

Sistemas “Inteligentes” de  
Transportes (ITS)  
[Intelligent Transport Systems]

# Objetivos de Aprendizado da Aula 2

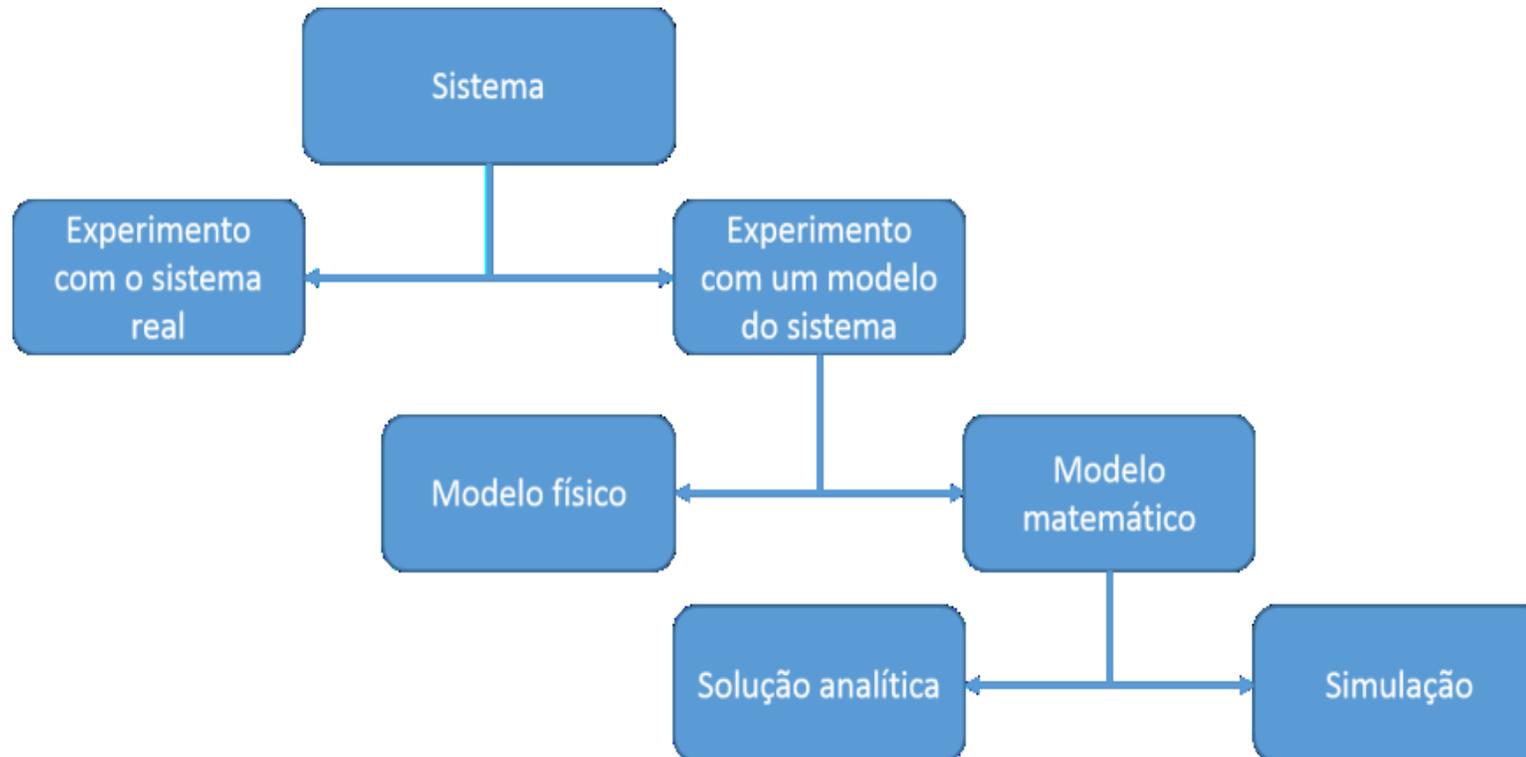
## Parte 1

- Modelos de Simulação Computacional de Tráfego
- Métodos Determinísticos e Estocásticos
- 3 Abordagens de Modelos de Simulação → Micromodelos ou Microsimulação

## Parte 2

- PTV VISSIM – modo de funcionamento
  - *Car-following, Lane changing, Gap acceptance e Decision routes*
- Modelos de Simulação: Wiedemann 74 (e 99)

