



**FCTUC DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**  
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE DE COIMBRA



# AVANÇOS NO CÁLCULO DE CAPACIDADES EM ROTUNDAS

Avaliação operacional e ambiental de rotundas | Seminário final  
do projeto AROUND. Coimbra, 9 de dezembro de 2014

Luís Vasconcelos  
Instituto Politécnico de Viseu

Álvaro Seco e Ana Bastos Silva  
Universidade de Coimbra

# Enquadramento

## Rotundas convencionais

### Uma via

- Muito seguras
- Capacidade superior à de cruzamentos prioritários

### Duas vias

- Alguns problemas de segurança
- Capacidade comparável à de cruzamentos semaforizados



## Turbo-rotundas

- Muito seguras
- Capacidade superior à de rotundas de uma via (mas inferior à de rotundas de duas vias)



A opção por um determinado layout deve assentar num estudo que permita prever o desempenho da rotunda em termos de capacidades e demoras

## Modelos de capacidades

- Empíricos (regressão)
- Probabilísticos (*gap-acceptance*)
- Simulação



# Modelos empíricos

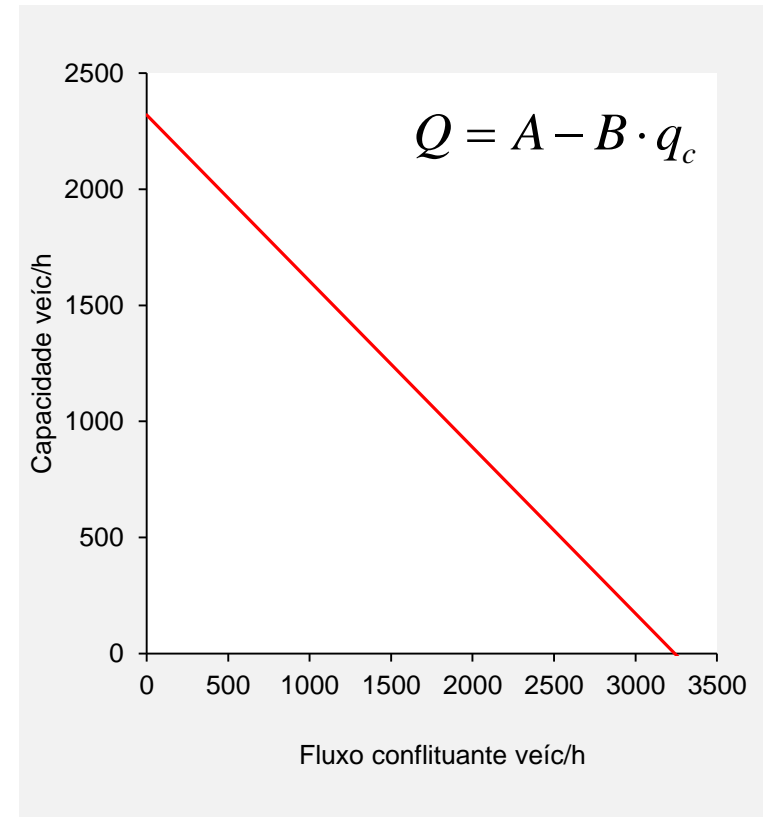
A capacidade de uma entrada é função de um conjunto de variáveis que descrevem a geometria e o tráfego conflituante

## O método do TRL

- Os parâmetros do modelo foram obtidos a partir de uma grande número de observações (Reino Unido, anos 70/80)
  - 35 geometrias em circuito fechado e 86 rotundas públicas com grande diversidade de características geométricas
  - 11.000 minutos de observações em condições saturadas
  - Custo total: 14.000.000 € (ao longo de 12 anos, incluindo modelo de sinistralidade)



