dada pelo paradoxo socrático.

O comportamento inadequado das pessoas poderia decorrer da ignorância ou do desconhecimento do prejuízo que tal comportamento causa, não aos outros, mas a si mesmo.

O mundo ganharia mais se se preocupasse menos com apelos para valores altruístas como de “amor ao próximo” ou “pratique cidadania” e fosse incentivado para que cada um pensasse no que é melhor para si mesmo, mas não de forma imediatista e com uma perspectiva pontual e individual, mas a médio e longo prazo, numa perspectiva mais abrangente e coletiva.

4. PARADOXO DE BRAESS

A contradição do paradoxo de *Braess*⁹ advém do fato de que, ao adicionar uma ligação nova a uma rede viária existente, o desempenho da rede pode ser pior do que antes. O paradoxo decorre do fato de que um sistema em que cada usuário procura minimizar o seu tempo de viagem (“*selfish system*”) não representa a situação ótima para o sistema como um todo.

Considere uma rede com os seguintes links, como na Figura 3¹⁰.

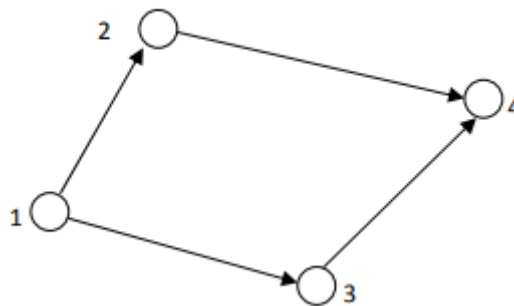


Figura 3 – Exemplo de uma rede com 4 links

⁸ Eis outro paradoxo: o verdadeiro egoísmo é exercido por meio de atitudes não egoístas!

⁹ O paradoxo de *Braess*, apresentado em 1968 pelo matemático alemão Dietrich *Braess* (n. 1938), é uma ilustração da ideia de que a oferta de um curso de ação adicional pode levar a uma piora da situação de todos os indivíduos, assumindo-se decisões individuais racionais. Trata-se de uma explicação para o caso em que uma alteração na rede viária, visando aumentar a fluidez do tráfego, tem o efeito exatamente oposto, reduzindo o desempenho de toda a rede. O trabalho original de *Braess* mostra uma situação paradoxal em que a construção de uma rodovia adicional (ou seja, um aumento na capacidade de uma rede viária congestionada), pode aumentar o tempo de percurso para todos os usuários da rede (ou seja, a capacidade da rede é reduzida), mantendo-se constante a demanda de tráfego e pressupondo-se que cada usuário da rede escolha o seu percurso de modo a minimizar o tempo de viagem (roteamento egoísta). Fonte: https://pt.wikipedia.org/wiki/Paradoxo_de_Braess.

¹⁰ Exemplo extraído de uma prova da disciplina PTR 5789 – Planejamento de Transportes Urbanos no programa de pós-graduação da Escola Politécnica da USP em setembro/2005.

Considere ainda que a origem e destino de interesse é 1-4, com as rotas possíveis: 1-2-4 e 1-3-4. Admite-se, ainda, que a rede funciona como um sistema de vasos comunicantes¹¹, isto é, que os fluxos se distribuem pelas duas rotas até que os tempos de viagem nas duas rotas sejam iguais. Nesta condição, diz-se que o sistema está em equilíbrio (equilíbrio de *Wardrop*¹²).

Suponha que o fluxo que sai do ponto 1 e quer chegar no ponto 4 seja $V_{1-4} = 1000$ viagens/hora (com demanda inelástica). Admita também as seguintes funções de desempenho (volume-tempo de viagem):

$$t_{1-2} = 5 + 0,01V_{1-2} \text{ (minutos)}$$

$$t_{1-3} = 20 + 0,001V_{1-3} \text{ (minutos)}$$

$$t_{2-4} = 20 + 0,001V_{2-4} \text{ (minutos)}$$

$$t_{3-4} = 5 + 0,01V_{3-4} \text{ (minutos)}$$

Pode-se mostrar que o equilíbrio de *Wardrop* é atingido quando o tempo de viagem em qualquer uma das duas rotas possíveis é de 30,50 minutos.

Agora suponha que a essa rede é adicionada uma nova ligação, o link 2-3, conforme a Figura 4:

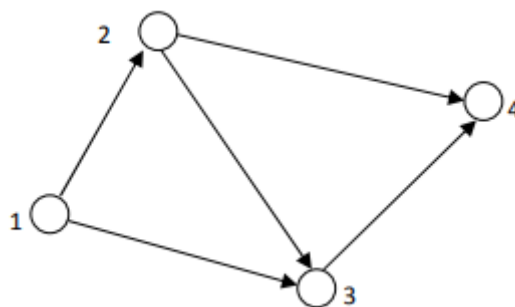


Figura 4 – Adição do link 2-3 à rede

Agora são possíveis 3 rotas: 1-2-4, 1-3-4 e uma nova rota 1-2-3-4.

