

## Congestionamento

Alexandre Porsse<sup>Ф</sup> • Vinícius Vale<sup>Φ</sup>

<sup>Φ</sup> Professor do Departamento de Economia e do Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento Econômico (PPGDE) da Universidade Federal do Paraná (UFPR) e Pesquisador do Núcleo de Estudos em Desenvolvimento Urbano e Regional (NEDUR)

Material desenvolvido para a disciplina Economia Regional e Urbana do Curso de Ciências Econômicas da Universidade Federal do Paraná (UFPR). Os professores autorizam o uso desse material em outros cursos desde que devidamente citados os créditos.

Agosto/2020





#### **Tópicos**

- Custo de congestionamento
- Demanda pela autoestrada
- Alocação de tráfego: equilíbrio e o ótimo social
- Pedágios
- Escolha da capacidade da autoestrada
- Evidências empíricas



## Introdução

#### Curitiba (PR)



#### São Paulo (SP)





## Introdução







 A relação entre a velocidade do tráfego (s) e o número carros na autoestrada (T) é dada por:

$$s = s(T)$$

$$s'(T) \begin{cases} = 0 & \text{se } 0 < T \le \overline{T} \\ < 0 & \text{se } T > \overline{T} \end{cases}$$

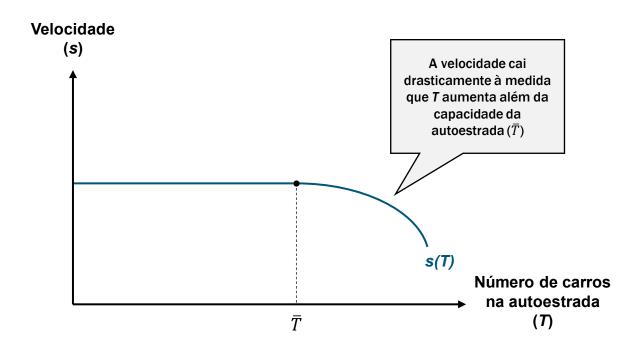
em que T é o número de carros na autoestrada e  $\bar{T}$  é a capacidade máxima de tráfego da autoestrada.

- A velocidade (s) não é afetada pelo volume de tráfego enquanto T é baixo.
- Quando T aumenta acima da capacidade da autoestrada (T), o tráfego fica mais lento e a velocidade (s) cai.



$$s = s(T)$$

$$s'(T) \begin{cases} = 0 & \text{se } 0 < T \le \overline{T} \\ < 0 & \text{se } T > \overline{T} \end{cases}$$





 A curva de custo de comutação individual é o espelho da curva de velocidade:

$$g = g(T)$$

$$g'(T) \begin{cases} = 0 & se \quad 0 < T \le \overline{T} \\ > 0 & se \quad T > \overline{T} \end{cases}$$

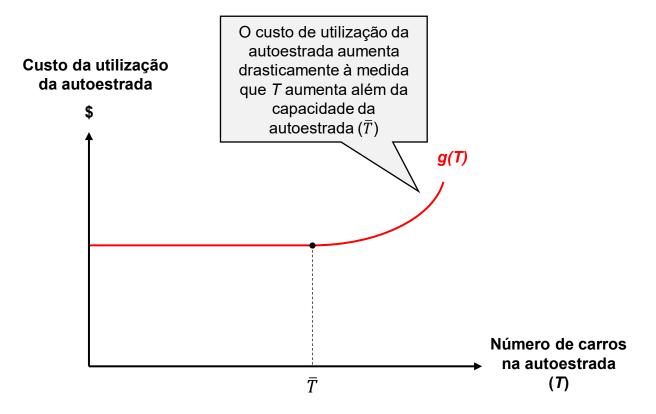
em que T é o número de carros na autoestrada e  $\overline{T}$  a capacidade máxima de tráfego da autoestrada.