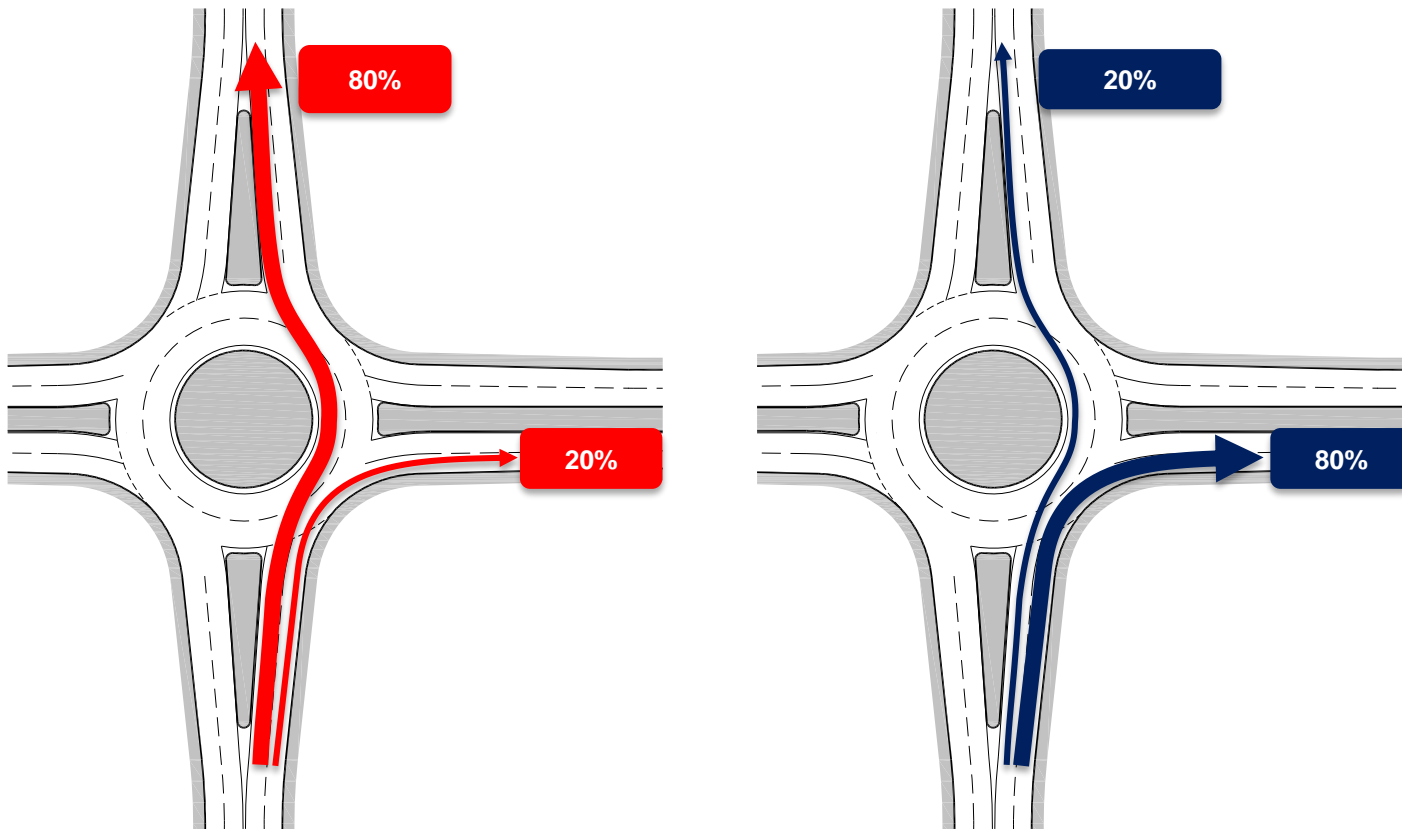
# Modelos empíricos



A capacidade varia linearmente com o fluxo conflituante

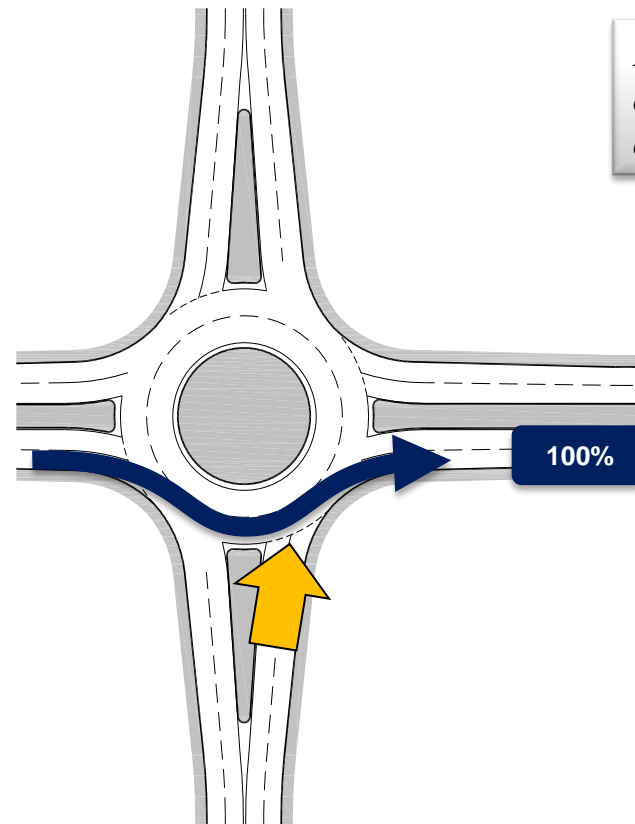
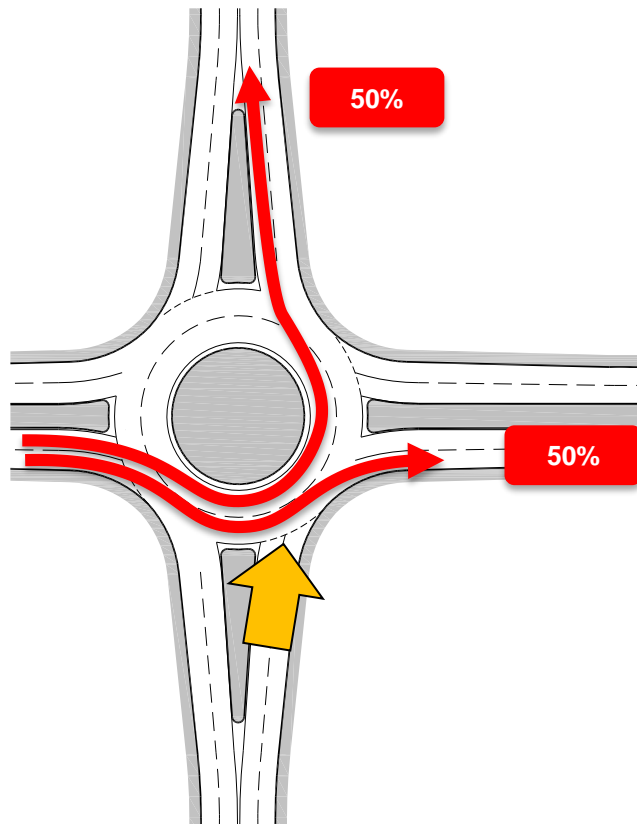
## Limitações do modelo do TRL

- Modelo insensível à repartição do tráfego de entrada e de circulação



## Limitações do modelo do TRL

- Modelo insensível à repartição do tráfego de entrada
- Modelo insensível à repartição do tráfego de circulação