Suponha que nessa nova rede, a função de desempenho do novo link é dada por:

$$t_{2-3} = 10 + 0,0001V_{2-3} \text{ (minutos)}$$

É possível mostrar que, na condição de equilíbrio de *Wardrop*, o tempo de viagem nas três rotas possíveis é de 30,84 minutos.

Nessas condições, ao contrário do que diz o senso comum, o acréscimo do novo link trouxe uma piora à rede. Na situação sem o link 2-3, o tempo de viagem era de 30,50 minutos em qualquer uma das duas rotas possíveis; na situação com o link 2-3, o tempo de viagem passa para 30,84 minutos em qualquer uma das 3 rotas possíveis, uma piora de 1,11% no sistema. Assim, apesar de haver uma rota alternativa a mais, o tempo de viagem aumenta no sistema, qualquer que seja a rota escolhida.

Alguns links ganham com o acréscimo do link 2-3, mas outros perdem. O paradoxo é configurado quando as perdas superam os ganhos, gerando uma piora no sistema como um todo.

¹¹ O que equivale dizer que cada usuário procura o melhor caminho para si.

¹² Na condição de equilíbrio, nenhum usuário consegue escolher uma rota de forma a reduzir o tempo de percurso. Todas as rotas apresentam o mesmo tempo de percurso.

Na realidade, o link 2-3 pode ser um "mau" link, pois a nova rota criada por ele (rota 1-2-3-4) compartilha links de rotas existentes anteriormente. O link 2-3 pode sobrecarregar os links 1-2 e 3-4, enquanto os links 2-4 e 1-3 podem ficar com capacidade ociosa que não é aproveitada. De fato, o link 2-3 pode trazer "desequilíbrio" quando o sistema atinge o equilíbrio¹³ de *Wardrop* (distribuição de fluxos de forma que o tempo de viagem seja igual em todas as rotas).

Para aumentar a capacidade do sistema, teria que ser criada uma nova rota com links "bons", isto é, uma rota cujos links não fossem compartilhados com as rotas existentes anteriormente.

No artigo de *R. A. Abrams* e *J. N. Hagstrom*, intitulado "*Improving Traffic Flows at no Cost*", é reportado um estudo ("*Sioux Falls Study*") onde foi feito o inverso do paradoxo de *Braess*, isto é, foi restringido o uso de links "maus" na rede viária provocando uma melhora no tráfego. O estudo aponta melhorias de até 33% em tempo de viagem em alguns links, enquanto os links que sofreram uma redução de desempenho, a piora foi de apenas 0,25%.

O paradoxo indica que nem sempre criar novas vias, cortar calçadas ou canteiros para "aumentar a capacidade" são ações que geram melhorias ao sistema. Pelo contrário, podem provocar uma piora no sistema como um todo. Por outro lado, por incrível que pareça, fechar vias existentes pode, em alguns casos, redundar num desempenho melhor de fluidez do trânsito!¹⁴

5. CONTROLE "PARE"

No Brasil só existe o controle por meio de placas "PARE" (sinal R1) nas vias secundárias, indicando preferência de passagem para as vias consideradas "principais".

Nos Estados Unidos, existem dois tipos de controle por meio de placas "PARE":

"*Two-Way Stop Control*" (TWSC) e "*Four-Way Stop Control*" ou "*All-Way Stop Control*" (AWSC). O primeiro é semelhante ao utilizado no Brasil nas interseções com controle PARE nas aproximações da via secundária, mas o segundo não tem utilização equivalente no Brasil. No controle "*All-Way Stop Control*" (AWSC), todas as aproximações da interseção são sinalizadas com placa "PARE", não havendo "via principal" e "via secundária". Todas as aproximações têm o mesmo tipo de controle.

Em outras palavras: todos são obrigados a parar e ceder o direito de passagem a quem chegar primeiro. A Figura 5 mostra a sinalização empregada.



Figura 5 – Sinalização "*Four-Way Stop Control*" e "*All-Way Stop Control*" (AWSC)

¹³ Parece ser outro paradoxo: "desequilíbrio no equilíbrio"!

¹⁴ Já houve casos em que interdições de vias devido a obras, o trânsito, em vez de piorar, melhorou. Será que foi efeito do Paradoxo de *Braess*?!...

Um motorista, ao aproximar-se de uma interseção do tipo AWSC, deve fazer uma parada completa antes de proceder à travessia da interseção. Após a parada, os veículos têm o direito de passagem na ordem em que eles chegam à interseção.

A principal razão para a implantação desse tipo de controle é melhorar a segurança em interseções onde as duas vias apresentam características idênticas, ficando difícil de estabelecer quem é a via “principal” e quem é a via “secundária”.

Entretanto, esse sistema só é viável quando todos respeitarem o direito de passagem do outro.

A título de exemplo, imagine-se uma interseção AWSC, de duas vias de mão única de direção de tráfego, com uma faixa de rolamento, em dois cenários: no primeiro, todos respeitam o direito de passagem do outro; no segundo, não há esse respeito.