# Modos de se estudar um sistema



# Modelos

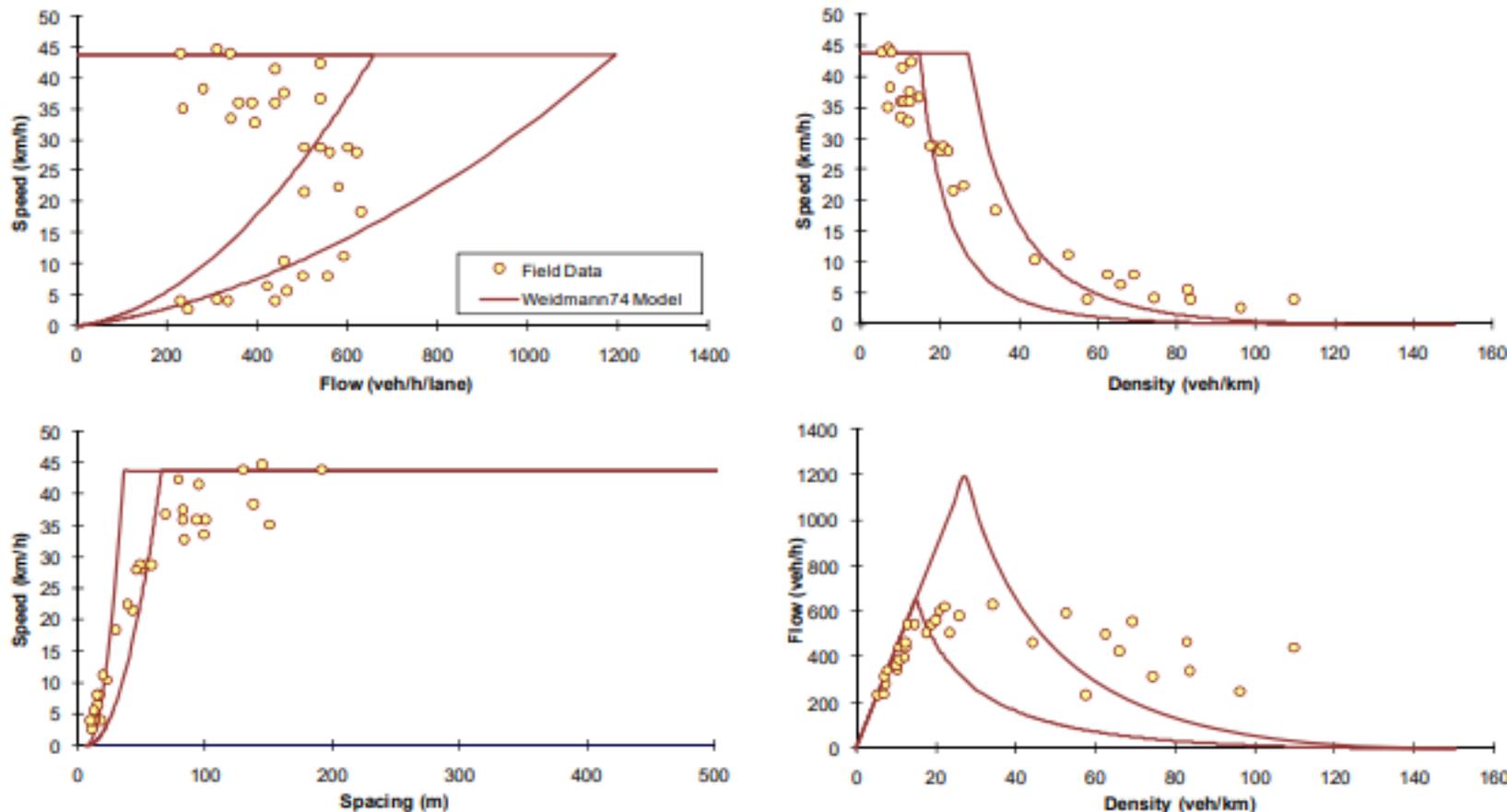
- De acordo com Ortúzar e Willumsen (2011)
  - É uma **representação simplificada** de parte da realidade (\*), com **foco em aspectos considerados relevantes**, para uma determinada análise ou ponto de vista
    - podendo constituir tanto num **modelo físico quanto num modelo abstrato**.
- (\*) uma vez que a análise envolvendo todos os fatores e condicionantes seria extremamente complexa.
- **Modelos abstratos** baseiam-se em equações matemáticas para compreender e prever o comportamento da realidade.
  - Eles são **amplamente empregados no planejamento e análise de sistemas de transportes**.

ORTÚZAR, J. D. ; WILLUMSEN, L. G. **Modeling Transport**. 4ª Edição. Chichester: John Wiley & Sons Ltd., 2011. ISBN 978-0-470-76039-0.

# Modelos de Simulação

- A palavra simulação é derivada do latim “*simulatus*” cujo significado é **imitar**
    - A simulação pode ser entendida como a imitação de uma situação real através do uso de modelos.
  - A simulação envolve o estabelecimento de um modelo do sistema em estudo, em que todos os componentes são definidos e o modo que variam durante o tempo, e se afetam, é especificado com exatidão
  - O modelo é então simulado e seu comportamento observado
    - Os valores obtidos são comparados com os observados na realidade (\*), se houver uma correspondência próxima, então o **modelo é uma boa representação da realidade** (Balmer e Paul, 1985)
- (\*) CALIBRAÇÃO

# Relação Fundamental do Fluxo de Tráfego utilizados em microssimuladores de tráfego (Wiedemann 74) [Rakha, Gao (2019)]



RAKHA, H.; GAO, Y.  
**CALIBRATION OF STEADY-STATE  
CAR-FOLLOWING MODELS  
USING MACROSCOPIC LOOP  
DETECTOR DATA FINAL REPORT.**  
Virginia.

**Figure 3: Sample Calibration of the Wiedemann74 Model**

Disponível em: <<https://pdfs.semanticscholar.org/e9ce/dca8b19cb57b88742c4212156f2837051f42.pdf>>.

Acesso em: 19 abr. 2019a.

# Simulação Computacional e de Tráfego

- Os Modelos de **Simulação computacional**, de modo geral, consistem em **representações matemáticas da realidade**
- Os **Simuladores de Tráfego** começaram a ser desenvolvidos na década de 1950 e buscam:
  - Representar a utilização das vias pelos veículos e demais usuários, a fim de possibilitar o planejamento de **situações futuras** e análises de **novos projetos** e **soluções de controle de tráfego**. (PORTUGAL, 2005)
  - Simular as situações e condições de tráfego de uma via, cruzamento ou rede viária.

# Métodos: Determinístico e Estocástico

- O funcionamento e a interação entre os elementos do modelo de simulação podem seguir dois métodos: Determinístico e Estocástico.
- No **determinístico** as **variáveis contêm um fator de aleatoriedade**, ou seja, elas são definidas em termos matemáticos com precisão e exatidão: onde e quando o evento ocorre, sua duração, etc (Portugal, 2005).
  - Pode-se afirmar que um conjunto de dados de entrada produzirá sempre os mesmos resultados de saída.
- No **método estocástico** possíveis variações podem ocorrer com as **variáveis** que são consideradas **aleatórias**, obedecendo a leis estatísticas de distribuições predeterminadas. (Portugal, 2005).
  - Nesse método o modelo contém uma ou mais variáveis aleatórias, cujo papel será representado através de **amostras** (Saliby, 1989).
  - Os resultados desse método não serão exatos, mas sim estatísticos.

PORTUGAL, L. S. **Simulação de tráfego: conceitos e técnicas de modelagem.** Rio de Janeiro : Interciência, 2005.