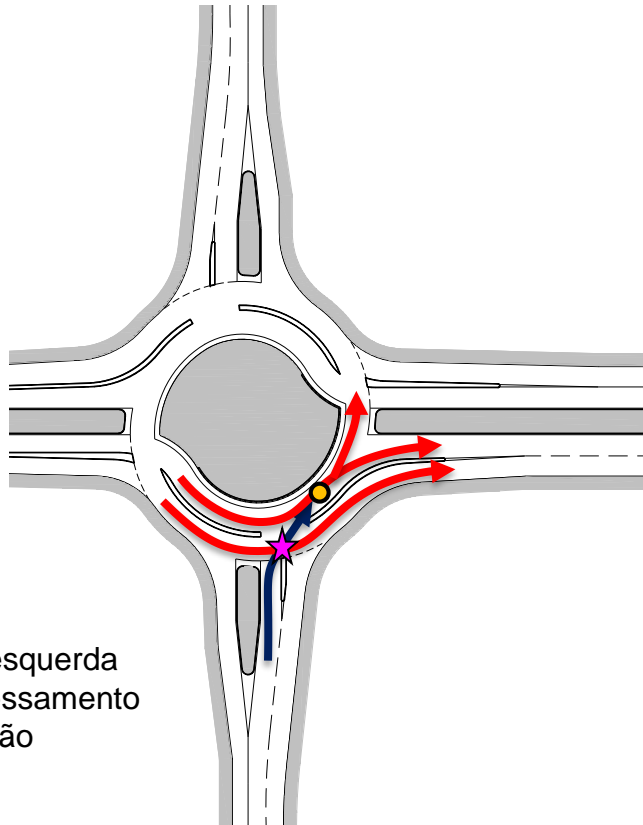


*É prevista a mesma capacidade nos dois casos*

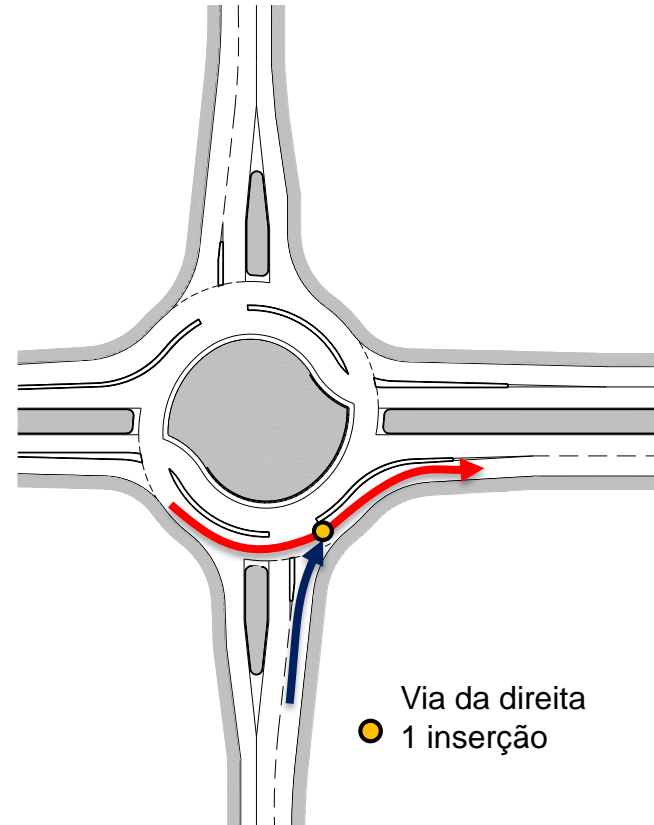


## Limitações do modelo do TRL

- Inadequado ao estudo de novas tipologias em que é necessária uma análise desagregada ao nível da via de entrada



Via da esquerda  
★ 1 atravessamento  
● 1 inserção

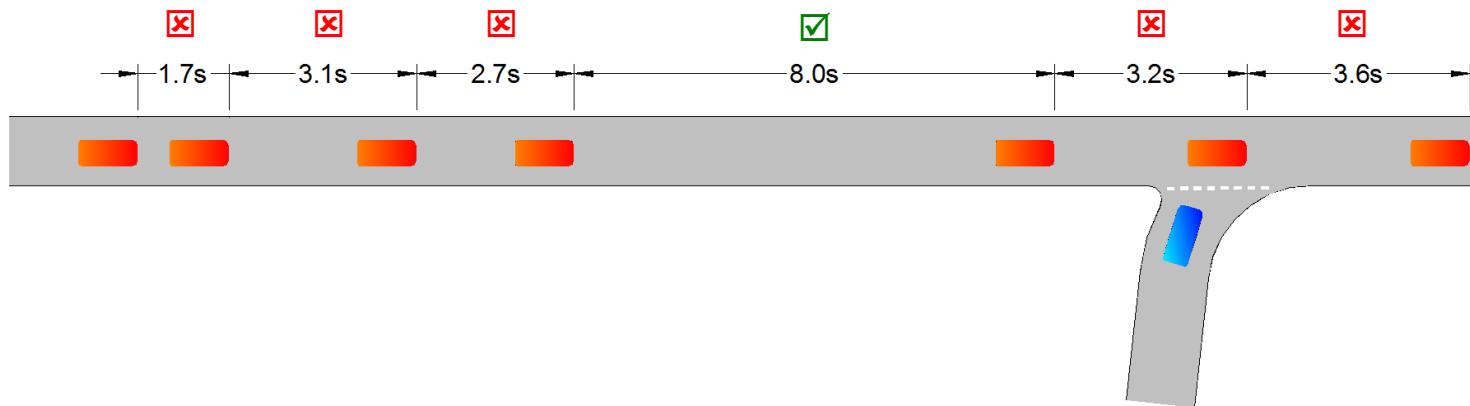


Via da direita  
● 1 inserção

# Métodos baseados na teoria *gap-acceptance*

Baseados em dois grandes blocos:

- A distribuição dos intervalos entre os veículos prioritários
  - ↳ *Calibrar os parâmetros da distribuição estatística que descreve as chegadas dos veículos prioritários aos pontos de conflito*
- A utilidade dos intervalos para os condutores na via secundária
  - ↳ *Calibrar os parâmetros de aceitação de intervalos (intervalo crítico e intervalo complementar)*



# Métodos baseados na teoria *gap-acceptance*

## Modelo de Siegloch (HCM)

$$Q = \frac{e^{-q_c \left( t_c - \frac{t_f}{2} \right)}}{t_f}$$

$Q$  Capacidade (uve/s)