Supondo que cheguem quase que simultaneamente 3 veículos em cada aproximação, vejamos como seria a operação da interseção nos dois cenários.

Considere a Figura 6, onde o número que aparece ao lado de cada veículo representa a ordem de sua chegada.

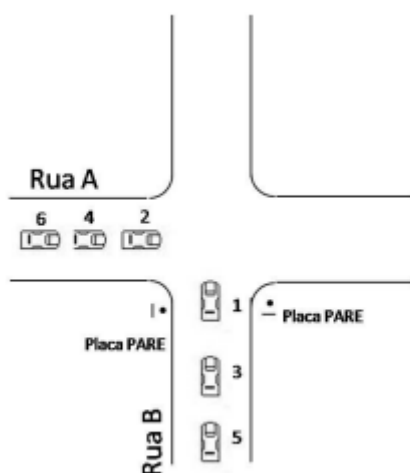


Figura 6 – Ordem de chegada dos veículos em cruzamento com sinalização AWSC

No primeiro cenário, como o veículo 1 é o primeiro a chegar, é ele que inicia a travessia, seguindo-se os veículos 2, 3, 4 e assim por diante, de acordo com a ordem de chegada, conforme a sequência mostrada na Figura 7.

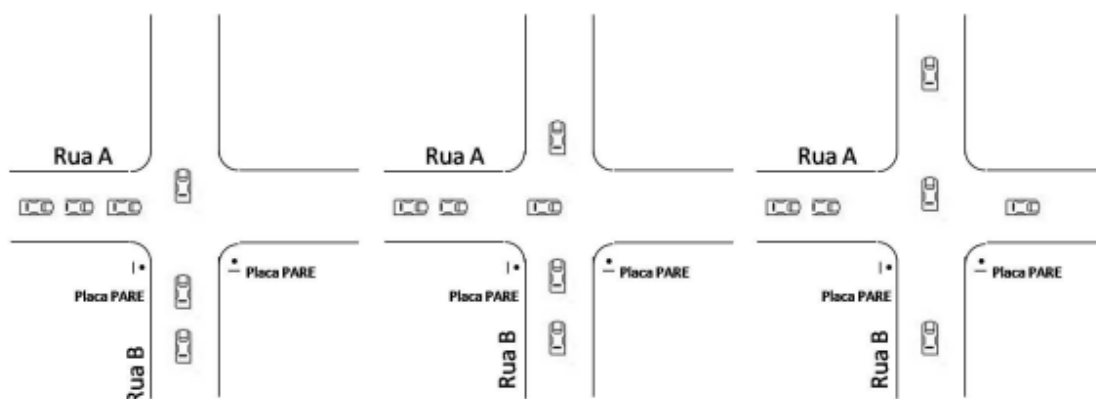


Figura 7 – Escoamento dos veículos conforme a ordem de chegada

No segundo cenário, após a passagem do veículo 1, os demais veículos da aproximação da Rua B não respeitam a sinalização e sem efetuar a parada obrigatória, aproveitam a passagem do veículo 1 e seguem na sua “cola” ou no seu “vácuo”, fazendo

com que os veículos da outra aproximação tenham que aguardar o escoamento de toda a fila de veículos da Rua B, conforme mostrado na Figura 8.

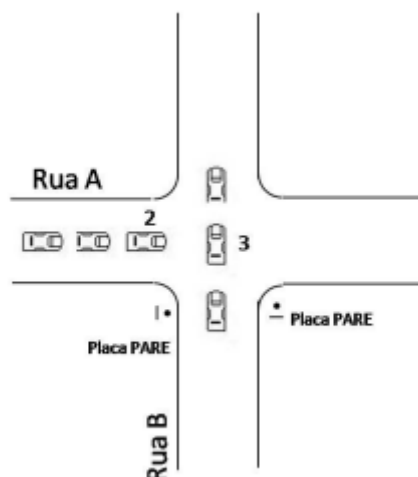


Figura 8 – Escoamento dos veículos sem respeitar a ordem de chegada

Os veículos da Rua B, aparentemente, ganharam com a não obediência. Contudo, se houver desrespeito generalizado, se eles ganharem nessa interseção, poderão perder em outras. A longo prazo, os ganhos podem não superar as perdas. Entretanto, o maior prejuízo para todos é a falta de segurança gerada por esse comportamento. Pode ocorrer um acidente pelo fato de o veículo 2 poder avançar simultaneamente com o veículo 3 (uma vez que o veículo 2, pela ordem de chegada, teria o direito de passagem).

Em São Paulo, uma situação similar pode ocorrer em uma minirrotatória, sinalizada em todas as suas aproximações com o sinal R2 (“Dê a preferência”), conforme a Figura 9¹⁵, onde a preferência é de quem já está contornando o círculo da minirrotatória. A desobediência à sinalização pode gerar uma situação semelhante à da Figura 8, quando um veículo pode seguir na “cola” do veículo da frente sem dar a preferência para um veículo que já esteja contornando o círculo da minirrotatória.