- Quando a estrada está sem congestionamento (T baixo), um aumento de T não tem efeito sobre o custo de deslocamento.
- Quando T aumenta acima da capacidade da autoestrada  $(\overline{T})$ , o tráfego fica mais lento, a velocidade (s) cai, a duração da viagem aumenta e, então, o seu custo de tempo.



$$g = g(T)$$

$$g'(T) \begin{cases} = 0 & \text{se } 0 < T \le \overline{T} \\ > 0 & \text{se } T > \overline{T} \end{cases}$$





O custo de comutação agregado (CT) é dado por:

$$CT = Tg(T)$$

em que T é o número de carros e g(T) o custo por carro.

• O custo médio (AC) corresponde ao custo de comutação agregado dividido pelo número de carros na autoestrada:

$$AC = \frac{Tg(T)}{T} = g(T)$$

• Ou seja, AC corresponde ao custo de comutação individual (g(T)).



• Derivando o custo de comutação agregado (CT = Tg(T)) em relação a T, obtém-se o **custo marginal** (MC):

$$MC = \frac{dCT}{dT} = g(T) + Tg'(T)$$

• Substituindo AC = g(T) em MC, temos:

$$MC = AC + Tg'(T)$$

em que AC representa o custo de comutação individual e Tg'(T) a **externalidade do carro adicional** (externalidade do congestionamento).



Ou seja, a curva de custo marginal

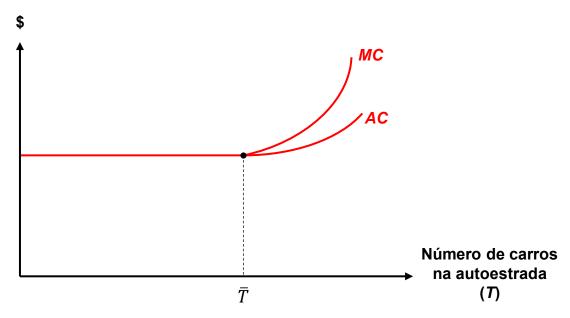
$$MC = \frac{dCT}{dT} = g(T) + Tg'(T)$$

#### representa dois efeitos:

- 1. O carro adicional incorre em um custo igual a g(T).
- 2. O carro adicional implica em custos para todos os outros carros da autoestrada dado o carro adicional.











 Para derivar a demanda pela autoestrada, considere novamente a figura inicial que mostra as possíveis rotas alternativas: linha de trem suburbana que liga o subúrbio à cidade e uma estrada local que também passa nessas duas localidades.

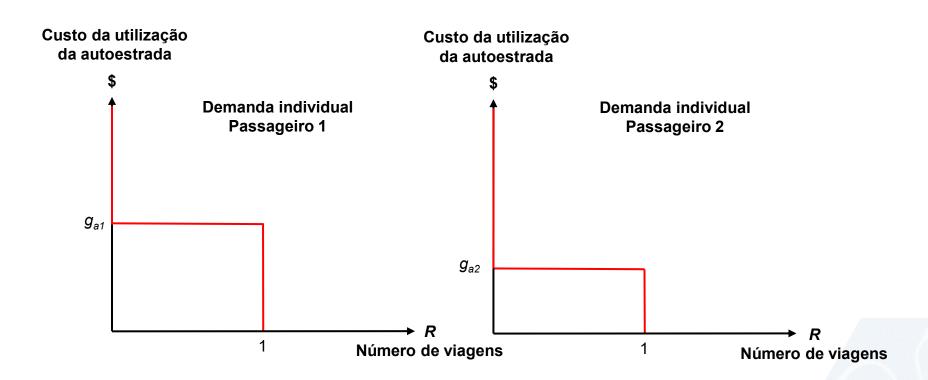




- A linha de trem e a estrada local representam rotas alternativas que podem ser usadas para acessar o centro da cidade.
- A melhor rota alternativa é diferente entre os usuários.
- Para cada usuário (passageiro), a rota alternativa preferida é aquela com menor custo em relação à autoestrada.
- Suponha que o menor custo da rota alternativa seja denotado por  $g_a$  e que este seja diferente para cada usuário.
- Suponha também que o custo de uso da autoestrada seja o mesmo para todos os usuários (g(T) ou AC).