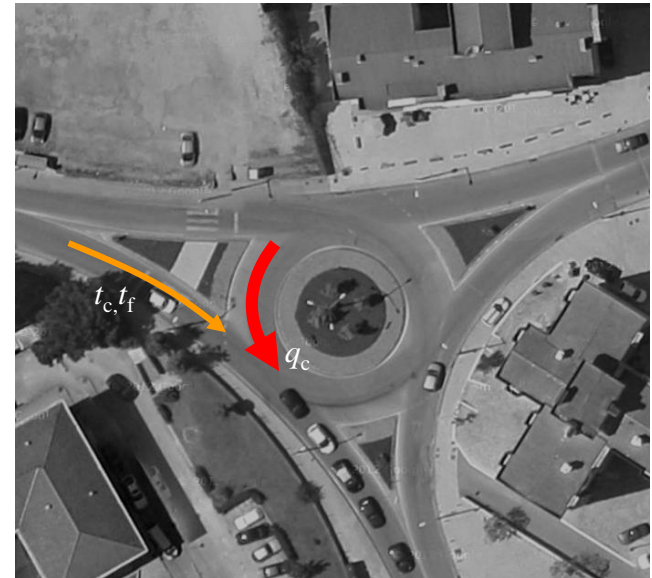
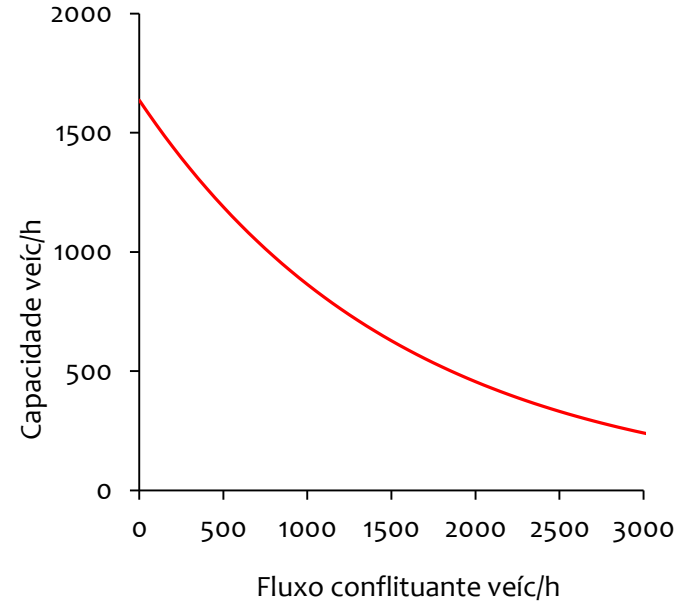
$q_c$  Fluxo conflituante (uve/s)

$t_c$  Intervalo crítico (s)

$t_f$  Intervalo complementar (s)

## Propriedades:

- Chegadas – distribuição exponencial negativa
  - Prevê intervalos entre veículos irrealisticamente pequenos
  - Assume que não existem interações entre veículos prioritários
  - Adequada apenas para fluxos muito baixos (<150 veíc./h)
- Modelo insensível ao número de vias de circulação

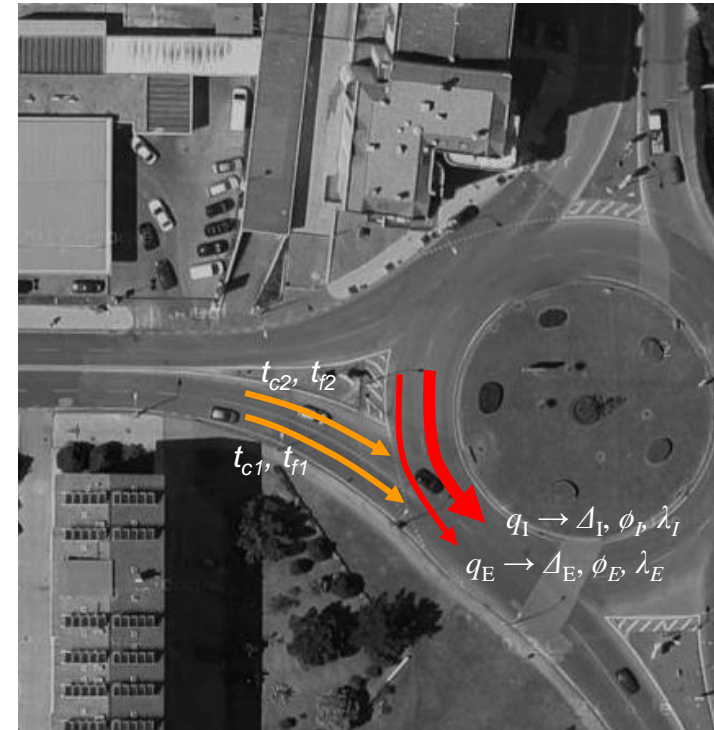


## Modelo genérico de Haging (múltiplas vias de circulação)

$$Q_k = \frac{e^{-\sum_{i \in I_k} \lambda_i (t_{c,i} - \Delta_i)} \sum_{i \in I_k} \lambda_i}{1 - e^{-\sum_{i \in I_k} \lambda_i t_{f,i}}} \prod_{i \in I_k} \frac{\phi_i}{\phi_i + \lambda_i \Delta_i}$$

### Propriedades:

- Chegadas – distribuição Cowan M3
- Distribuição dicotômica: pelotões + veículos livres
- Resultados dependentes do número de vias de circulação e da distribuição do tráfego de entrada