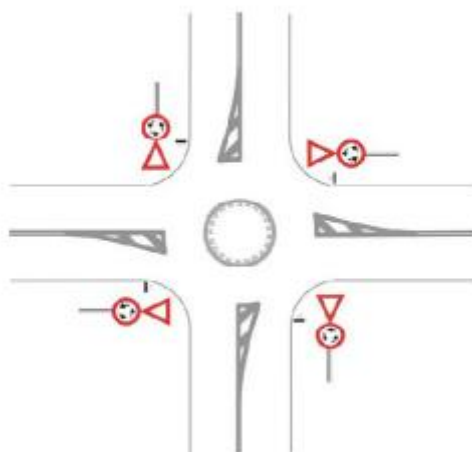


Figura 9 – Minirrotatória com sinalização R2

¹⁵ Figura extraída do artigo “Minirrotatória – Um projeto simples e eficiente para redução de acidentes” de Antônio Sérgio Barnabé (<http://www.sinaldetransito.com.br/artigos/minirrotatoria.pdf>)

6. CONTROLE SEMAFÓRICO

O semáforo também pode ser classificado como “paradoxo”. Só não o é porque é um tipo de controle de uso largamente disseminado e já completamente assimilado pela população, principalmente nas grandes cidades.

O paradoxo reside na obrigação de parar diante do sinal vermelho por um longo período de tempo. Não seria melhor não haver semáforos, não haver a obrigação de parar? Assim, não se desperdiçariam longos períodos de espera ... Pergunte a algum motorista se ele gosta de semáforos. Ninguém gosta. Todos preferem rotas sem semáforos. Então, por que eles continuam a ser implantados?

A resposta é: ruim com eles, pior sem eles. Imagine o que poderia acontecer num cruzamento importante sem semáforo ... é só ver a Figura 10.



Figura 10 – Cruzamento sem semáforo ...

Uma maneira fácil de constatar a importância do semáforo é quando falta energia e os semáforos ficam apagados.

Ao obrigar os veículos a parar, consegue-se obter um melhor nível de fluidez. Basta imaginar quanto tempo levaria para desmanchar o “nó” da Figura 10 e quanto tempo os motoristas perderiam. Daí o paradoxo: o que parece demorar mais, na verdade acaba sendo mais rápido.

7. EXPERIMENTO DO ARROZ

Diferentemente dos semáforos convencionais, o controle de acesso a vias expressas por meio de semáforos é desconhecido para os motoristas paulistanos, pois ainda não existe tal sistema implantado na cidade.

Antes de entrar no caráter “paradoxal” do sistema, introduz-se a seguir uma breve explicação do que seja um controle de acesso (em inglês: *Ramp Metering*).

O controle de acesso é um mecanismo utilizado para controle de tráfego em vias expressas, composto por monitoramento de trânsito e por modelos matemáticos, para determinar as melhores condições de operação do sistema constituído pela via expressa e seus acessos.

O controle de acesso, embora seja efetuado por meio de focos semaforicos, é totalmente distinto dos semáforos convencionais. O semáforo convencional regulamenta o direito de passagem para as diversas correntes conflitantes de tráfego.

No caso do controle de acesso, não há correntes conflitantes de tráfego. O objetivo do semáforo é dosar o tráfego de entrada da via expressa, de forma que a entrada dos veículos seja feita de modo controlado e suave, com o intuito de reduzir as perturbações geradas pelo entrelaçamento dos veículos na entrada da via expressa. A “dosagem” é feita por meio de algoritmos ou modelos matemáticos de otimização.

O controle de acesso é utilizado, com bons resultados, em vários países da Europa, América do Norte e da Oceania¹⁶.

A Figura 11 ilustra o esquema básico do sistema¹⁷.

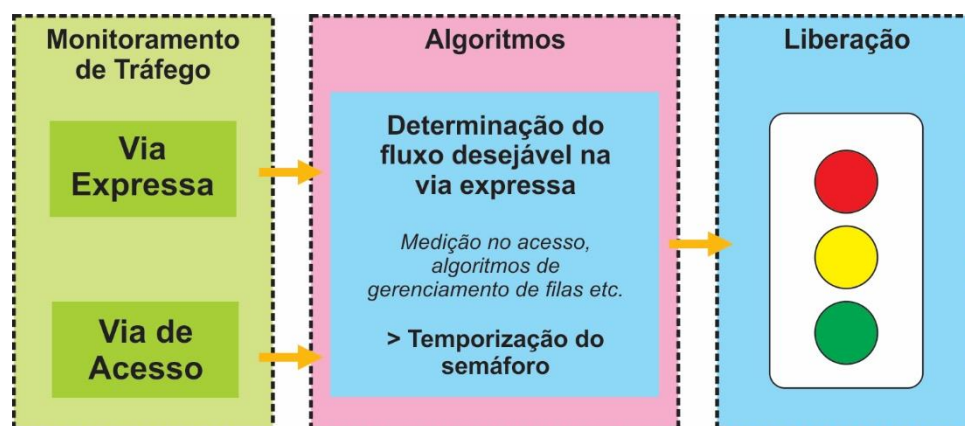


Figura 11 – Esquema básico do controle de acesso

O sistema de controle de acesso, se instalado e programado de forma apropriada, propicia os seguintes benefícios:

- incremento da velocidade média;
- controle das filas das vias lindeiras, evitando a obstrução da rede viária principal fora da via expressa;
- amenização de conflitos;
- redução de acidentes em função das melhores condições gerais do trânsito e da entrada controlada dos acessos às vias expressas;
- redução da poluição atmosférica e sonora;
- redução de acidentes.