SALIBY, E. **Repensando a simulação: A amostragem descritiva.** São Paulo: Atlas, Rio de Janeiro: Editora da UFRJ, 1989.

# Abrangência

- As funções da técnica de simulação podem abranger:
  - a avaliação do desempenho de um sistema - quando comparado a critérios específicos,
  - a comparação entre diversos sistemas e cenários possíveis,
  - a previsão do desempenho de um sistema - dadas certas condições,
  - a análise de sensibilidade do sistema frente aos fatores envolvidos,
  - a otimização de um sistema, ou seja, a escolha da combinação de fatores que maximiza o seu funcionamento (Oliveira, 1988).

**OLIVEIRA, M. J. F. Notas de aula do Curso de Simulação da Área de Pesquisa Operacional do Programa de Engenharia de Produção.1988**

# “Três” abordagens em simulação

- Para a simulação de tráfego e transporte público podem-se contemplar “três” tipos de abordagem, de acordo com o nível de detalhamento e abrangência da simulação (Poyares, 2000; TRB, 2000):
  - Macroscópica,
  - Mesoscópica e
  - Microscópica

POYARES, C. N. **Critérios para Análise dos Efeitos de Políticas de Restrição ao Uso de Automóveis em Áreas Centrais**. Tese de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 2000

TRB. **Transit Capacity and Quality of Service Manual (TCQSM)**, 3ª Edição. Disponível em <http://www.trb.org/Main/Blurbs/169437.aspx>

# “Três” abordagens em simulação

- Os Modelos de Simulação de Tráfego podem ser classificados de diversas formas
- A principal classificação está relacionada com sua abordagem e resolução
- Quanto maior a resolução maior a complexidade do modelo (BURGHOUT; KOUTSOPOULOS; ANDREASSON, 2006a; PORTUGAL, 2005; SLOBODEN et al., 2012)

BURGHOUT, W.; KOUTSOPOULOS, H. N.; ANDREASSON, I. A Discrete-Event Mesoscopic Traffic Simulation Model for Hybrid Traffic simulation. **Proceedings of the IEEE Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC)**, n. September 2014, p. 1102–1107, 2006a

SLOBODEN, J. et al. **Guidebook on the Utilization of Dynamic Traffic Assignment in Modeling.**

Disponível em: <<https://ops.fhwa.dot.gov/publications/fhwahop13015/fhwahop13015.pdf>>. Acesso em: 14 jan. 2018.

# Bibliografia de referência

- PORTUGAL, L. DA S. **Simulação de Tráfego: Conceitos e Técnicas de Modelagem**. Editora Interciência Ltda., 2005.
- BURGHOUT, W.; KOUTSOPOULOS, H. N.; ANDREASSON, I. A Discrete-Event Mesoscopic Traffic Simulation Model for Hybrid Traffic simulation. **Proceedings of the IEEE Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC)**, n. September 2014, p. 1102–1107, 2006a.
- SLOBODEN, J. et al. (2012). **Guidebook on the Utilization of Dynamic Traffic Assignment in Modeling**. Disponível em: <<https://ops.fhwa.dot.gov/publications/fhwahop13015/fhwahop13015.pdf>>. Acesso em: 14 jan. 2018.

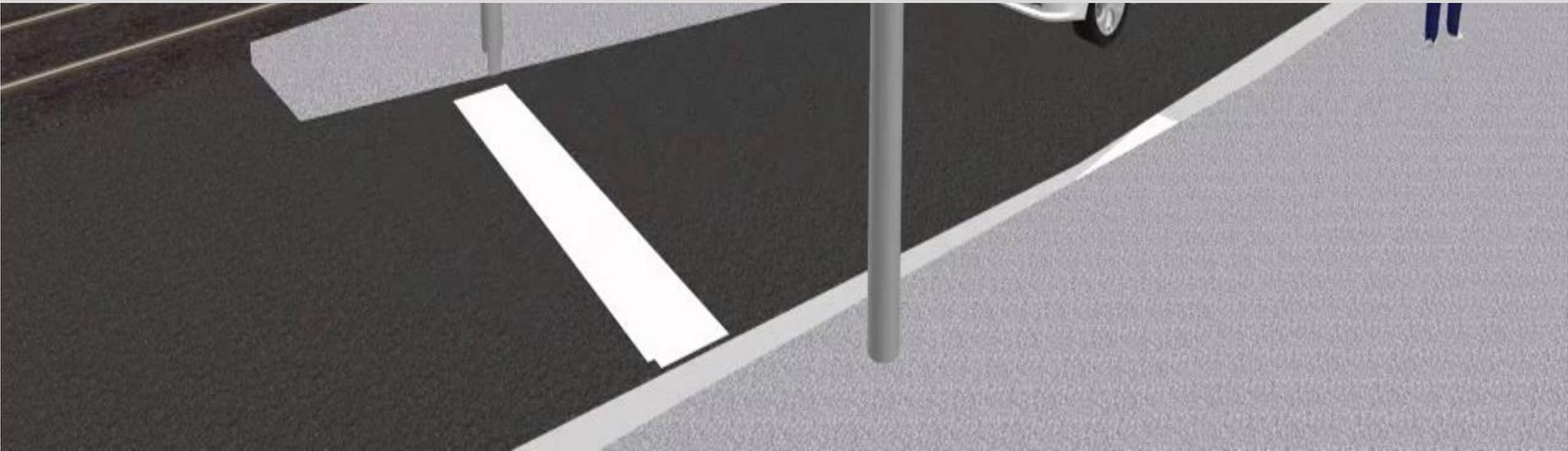
# Modelos de Simulação de Tráfego: Micromodelos

- De resolução detalhada, tanto quanto necessário à análise pretendida
- Baseia-se no **comportamento individual dos usuários**
  - especialmente no tocante à interação entre os mesmos (carro seguidor e mudança de faixas)
- Utilizado nas **análises de trechos de via e pequenas áreas**
- Simula o **comportamento dos usuários com relação às alterações nos sistemas de controle como semáforos e rotatórias**