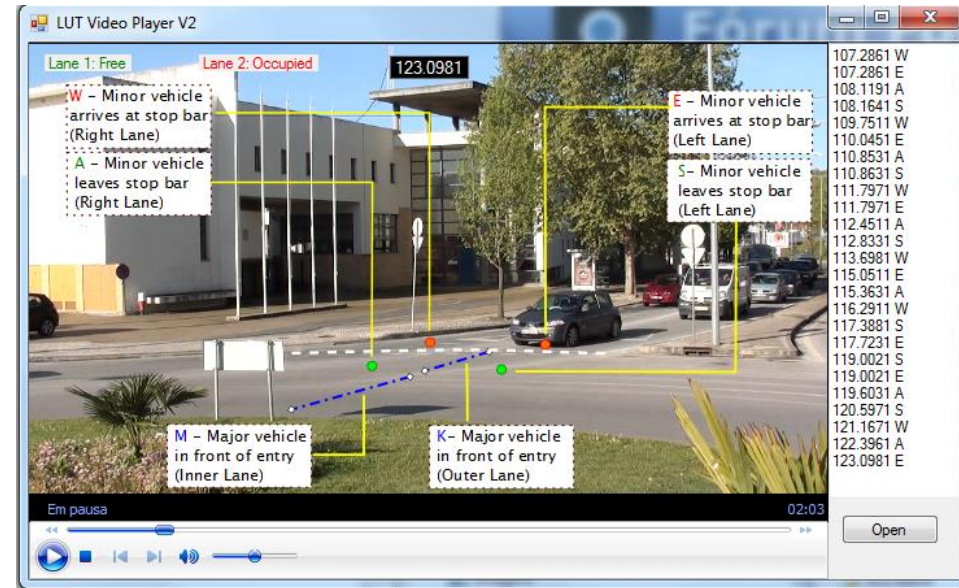
# Calibração dos modelos *gap-acceptance* para condições portuguesas

## Objetivo

- Obter parâmetros calibrados para as condições portuguesas

## Recolha de dados

- Registos vídeo
- Contagens automáticas
- 6 rotundas, 7 entradas
- 729 minutos
- 9600 veículos



## Resultados

- Parâmetros da distribuição Cowan M3 ( $\Delta, \phi, \lambda$ )

$$\Delta = 2 \text{ s}$$

$$\phi = 1 \text{ (para } q < 0.178 \text{ veíc/s)}$$

$$\phi = 1.55 - 3.11 q \text{ (para } 0.178 < q < 0.5 \text{ veíc/s)}$$

$$\phi = 0 \text{ (para } q > 0.178 \text{ veíc/s)}$$

$$\lambda = \phi q / (1 - \Delta q)$$

- Intervalos críticos e complementares ( $t_c, t_f$ )

Rotundas de 1 via:  $t_c = 3.7 \text{ s}, t_f = 2.2 \text{ s}$

Rotundas de 2 vias

Esquerda:  $t_c = 3.4 \text{ s}, t_f = 2.2 \text{ s}$

Direita:  $t_c = 3.2 \text{ s}, t_f = 2.2 \text{ s}$

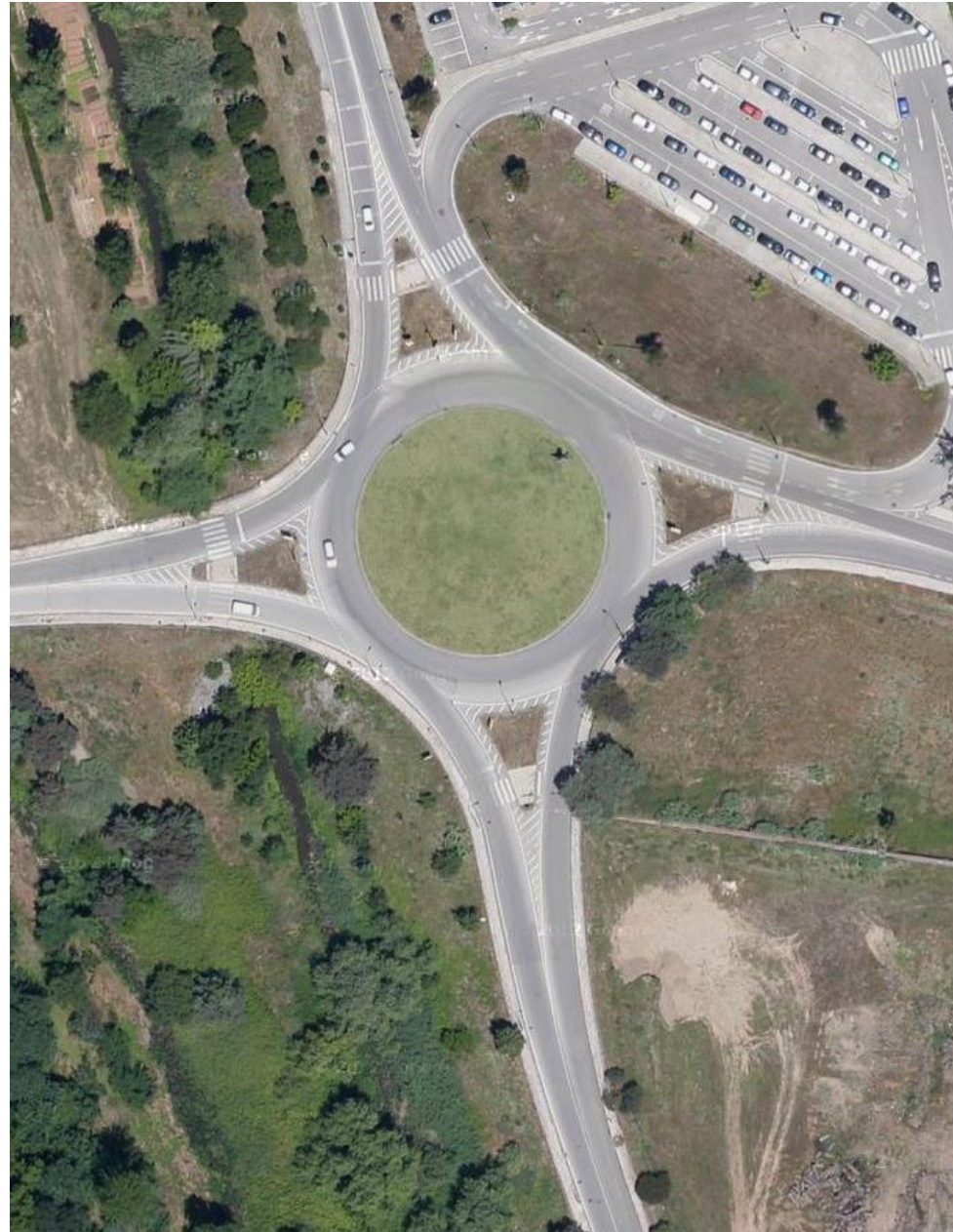
# Exemplos de cálculo

## Problema:

- Determinar a capacidade de uma entrada e a respetiva taxa de saturação ( $x = q / Q$ )