¹⁶ Para maiores informações técnicas sobre controle de acesso, podia-se consultar os vários sites (incluindo vídeos mostrando a operação do controle de acesso na Holanda, Nova Zelândia e Estados Unidos):

Wikipedia:

http://en.wikipedia.org/wiki/Ramp_meter

Auckland, Nova Zelândia, texto explicativo, animação, fotos e vídeos:

<http://www.aucklandmotorways.co.nz/rampsignalling/rampsignalling.html> (não mais disponível)

Vídeo Aukland:

http://www.youtube.com/v/8fwC2lcpNtg&hl=en_US&feature=player_embedded&version=3 (não mais disponível)

Vídeo Holanda:

http://www.youtube.com/v/pvPqQ7zszkY&hl=en_US&feature=player_embedded&version=3 (não mais disponível)

Texto Universidade de Minnesota:

<http://www.its.umn.edu/Research/FeaturedStudies/rampmeter.html> (não mais disponível)

¹⁷ Fonte: *Guideline for the Deployment of Ramp Metering*.

A Figura 12(a) mostra a situação antes e a Figura 12(b) mostra a situação após a implantação do controle de acesso em Tel Aviv.



Figura 12 – Controle de acesso em Tel Aviv

A Figura 13 mostra a sinalização empregada em um controle de acesso em Atlanta.



Figura 13 – Ramp Metering em Atlanta

O controle de acesso não é fácil de ser entendido pelos motoristas. Uma preocupação recorrente é com a possibilidade de aumento de congestionamentos nas vias de acesso às vias expressas por causa do semáforo. Como um dos objetivos do controle de acesso é preservar a capacidade nominal da via expressa, o que se imagina à primeira vista é que o sistema irá “sacrificar” as vias lindeiras ao acesso para beneficiar a via expressa. Isto é, a via expressa será preservada às custas das vias de acesso.

As seguintes questões refletem a preocupação de que tais semáforos possam causar lentidões nas vias de acesso:

- Qual o tempo máximo para interrupção do acesso às vias expressas por esse sistema?
- Os controles de acesso ficarão vermelhos sob que circunstâncias?
- Poderá haver transferência de tráfego para outras vias, no intuito de evitar os semáforos?

- Há rotas alternativas?
- O sinal ficaria sempre verde apenas quando a via expressa estivesse com trânsito livre?

A ideia do controle de acesso é dosar a entrada de veículos na via expressa. Essa dosagem é feita por meio do verde e do vermelho do semáforo de forma a permitir um ritmo de entrada na via expressa suave e controlado, evitando que todos cheguem ao mesmo tempo na via expressa.

Os tempos de verde e do vermelho é que vão determinar o ritmo de entrada na via expressa. Os modelos matemáticos, em função dos dados recebidos do monitoramento de tráfego, procuram identificar o ritmo ótimo, que é aquele que possibilita o menor tempo de escoamento possível nos fluxos da via expressa e nas vias de acesso, em função da condição de tráfego mensurada na via expressa.

O tempo de vermelho zero ocorre na situação em que o fluxo da via de acesso (e não o da via expressa) é bastante baixo. Afinal, se a chegada de veículos na via de acesso for muito baixa (independentemente do fluxo da via expressa), não haverá a necessidade de dosá-la ...

Ao contrário do que se pode imaginar à primeira vista, esse mecanismo permite que o fluxo da via de acesso escoe com mais rapidez. Daí, o caráter paradoxal do sistema.

Mas como convencer o motorista da via de acesso de que o semáforo, em vez de prejudicá-lo, irá beneficiá-lo?

A dificuldade desse convencimento fez com que o WSDOT (*Washington Department of Transportation*) lançasse um concurso com um prêmio de US\$ 1.000 para quem oferecesse a explicação mais original¹⁸.

A ideia vencedora foi a proposta de realização de um experimento, conforme descrito abaixo:

“Pegue 2 funis iguais e 2 pacotes de 1 kg de arroz. Despeje, simultaneamente, um pacote em cada funil. No funil da direita, despeje todo o pacote de uma vez só. No funil da esquerda, despeje o arroz devagar, em fluxo suave e controlado.”

Qual quilo de arroz passa mais rapidamente pelo funil?

WSDOT fez a experiência (ver a Figura 14) e constatou que levou 40 segundos para 1 kg passar pelo funil da direita e 27 segundos pelo funil da esquerda¹⁹.

O que parecia ser mais lento na verdade foi mais rápido.