A demanda pelo uso da autoestrada (R = número de viagens) é determinada pela decisão de cada usuário baseada em  $g_a$  e no custo de uso da autoestrada.



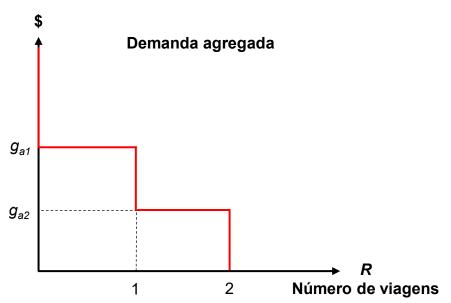




A demanda agregada pelo uso da autoestrada será dado pela soma horizontal das demandas individuais.

A curva de demanda agregada pela autoestrada tem o formato de degrau.

#### Custo da utilização da autoestrada

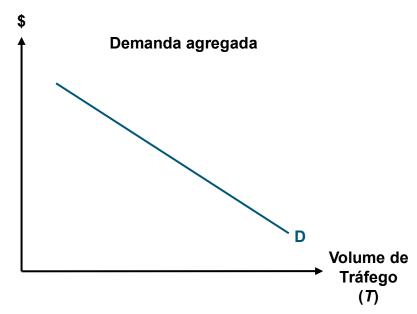






Assumindo um número de usuário grande, a curva de demanda assume o formato usual linear e com inclinação negativa.

#### Custo da utilização da autoestrada







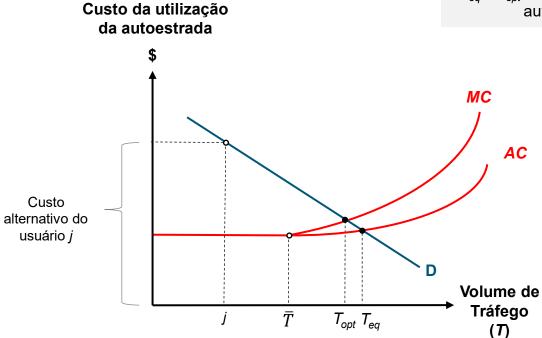
### **Equilíbrio**

Qual é o equilíbrio? E o ótimo social?

 $T_{eq}$  é volume de tráfego de equilíbrio

 $T_{opt}$  é volume de tráfego socialmente ótimo

 $T_{eq}$  >  $T_{opt}$  implica que muitos carros usam a autoestrada no equilíbrio







#### **Equilíbrio**

- A curva de demanda corta as curvas MC e AC em suas partes ascendentes.
- O volume de tráfego de equilíbrio ( $T_{eq}$ ) é maior que o volume de tráfego socialmente ótimo ( $T_{opt}$ ).
- A existência de congestionamento é consistente com a solução de equilíbrio e com o ótimo social.



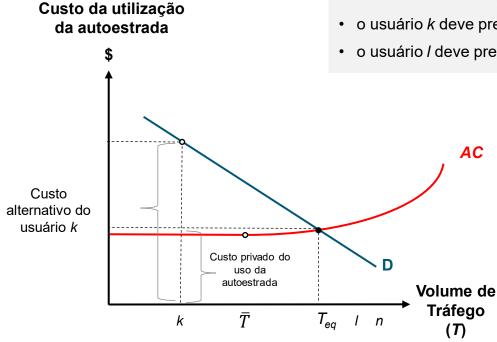
### **Equilíbrio**

Qual é o equilíbrio?

O volume de tráfego de equilíbrio ( $T_{eq}$ ) é determinado pela intersecção entre a curva de demanda e a curva de custo médio.