## Exemplo 1 – rotunda de 1 via de circulação

Rotunda do Choupal, Coimbra,  
Entrada Sul



# Exemplos de cálculo

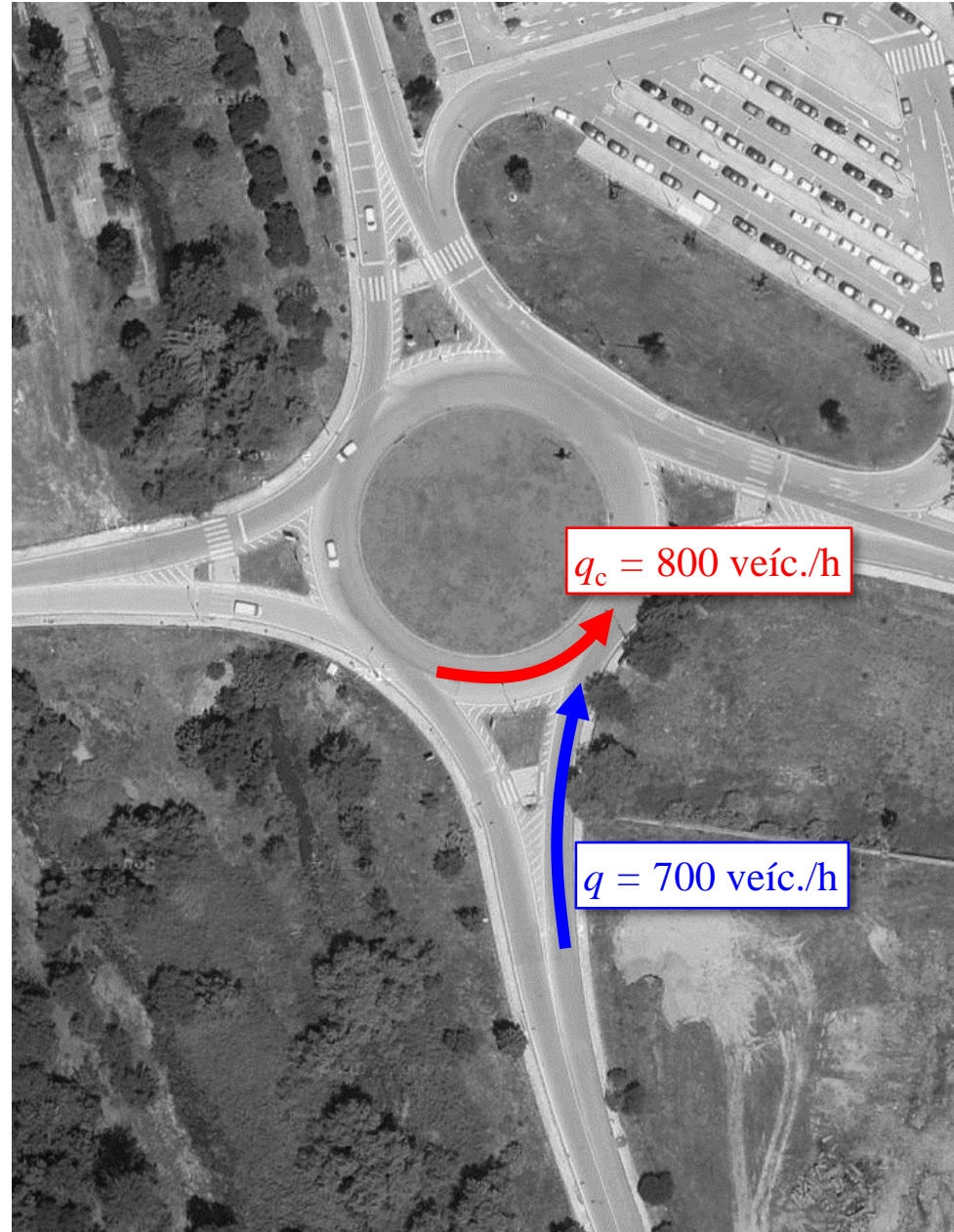
## Problema:

- Determinar a capacidade de uma entrada e a respetiva taxa de saturação ( $x = q / Q$ )

## Exemplo 1 – rotunda de 1 via de circulação

Rotunda do Choupal, Coimbra, Entrada Sul

- Procura: 700 veíc./h
- Fluxo conflituante: 800 veíc./h
- Tráfego de pesados muito reduzido (1 veíc.  $\approx$  1 uve)