¹⁸ *The \$1,000 Doug MacDonald Challenge* (<http://www.wsdot.wa.gov/traffic/congestion/rice/>) (não mais disponível).

¹⁹ Esse experimento também está relatado no livro "Por que dirigimos assim?" (*Why we drive the way we do*) de Tom Vanderbilt.



Figura 14 – Experimento do arroz

No exemplo do experimento do arroz, os grãos de arroz representam os veículos da via de acesso. A saída do funil corresponderia à capacidade de ingresso na via expressa e a dosagem do fluxo de arroz na entrada do funil seria o resultado do controle semafórico. A diferença entre o funil e o controle de acesso é que a saída do funil é fixa enquanto a capacidade de ingresso na via expressa é variável (depende das condições do trânsito da via expressa). O fluxo dos grãos de arroz na entrada do funil deve ser constante, enquanto os tempos semafóricos do controle de acesso são variáveis (pois devem-se ajustar às condições da via expressa).

Controlando a entrada dos grãos de arroz na entrada do funil de forma a compatibilizá-la com a capacidade da saída do funil, o escoamento é mais rápido do que se fossem despejados todos os grãos de uma vez só. Assim, controlando os veículos da via de acesso, de maneira a não permitir que eles cheguem de uma vez só, melhora o seu escoamento. Portanto, o controle de acesso é um mecanismo que melhora o tráfego da via de acesso (e não o prejudica para priorizar a via expressa, como pode parecer à primeira vista).

Outro exemplo pode ser visto na Estação Sé do Metrô de São Paulo no pico da tarde. O Metrô realiza uma espécie de controle de acesso às plataformas por meio da quantidade de catracas disponibilizadas, com o objetivo de impedir que toda a multidão de passageiros chegue todos de uma vez só nas plataformas. Quando se avistam as enormes filas nas catracas, imagina-se o pior cenário, mas quando se chega à plataforma percebe-se que o sistema flui normalmente, não havendo o mesmo nível de saturação encontrado nas catracas. Com certeza, se toda a multidão de pessoas chegasse de uma vez só na plataforma, além de problemas de segurança, o sistema ficaria muito mais ineficiente, com atrasos de partidas de trens devido a tumultos e às dificuldades de embarque, causando atrasos em cadeia em todo o sistema, conforme se pode depreender pela Figura 15.



Figura 15 – Saturação da plataforma de Metrô na Estação Sé

Controlando o ingresso dos passageiros nas catracas para compatibilizar o fluxo de chegada na plataforma com a capacidade de embarque nos trens, ganha-se em eficiência e segurança, com benefícios evidentes para todos os passageiros.

As fotos das Figuras 16(a) e 16(b) foram tiradas no dia 26/11/2010, às 18h20. A Figura 16(a) mostra a fila formada nas catracas e a Figura 16(b) mostra a situação na plataforma Coríntians-Itaquera da linha vermelha, a mesma plataforma mostrada na Figura 15.



(a)



(b)

Figura 16 – Fila nas catracas e a situação na plataforma na Estação do Metrô

O número de catracas para sair da estação era bem maior do que para entrar, o que, à primeira vista, pode parecer um contrassenso, pois a demanda de pessoas entrando era muito maior do que saindo. Isso mostra a intenção de represar o fluxo de pessoas nas catracas, a fim de evitar uma situação na plataforma parecida com aquela mostrada na Figura 15.

Dessa forma, o passageiro perde um tempo na fila da catraca, mas ganha um tempo maior no embarque (além do ganho de segurança).

8. PREFERÊNCIA AO PEDESTRE NAS INTERSEÇÕES SEMAFORIZADAS

O Código de Trânsito Brasileiro – CTB apresenta os seguintes artigos que regulamentam a preferência da passagem do pedestre.

Art. 38. Antes de entrar à direita ou à esquerda, em outra via ou em lotes lindeiros, o condutor deverá:

I - ao sair da via pelo lado direito, aproximar-se o máximo possível do bordo direito da pista e executar sua manobra no menor espaço possível;

II - ao sair da via pelo lado esquerdo, aproximar-se o máximo possível de seu eixo ou da linha divisória da pista, quando houver, caso se trate de uma pista com circulação nos dois sentidos, ou do bordo esquerdo, tratando-se de uma pista de um só sentido.

Parágrafo único. Durante a manobra de mudança de direção, o condutor deverá ceder passagem aos pedestres e ciclistas, aos veículos que transitem em sentido contrário pela pista da via da qual vai sair, respeitadas as normas de preferência de passagem.

Art. 70. Os pedestres que estiverem atravessando a via sobre as faixas delimitadas para esse fim terão prioridade de passagem, exceto nos locais com sinalização semaforica, onde deverão ser respeitadas as disposições deste Código.

Parágrafo único. Nos locais em que houver sinalização semaforica de controle de passagem será dada preferência aos pedestres que não tenham concluído a travessia, mesmo em caso de mudança do semáforo liberando a passagem dos veículos.