**Micro simulation with**

**PTV VISSIM**



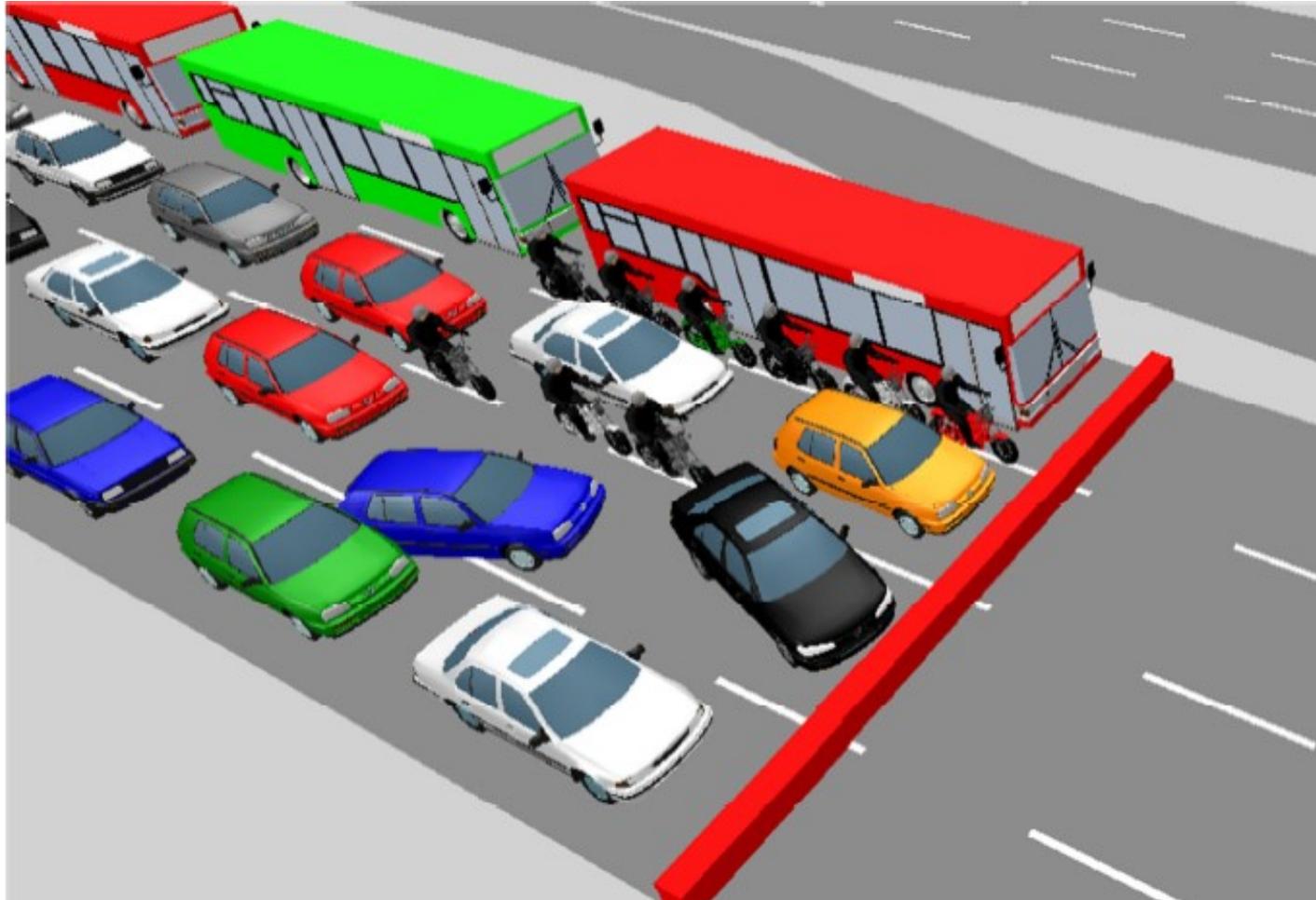
Actual situation



BRT /Bus corridor

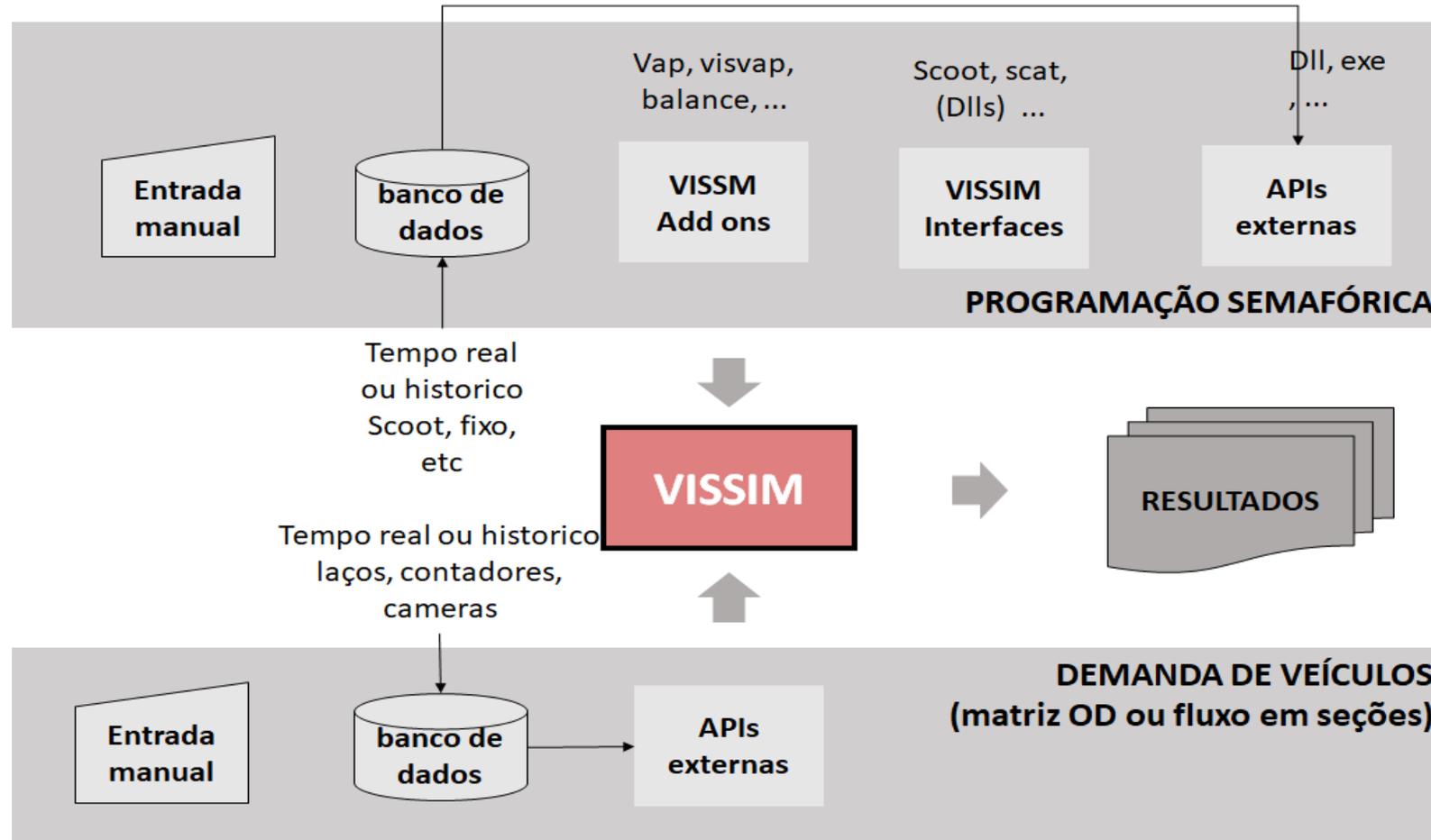


# Modelos de Simulação de Tráfego: Micromodelos



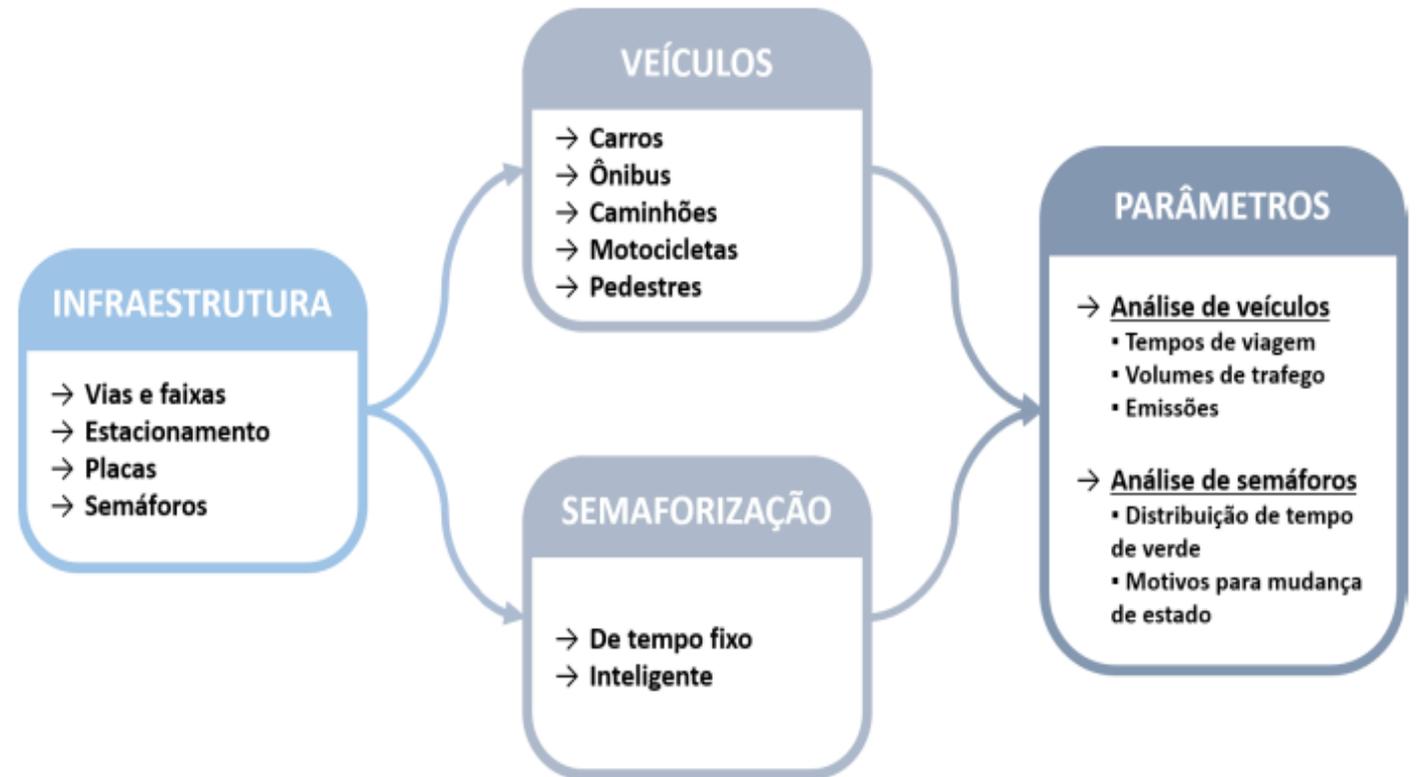
*Simulação gráfica  
de semáforo  
pelo software VISSIM.  
(PERON, 2015)*

# VISSIM: dados de entrada do VISSIM



# VISSIM: funcionamento

O VISSIM trabalha a partir de um esquema de modelagem de tráfego que considera objetos como: a infraestrutura da rede, a semaforização (controle), veículos e diferentes parâmetros (atributos)



# VISSIM: funcionamento

- O VISSIM é um **modelo microscópico de simulação**, desenvolvido na Alemanha, para modelar o tráfego urbano em redes e vias expressas.
- Permite analisar o **tráfego em geral** [*PrT* (Veículos de transporte privado, incluindo motocicletas e bicicletas)] e as operações de **ônibus** [*PT* (Veículos de transporte público)], considerando a **configuração das faixas de tráfego**, a **composição do tráfego**, os sinais **semafóricos**, as **paradas de ônibus**, as faixas exclusivas de ônibus entre outros. O software também permite a modelagem e simulação de tráfego de **pedestres**.
- É capaz de **modelar interseções e ultrapassagens com regras de prioridade**.
- Seus dados de **saída** podem incluir a avaliação de: **volumes, tempo de viagem, atraso, formação de filas, tempo de espera, densidade de fluxo**, entre outros. (Poyares, 2000; Portugal, 2001).