# Exemplos de cálculo

## Método 1 – Modelo linear do TRL

$$Q = A - B \cdot q_c$$

$$A = K \cdot F$$

$$B = K \cdot f_c$$

$$S = 1.6(e - v) / l$$

$$K = 1 - 0.00347(\phi - 30) - 0.978(1/r - 0.05)$$

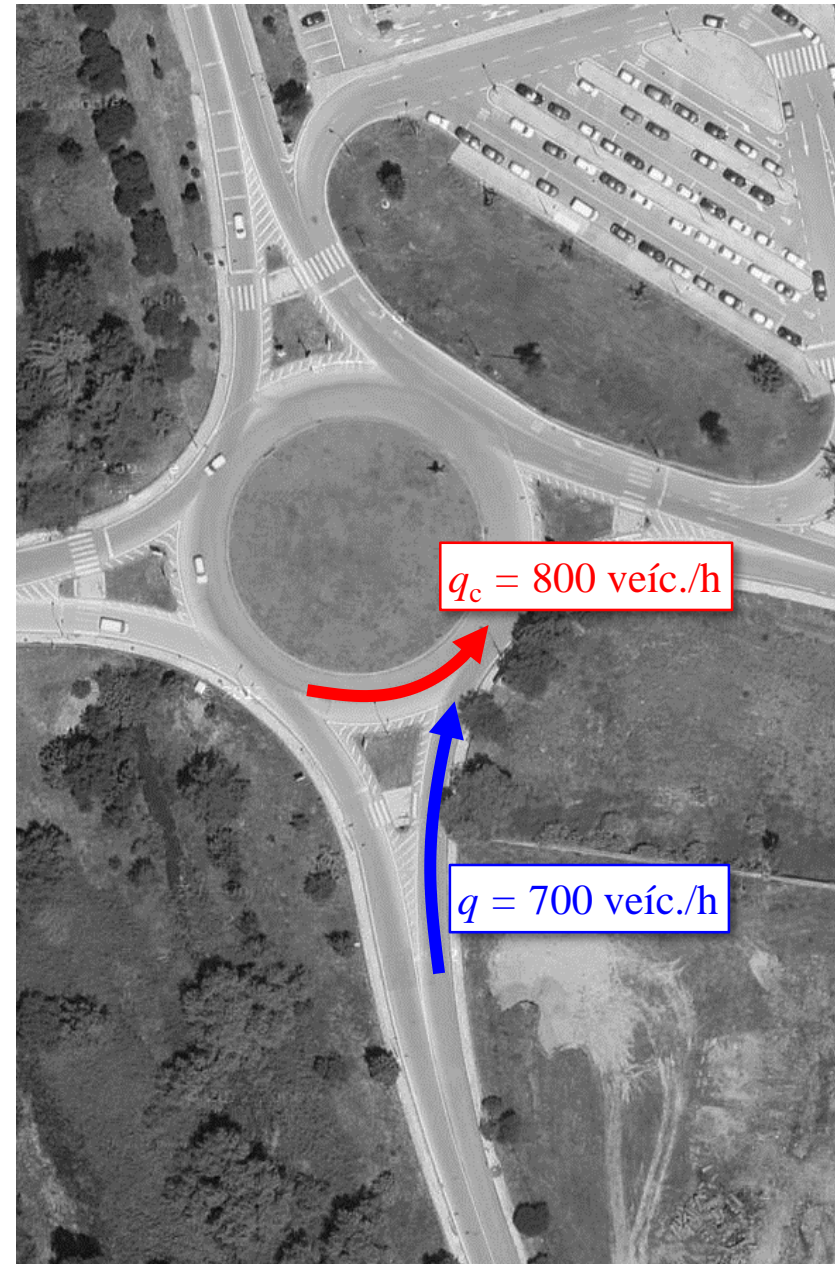
$$X_2 = v + (e - v) / (1 + 2S)$$

$$F = 303X_2$$

$$t_p = 1 + 0.5 / (1 + M)$$

$$M = \exp\left[\frac{(D - 60)}{10}\right]$$

$$f_c = 0.21t_p(1 + 0.2X_2)$$



# Exemplos de cálculo

## Método 1 – Modelo linear do TRL

$q_c$  = fluxo conflituante (uve/h) = 800 uve/h

$v$  = largura da via de aproximação (m) = 4.00 m

$e$  = largura efetiva da entrada (m) = 4.50 m

$l$  = comprimento efetivo do leque (m) = 12 m

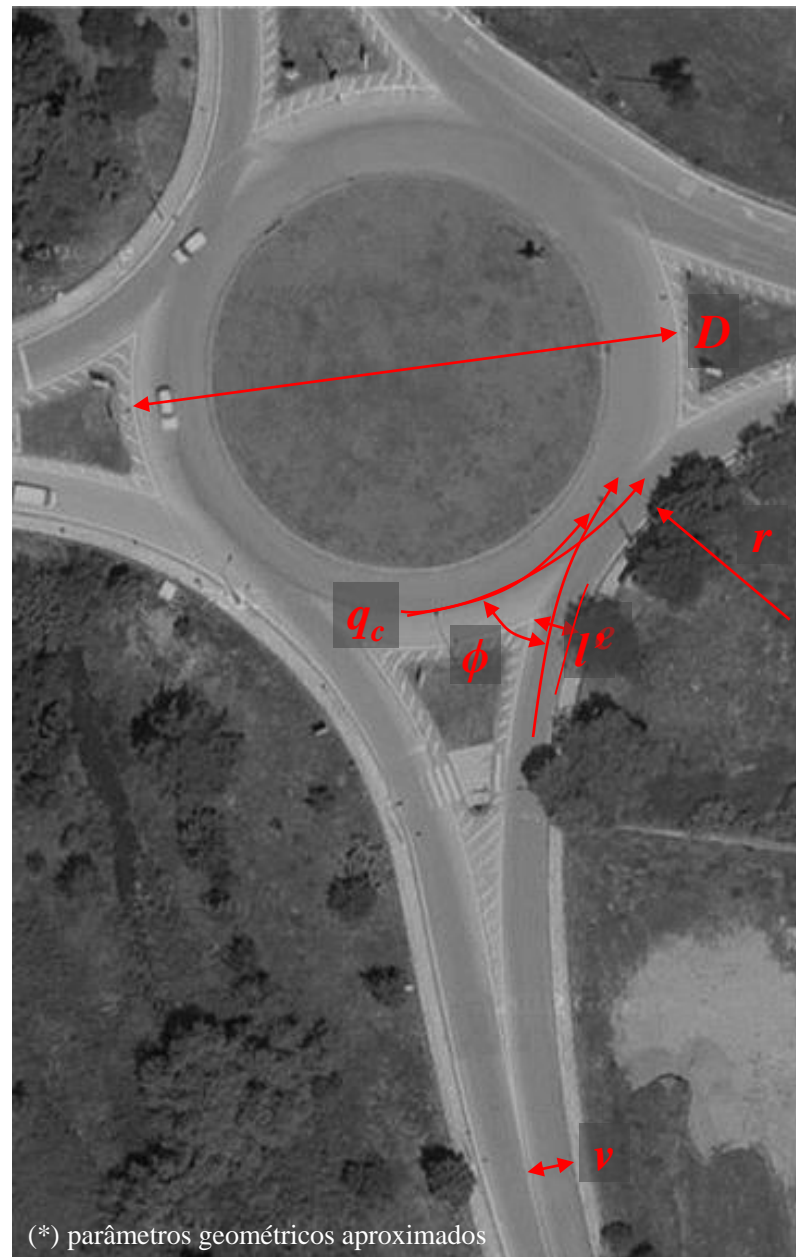
$r$  = raio da entrada no ponto de menor curvatura (m) = 35 m