Art. 214. Deixar de dar preferência de passagem a pedestre e a veículo não motorizado:

I - que se encontre na faixa a ele destinada;

II - que não haja concluído a travessia mesmo que ocorra sinal verde para o veículo;

III - portadores de deficiência física, crianças, idosos e gestantes:

Infração - gravíssima;

Penalidade - multa.

IV - quando houver iniciado a travessia mesmo que não haja sinalização a ele destinada;

V - que esteja atravessando a via transversal para onde se dirige o veículo:

Infração - grave;

Penalidade - multa.

O problema aqui tratado diz especificamente à preferência de passagem do pedestre diante de veículos que fazem conversão em interseções semaforizadas, onde a travessia de pedestre não é sinalizada com focos de pedestres, conforme mostrado na Figura 17.

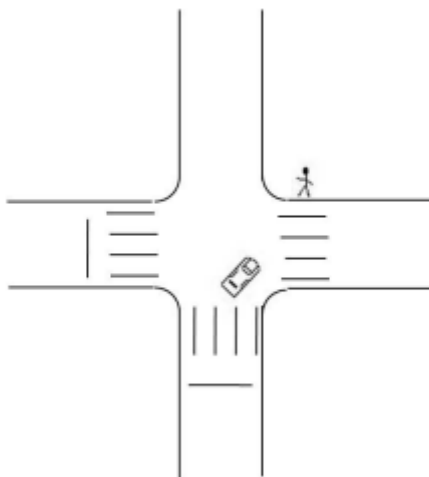


Figura 17 – Preferência ao pedestre na conversão

No Brasil, a preferência do pedestre é geralmente desrespeitada pelos motoristas que fazem movimento de conversão. Na prática, os pedestres atravessam nas brechas entre veículos, quando deveria ocorrer exatamente o contrário: os veículos é que deveriam efetuar a conversão nas brechas entre pedestres (pois a preferência de passagem é do pedestre).

Quando os condutores não dão preferência ao pedestre, eles “ganham” tempo (ou assim pensam). O que ocorre é que, em locais com grande fluxo de conversão, onde não há brechas para pedestres, para propiciar que o pedestre possa fazer a travessia, é configurado um “estágio de pedestre” no semáforo, quando todas as correntes de tráfego recebem o sinal vermelho.

O tempo de ciclo de um cruzamento semaforizado deve ser aumentado quando é configurado um estágio de pedestres. Entretanto, é equivocado o raciocínio simplista de que o ciclo só aumenta na exata medida da duração do estágio de pedestres, isto é, se o ciclo sem o estágio de pedestres for de 70 segundos, o ciclo com um estágio de pedestres de 12 segundos não é simplesmente $70 + 12 = 82$ segundos. O novo ciclo, por causa do estágio de pedestres de 12 segundos, pode ir para 160 segundos, um aumento de quase 129%!²⁰

O aumento do ciclo causa um aumento do tempo de espera no semáforo. O ponto mais crítico é que o aumento do ciclo, e, conseqüentemente, o aumento do tempo de espera, pode se estender a toda uma rede de semáforos. Isto é, por causa da criação de um estágio de pedestre em uma única interseção, deve-se aumentar o ciclo em toda uma rede de semáforos. Ressalta-se que o aumento do tempo de espera não incide somente para os condutores, mas sacrifica também os próprios pedestres. Se, de um lado, o estágio de pedestre propicia um tempo para que o pedestre possa realizar a travessia, de outro, provoca um significativo aumento no seu tempo de espera.

O respeito à preferência ao pedestre poderia gerar uma redução do tempo de espera não só do pedestre, mas também dos veículos. A redução do tempo de espera veicular pode parecer paradoxal à primeira vista, pois, no nível individual, o condutor “ganha” tempo não dando preferência ao pedestre. Mas, no nível coletivo, a redução do tempo de espera veicular pode ser possível com a redução do ciclo devido à eliminação do estágio de pedestres nos cruzamentos semaforizados.

Assim, se houvesse o respeito à preferência de passagem do pedestre, os motoristas ganhariam tempo, pois o tempo de espera nos semáforos poderia ser reduzido de forma bastante significativa com a eliminação do estágio de pedestres. Os condutores deveriam dar a preferência de passagem ao pedestre, não para beneficiar o pedestre ou por “civilidade” ou “educação”, mas em benefício próprio.

²⁰ Ver NT 204 – Realimentação no SCOOT.

Aqui se aplicaria muito bem o paradoxo socrático: os condutores agem de forma imediatista, pensando que levam vantagem ao não respeitar a preferência do pedestre, pois desconhecem os prejuízos causados a si próprios por tal comportamento. O “mal” que eles praticam é devido à sua ignorância. Daí a importância de se efetuar campanhas de esclarecimento visando eliminar essa “ignorância”. Note que não se trata de campanhas “educativas”, mas, sim, de esclarecimento e de convencimento. Refrise-se, não se trata de educação, civilidade ou moralidade, mas de obtenção de benefício próprio, de prática de egoísmo mesmo ...