Assumindo que o número máximo de comutadores é *n*, temos que:

- o usuário k deve preferir usar a autoestrada;
- o usuário / deve preferir usar a rota alternativa.





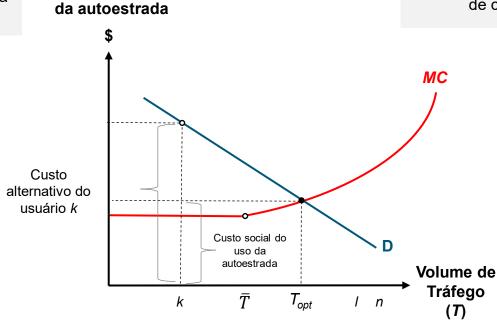
#### Ótimo social

Qual é o ótimo social?

O volume de tráfego socialmente ótimo  $(T_{opt})$  é determinado pela intersecção entre a curva de demanda e a curva de custo marginal.

É a alocação que minimiza o custo de comutação total e que não pode ser reduzido pela mudança de rota de qualquer usuário (ótimo de Pareto).

Se os usuários *k* ou *l* mudam de rota, o custo de comutação total aumenta.



Custo da utilização



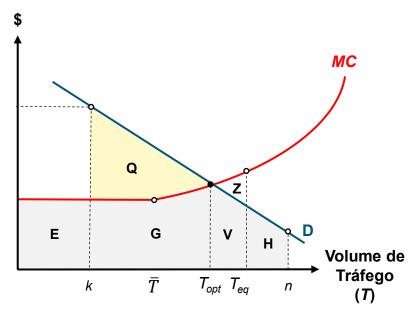
# Ótimo social: representação geométrica

O custo total de comutação pode ser definido pela áreas abaixo das curvas MC e D conforme a decisão dos usuários entre uso da autoestrada ou da rota alternativa.

Essa área (custo total de comutação) será mínima somente no ponto T<sub>opt</sub>:

Área = E+G+V+H.

#### Custo da utilização da autoestrada







## Equilíbrio x Ótimo social

- O equilíbrio tem muitos usuários na autoestrada.
- Os usuários não têm incentivo para considerar o custo social do uso da autoestrada.
- Os usuários concentram-se em particular no custo privado menor, que não inclui o dano de externalidade.
- Como corrigir esse problema?
- Como fazer que o equilíbrio socialmente ótimo seja alcançado?
- O equilíbrio ótimo pode ser alcançado através da tarifação do congestionamento.

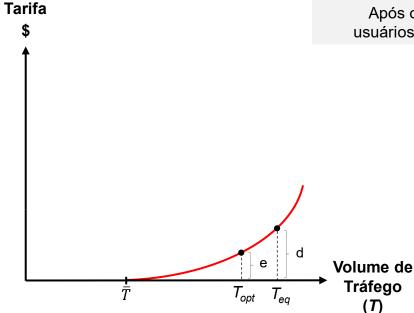


# Pedágio para controle do congestionamento

A tarifa de pedágio deve corresponder à diferença vertical entre as curvas MC e AC.

A tarifa no ponto  $T_{eq}$  (altura d) é mais elevada que a tarifa socialmente ótima (altura e)

Após o ajuste comportamental dos usuários, a tarifa pode ser fixada em e.





#### **Mecanismos alternativos**

- Mecanismos alternativos podem ser adotados:
- Aumento do imposto sobre combustíveis:
  - Eficácia limitada porque todos os usuários pagariam imposto independente de usar a autoestrada nos períodos congestionados e sem congestionamento.
- Taxação de estacionamento;
- Redução de velocidade nas áreas centrais;
- Restrição de tráfego nos horários de pico.