# VISSIM: modelos

O fluxo de tráfego veicular no VISSIM é centrado em quatro modelos:

- 1. *car-following*: que descreve a movimentação longitudinal dos veículos;
- 2. *lane changing*: que descreve a movimentação lateral destes;
- 3. *gap acceptance*: que modela o comportamento nas interseções em relação à questão da prioridade e dos conflitos;
- 4. *decision routes*: que modela a escolha de rotas, podendo ser estas estáticas (totais ou parciais) ou dinâmicas (Matriz O/D).

# Modelos de Simulação: Wiedemann 74

***Car Following***

***Lane Changing***

# Wiedemann: *car-following*

- O modelo *car-following* representa os **movimentos longitudinais do fluxo de tráfego**,
  - exercendo influência sobre variáveis como **densidade e velocidade**.
- Ao se aproximar de um **controlador semafórico** em um raio de 100 metros, o **condutor passa a ter um elevado estado de atenção**,
  - o seu tempo de reação e as suas manobras com relação ao carro da frente passam a ser menores.
- O VISSIM possui um outro modelo de Wiedemann - 1999, e voltado para rodovias (cenário interurbano).
  - Para rodovias com múltiplas faixas, o condutor no modelo do VISSIM leva em conta não apenas os veículos a sua frente, que por padrão são considerados os 4 primeiros veículos que estão a sua frente, mas também os veículos nas duas faixas adjacentes.

# Wiedemann: *car-following*

- O Vissim simula o fluxo de tráfego movimentando **unidades condutor-veículo** (*driver- vehicle-units*) através de uma rede.
- Cada motorista tem um comportamento específico e é atribuído a cada um veículo específico.
  - Como consequência, o comportamento durante a condução corresponde às capacidades de seu veículo.
- Atributos, caracterizando cada **unidade condutor-veículo**, podem ser subdivididos nas **três categorias** seguintes:
  - Especificações técnicas dos veículos
  - Comportamento da unidade condutor-veículo
  - Interdependência das unidades condutor-veículo

# Especificações técnicas dos veículos

## + Exemplos

- Comprimento do veículo
- Velocidade máxima
- Poder de aceleração
- Atual posição do veículo na rede
- Velocidade e aceleração

# Comportamento da unidade condutor-veículo + Exemplos

- Limiar psico-físico da percepção do condutor
  - habilidade de estimar
  - percepção da segurança
  - vontade de se arriscar
- Memória do condutor
- Aceleração baseada na velocidade atual e na velocidade desejada

# Interdependência das unidades condutor-veículo

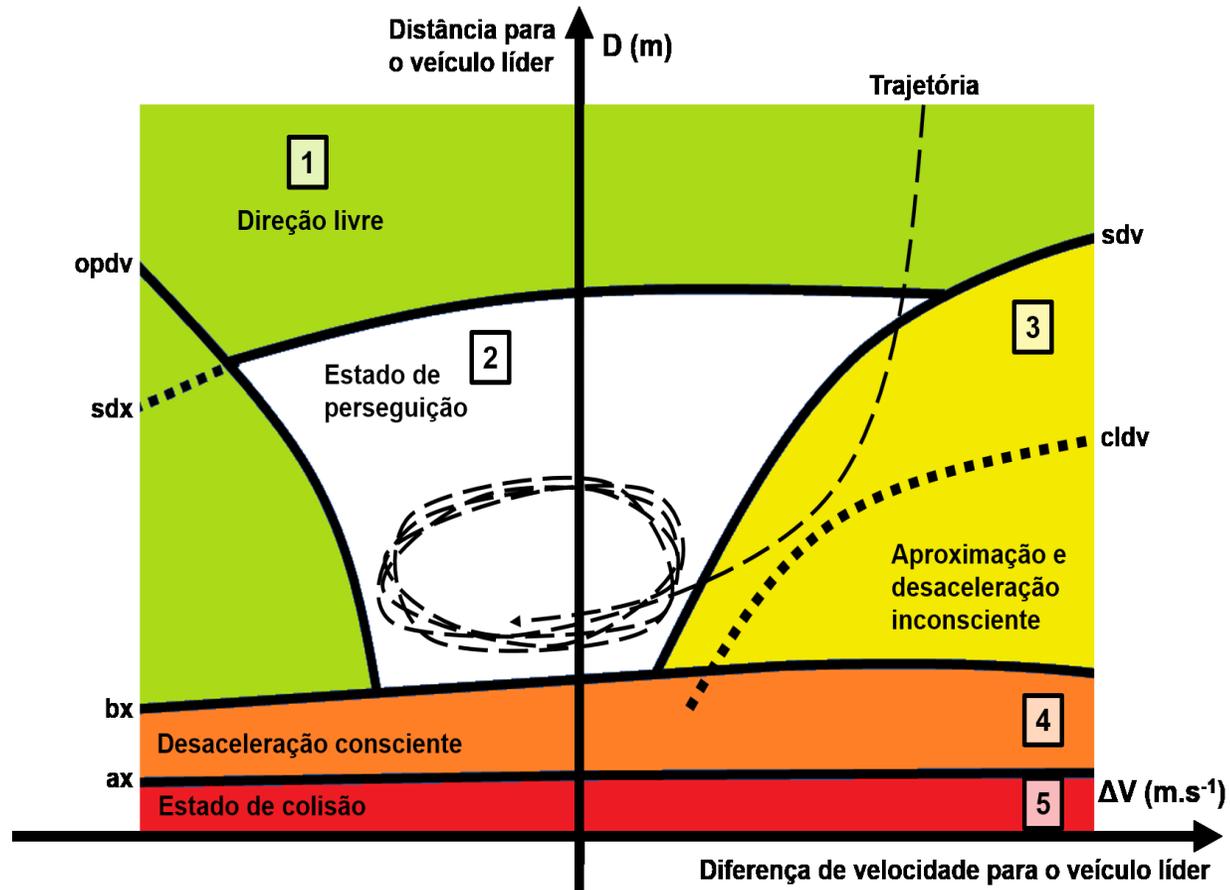
## + Exemplos

- Referência aos veículos na frente e atrás
  - nas próprias faixas como nas faixas do lado
- Referência ao trecho da rede no momento e no próximo nó
- Referência à próxima intersecção semafórica