Se houvesse respeito à preferência do pedestre, o conceito de estágio de pedestre se inverteria. Em vez de ser implantado para permitir a travessia de pedestres, o estágio seria implantado apenas para propiciar o movimento de conversão de veículos, em locais de grande fluxo de pedestres, onde não haveria brechas para os veículos efetuarem a manobra de conversão.

9. TRAVESSIAS DE PEDESTRES COM VERDE MUITO LONGO

Antes da mudança inovadora do Programa de Proteção ao Pedestre (PPP) em maio de 2011, o tempo de verde de pedestre e o tempo de vermelho intermitente de pedestre tinham os seguintes significados:

- Tempo de verde de pedestre = tempo para a realização da travessia.
- Tempo de vermelho intermitente de pedestre = tempo de alerta ao pedestre que ainda se encontra na travessia de que o tempo de travessia está acabando e que está iminente a abertura de verde para os veículos.

Assim, o vermelho intermitente era dimensionado com uma duração de apenas 3 a 6 segundos. O pedestre, ao se deparar com a indicação de vermelho intermitente, tinha que correr para completar a travessia. Essa situação apresentava o seguinte problema:

- O pedestre que chegasse na travessia após o início do tempo de verde não sabia se o tempo restante do verde seria suficiente para a realização da travessia.

Em particular, em travessias “não carona”²¹:

- O pedestre tinha tempo suficiente para realizar a travessia somente se a iniciasse no início do verde.
- O pedestre que iniciasse a travessia depois do início do verde não tinha mais tempo suficiente para a realização da travessia, sendo obrigado a correr para concluir a travessia.

Por outro lado, em travessias “carona”, geralmente o tempo de verde de pedestre é longo, muito maior do que o necessário para a realização da travessia.

Em tese, numa travessia semaforizada de pedestres, quanto maior é o tempo de verde para pedestres, maior deveria ser a tranquilidade, a segurança e o conforto para o pedestre realizar a travessia.

Entretanto, antes do advento do PPP, em travessias “carona” muito extensas, era possível observar um comportamento não esperado do pedestre que chegava durante o seu tempo de verde. Quando ele chegava no meio do verde, ele não tinha como saber quanto restava ainda de verde e se o tempo restante seria ou não suficiente para completar a travessia. O que se observava, então, é que o pedestre iniciava a travessia com passos rápidos e ia afrouxando o passo à medida que chegava ao fim da travessia.

²¹ Ver a conceituação de travessia “carona” e “não carona” no artigo “Um paradoxo nas travessias semaforizadas de pedestres”: http://www.sinaldetransito.com.br/artigos/verde_verm.pdf

Esse comportamento denotava uma sensação de dúvida, insegurança e intranquilidade do pedestre quando ele chega na interseção no meio do verde.

Assim, não importava quão longo é o tempo de verde do pedestre, o problema é que, ao chegar na travessia durante o tempo de verde, o pedestre não sabia quanto de verde ainda tinha disponível para a travessia.

Este fenômeno foi observado na travessia "em carona" do cruzamento Av. Morumbi x Av. Santo Amaro numa vistoria realizada em 19/05/2003, conforme descrito em "Um paradoxo nas travessias semaforizadas de pedestres" ²¹.

Presume-se que essa "sensação de insegurança" decorria de três fatos:

- a) quando o pedestre chega, ele não sabe se o tempo de verde que ainda resta é suficiente para iniciar e concluir a travessia;
- b) a travessia é bastante extensa;
- c) dependendo da posição do pedestre na travessia, o tempo de vermelho intermitente (normalmente de 3 a 6 segundos) não garantia ao pedestre que ele pudesse concluir a travessia sem a necessidade de correr.

Diante destes fatos, o pedestre, quando chegava no cruzamento, sem saber se o verde restante era ou não suficiente, decidia arriscar-se a iniciar a travessia em passos mais apressados. Entre ter que correr no início ou no final da travessia, a preferência era pelo início, talvez devido a um perfil psicológico mais conservador das pessoas.

Assim, paradoxalmente, apesar do longo tempo de verde de pedestres (muito maior do que o necessário para realizar a travessia), os pedestres eram compelidos a andar a passos rápidos no início da travessia, demonstrando intranquilidade e insegurança.

Esse fato paradoxal, ao contrário dos outros casos aqui expostos, não era devido ao comportamento egoísta das pessoas, mas a uma deficiência da sinalização.

Felizmente, essa deficiência foi sanada com a implementação do novo significado das indicações verde e vermelho intermitente, introduzido pelo Programa de Proteção ao Pedestre (PPP). Com o PPP, as indicações de verde e vermelho intermitente passaram a ter o seguinte significado:

- Verde de pedestre = indica ao pedestre que pode iniciar a travessia.
- Vermelho intermitente de pedestre = tempo necessário para concluir a travessia (para quem iniciou a travessia no verde).

Agora, o pedestre que iniciar a travessia durante a indicação verde (mesmo que seja no último segundo de verde), tem garantia de ter tempo suficiente para concluir a travessia, sem precisar correr ou apressar o passo.