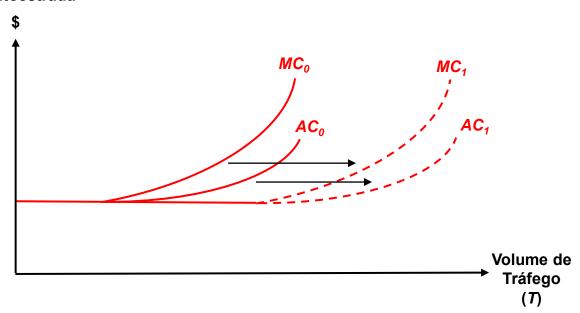


- Qual deve ser o tamanho da autoestrada para eliminar o congestionamento?
- Qual deve ser o tamanho da expansão da autoestrada?
- A autoestrada deve ser ampliada?



A ampliação da capacidade da autoestrada implica em deslocamento horizontal das curvas MC e AC, expandindo o volume de tráfego de saturação  $\bar{T}$  .

#### Custo da utilização da autoestrada







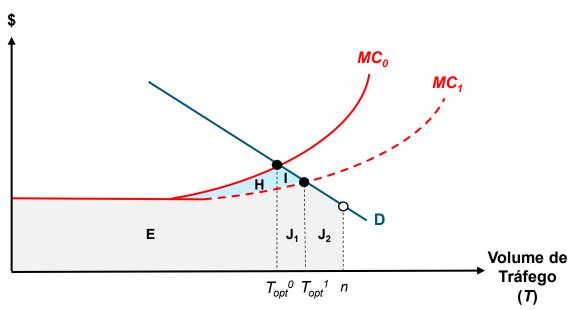
- Mas qual o tamanho ótimo da autoestrada?
- O tamanho ótimo da autoestrada deve ser com congestionamento!
- A expansão da infraestrutura rodoviária é muito dispendioso, devendo haver algum ganho em realizar tal investimento.
- O ganho é dado pela redução no custo de comutação total.
- Esse ganho compensa o investimento necessário para expandir a autoestrada?
- Não! Logo, a expansão envolve algum nível de congestionamento.



A área H+I representa o benefício social da expansão da autoestrada, ou seja, a redução do custo de comutação total.

O investimento em expansão é desejável quando seu custo se iguala ao ganho (área H+I).

#### Custo da utilização da autoestrada







#### Evidências empíricas

American Economic Review 101 (October 2011): 2616–2652 http://www.aeaweb.org/articles.php?doi=10.1257/aer.101.6.2616

#### The Fundamental Law of Road Congestion: Evidence from US Cities<sup>†</sup>

By GILLES DURANTON AND MATTHEW A. TURNER\*

We investigate the effect of lane kilometers of roads on vehicle-kilometers traveled (VKT) in US cities. VKT increases proportionately to roadway lane kilometers for interstate highways and probably slightly less rapidly for other types of roads. The sources for this extra VKT are increases in driving by current residents, increases in commercial traffic, and migration. Increasing lane kilometers for one type of road diverts little traffic from other types of road. We find no evidence that the provision of public transportation affects VKT. We conclude that increased provision of roads or public transit is unlikely to relieve congestion. (JEL R41, R48)

DURANTON, G.; TURNER, M. A. The fundamental law of road congestion: Evidence from US cities. **American Economic Review**, v. 101, n. 6, p. 2616-52, 2011. [Link]





# Como financiar a expansão das autoestradas?

- Impostos
- Pedágios
  - Neste caso, a receita de arrecadação da tarifa de pedágio deve pagar exatamente o custo de expansão.



#### Referências

#### Básica:

• BRUECKNER, J. K. Lectures on urban economics. MIT Press, 2011.



#### **Contato**

Professores:

#### **Prof. Alexandre Alves Porsse:**

porsse@gmail.com

#### Prof. Vinícius de Almeida Vale:

vinicius.a.vale@gmail.com







Av. Prefeito Lothário Meissner, nº 632 – Setor de Ciências Sociais | UFPR



www.nedur.ufpr.br



nedur.ufpr@gmail.com