# Wiedemann 74: *car-following*

- O modelo de Wiedemann parte do princípio que há 4 (quatro) estados/modos de condução:
  - Free Driving (**Dirigir livremente**)
  - Approaching (**Aproximação**)
  - Following (**Perseguição**)
  - Braking (**Frenagem**)
- Para cada um dos quatros estados de condução, a aceleração depende de parâmetros como:
  - a velocidade instantânea do veículo, a diferença de velocidade, a distância do veículo precedente, assim como características individuais do piloto e de seu carro.

# Wiedemann: Gráfico do modelo de *car following*



- SDV – *Selective Vehicle Detection*
- OPDV - *Opening Difference in Velocity*
- CLDV - *Closing Difference in Velocity*

Fonte: Lacerda e Neto (2005)  
MIRANDA, C. M. (2018)

# Parâmetros do modelo “Car Following” de Wiedemann 74

- O modelo é denominado psico-físico *car-following*, pois leva em conta aspectos psicológicos assim como fisiológicos da percepção do condutor.
- Com relação aos parâmetros que afetam o modelo:
  - A distância mínima entre veículos ( $A_x$ ) é composta por uma parcela representando a distância entre os veículos, quando estáticos
  - E uma parcela de segurança ( $B_x$ ).

# Parâmetros do modelo “Car Following” (Wiedemann 74)

- A primeira, denotada pelo termo  $AX$  é dada por:

$$AX = L + AX_{add} + AX_{mult} * rndl(I)$$

- Average Standstill distance (distância média para frenagem)
  - Define a distância média desejada entre dois veículos.
  - O valor fica numa margem de -1,0m a 1,0m, em relação ao valor padrão, e a sua distribuição é normal com média igual a 0m e desvio padrão de 0,3m em relação ao valor padrão.
  - O valor padrão do Vissim é 2,0.

$$AX = L + AX_{add} + AX_{mult} * rndl(I)$$

Onde:

- AX: distância entre os veículos quando parados em fila [m].
- L: comprimento do veículo líder [m].
- AX\_add: fator aditivo de Ax [m] (mínimo valor entre dois veículos sucessivos numa fila [m]).
- AX\_mult: fator multiplicativo de Ax [m].
- **rndl[I]: variável aleatória de distribuição normal** (truncada entre 0 e 1, N (0,5; 0,15))

AX\_mult e AX\_add são parâmetros de calibração.

# Parâmetros do modelo “Car Following” (Wiedemann 74)

- A parcela de segurança é dada por:

$$BX = (BX\_add + BX\_mult \times rndl(I)) \times \sqrt{v}$$

Onde:

- BX: distância de segurança [m].
- BX\_add: fator aditivo de Bx;
- BX\_mult: fator multiplicativo de Bx;
- v: velocidade do líder, enquanto houver aproximação dos veículos, e do veículo seguidor enquanto houver distanciamento [m/s].
- BX\_mult é um parâmetro de calibração e rndl(I) é uma variável aleatória de distribuição normal.

$$BX = (BX_{add} + BX_{mult} \times rndl(I)) \times \sqrt{v}$$

- Additive part of safety distance (parcela aditiva da distância de segurança)
  - ( $BX_{add}$ ): Valor usado para o cálculo da distância de segurança desejada “d”.
  - Permite ajustar o valor de tempo requisitado.
  - O valor padrão é 2,0.

$$BX = (BX_{add} + BX_{mult} \times rndl(I)) \times \sqrt{v}$$

- Multiplicative part of safety distance (parcela multiplicativa da distância de segurança)
  - ( $BX_{mult}$ ): Valor usado para o cálculo da distância de segurança desejada “d”. Permite ajustar o valor de tempo requisitado.
  - **Maiores valores significam distribuições mais espaçadas**
    - logo maiores valores de desvio padrão na distância de segurança.
  - O valor padrão do Vissim é 3,0.

# Parâmetros do modelo “Car Following” (Wiedemann 74)

- Desired distance (distância desejada)

- (d): Define a distância que um veículo deseja estar em relação ao veículo da frente:

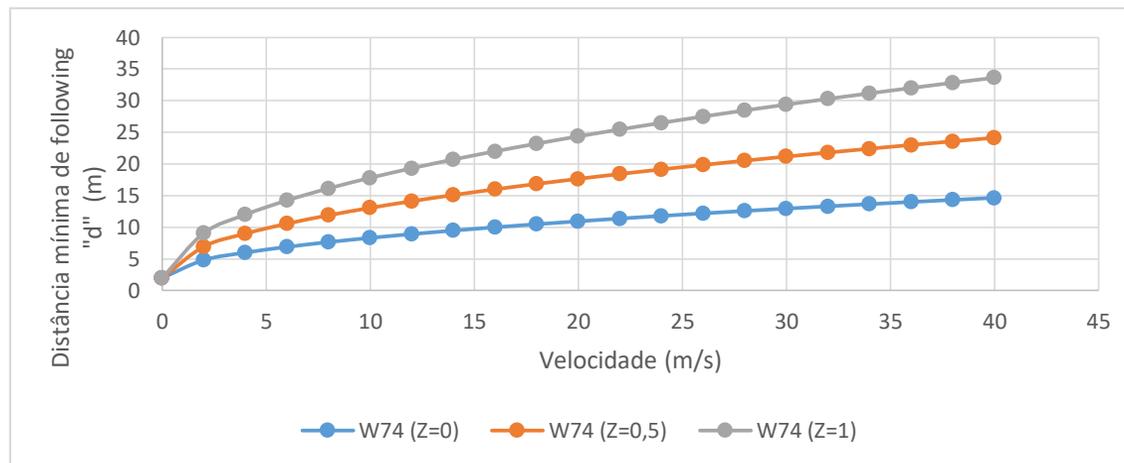
$$d = Ax + Bx$$

Na qual:

- $ax$ : distância média para frenagem
- $bx = (bx_{add} + bx_{mult} \cdot z) \sqrt{v}$  = distância de segurança [m].
- $v$ : velocidade do veículo (m/s)
- $z$ : é uma variável aleatória com distribuição normal  $N(0,5;0,15)$ , truncada entre 0 e 1, ou seja é distribuída em torno da média 0,5 e tem desvio padrão de 0,15, sendo seus valores mínimos e máximos - 0 e 1 respectivamente.

# Parâmetros do modelo “Car Following” (Wiedemann 74)

- O efeito da variável aleatória “z” pode ser observado abaixo, no gráfico que demonstra os resultados da distância “d” em relação à velocidade.
- É possível observar que a distância mínima de *following* é maior conforme o valor de “z”.



# Parâmetros do modelo “Car Following”

(Wiedemann 74)

## + Taxa de fluxo de saturação

- A taxa de fluxo de saturação define o número de veículos que passam em um link por uma hora.
- Os impactos causados por intersecções semaforicas e filas de trafego são descontados.
- A taxa de fluxo de saturação também depende dos seguintes parâmetros: velocidade, porcentagem de caminhões e número de faixas.
- No Vissim define-se o fluxo de saturação combinando os parâmetros  $BX_{add}$  e  $BX_{mult}$ .
- Usuários experientes podem querer utilizar esses parâmetros para adaptar o modelo aos dados observados.

# Parâmetros do modelo “Car Following” (Wiedemann 74)

- A distância entre veículos depende da geometria dos veículos e de sua velocidade.
- Nota-se que para velocidades altas a distância mínima é maior, necessitando de maior área viária – menor capacidade da via.
- Os valores de SDV, OPDV e CLDV são função da distância entre veículos, sua geometria e de parâmetros de calibração.
- Para comportamento em áreas urbanas o VISSIM permite alterar os parâmetros de calibração dessas variáveis, visando moldar o comportamento do motorista na cidade.
- Importante notar que geralmente as opções default do programa relacionam-se a parâmetros observados na Alemanha, país onde o *software* foi desenvolvido, e, portanto, muitas vezes apresentam diferenças em relação ao comportamento do motorista brasileiro.

# Parâmetros do modelo “Car Following” (Wiedemann 74)

- O VISSIM permite considerar capacidades de aceleração e desaceleração dos veículos, considerando dois valores:
  - o valor máximo (*maximum*) - que corresponderia a situações de emergência, onde o motorista acionaria a maior capacidade possível do veículo,
  - o **valor desejado** (*desired*) - que representa o valor usualmente adotado pelo motorista para operações normais.

Maximum acceleration:	3: Bus (1.24 m/s <sup>2</sup> , 250.00 km/h)	∨
Desired acceleration:	3: Bus (1.24 m/s <sup>2</sup> , 250.00 km/h)	∨
Maximum deceleration:	3: Bus (-7.50 m/s <sup>2</sup> , -5.10 m/s <sup>2</sup> )	∨
Desired deceleration:	3: Bus (-0.85 m/s <sup>2</sup> , -0.85 m/s <sup>2</sup> )	∨

# Wiedemann 74: *lane change*

- Além do modelo de *car-following*, o VISSIM ainda utiliza-se de **modelo de troca de faixas – *lane change* - para estimar o comportamento dos veículos.**
- Semelhante ao modelo de *car following*, o modelo de troca de faixas leva em conta variáveis aleatórias e tempos e espaços mínimos para a manobra ocorrer.
- Nas versões mais atuais do programa é permitido ainda calibrar parâmetros referentes à interação lateral entre veículos, permitindo, por exemplo, que motos andem entre os veículos.

# Wiedemann 74: *lane change*

- No Vissim há uma diferenciação em **duas situações** que podem ocorrer a mudança de faixa.
- Elas são:
  - *necessary lane change*
  - *free lane change.*

# Wiedemann 74: *lane change*

+ *necessary lane change*

(Mudança de faixa necessária)

- A mudança de faixa é necessária para que o veículo consiga chegar no conector que o leva à faixa desejada para a sua rota.
- Para essa mudança de faixa necessária os parâmetros de comportamento de condução (*driving behaviour parameters*) contém a máxima desaceleração aceitável para o veículo, que deseja mudar de faixa, em relação ao veículo que esta chegando por trás, na faixa que se será feita a manobra.

# Wiedemann 74: *lane change*

## + *Free lane change*

### (Mudança de faixa livre)

- A mudança de faixa acontece livremente, caso haja mais espaço e um incremento na velocidade seja exigido.
- Nessa situação, o VISSIM checa a distância de segurança desejada para o veículo posterior na nova faixa.
- A distância de segurança desejada depende da velocidade do veículo que deseja mudar de faixa e da velocidade do veículo precedente.
- Não se consegue mudar o grau de agressividade para a mudança de faixa livre, mas se pode influenciar a mudança de faixa livre ao se mudar a distância de segurança.
- As distâncias de segurança são usadas para especificar o comportamento do car-following.

# Wiedemann 74: *lane change*

- Para ambas as mudanças de faixa é necessário primeiro um espaço aceitável na direção da viagem.
- O tamanho do espaço depende de duas velocidades:
  - Velocidade do veículo que está mudando de faixa
  - Velocidade do veículo que vem chegando por trás na faixa que será feita a manobra.
- Para mudanças de faixas o intervalo de tempo também depende da agressividade do motorista.
  - Neste caso, o máximo atraso nos parâmetros de comportamento do motorista está incluso no cálculo do intervalo de tempo.