$\phi$  = ângulo da entrada (°) = 30°

$D$  = diâmetro do círculo inscrito (m) = 58 m

$$C = A - B \cdot q_c$$
$$= 1374 - 0.5161 q_c = 961 \text{ uve/h}$$

$$x = q / C = 700 / 961 = 73\%$$



# Exemplos de cálculo

## Método 2 – F. de Siegloch

$$Q = \frac{e^{-q_c \left( t_c - \frac{t_f}{2} \right)}}{t_f}$$

$Q$  Capacidade (uve /s)

$q_c$  Fluxo conflituante (uve /s)

$t_c$  Intervalo crítico (s)

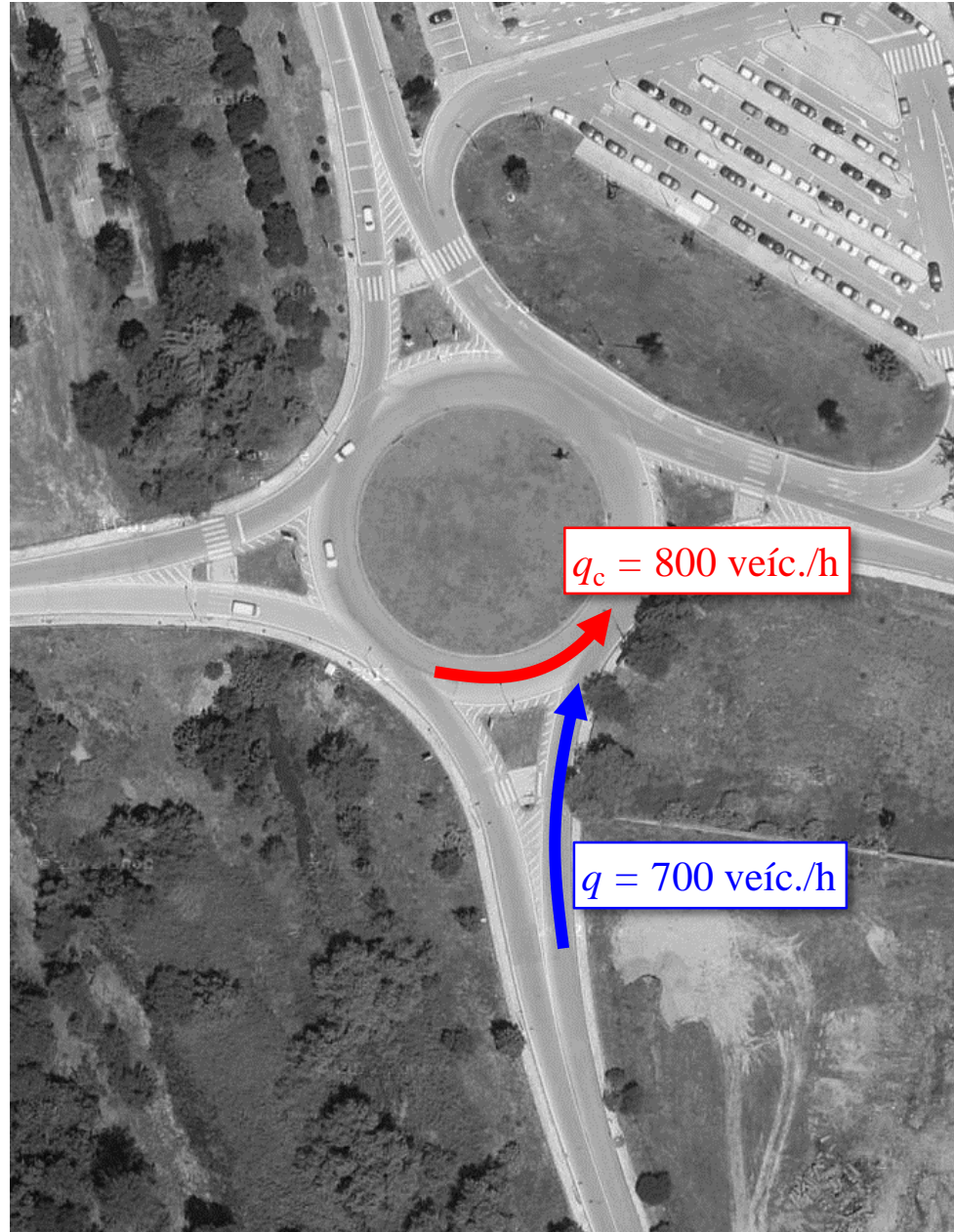
$t_f$  Intervalos mínimo (s)

Rotunda de 1 via

$$t_c = 3.7 \text{ s}, t_f = 2.2 \text{ s}$$

$$Q = \frac{e^{-2.6q_c}}{2.2} = 0.255 \text{ uve/s} = 918 \text{ uve/h}$$

$$x = q / Q = 700 / 918 = 76\%$$



# Exemplos de cálculo

## Método 3 – F. de Siegloch (HCM)

$$Q = 1130 e^{q_c(-1.0 \times 10^{-3})}$$

$Q$  Capacidade (uve/h)

$q_c$  Fluxo conflituante (uve/h)

Corresponde a:

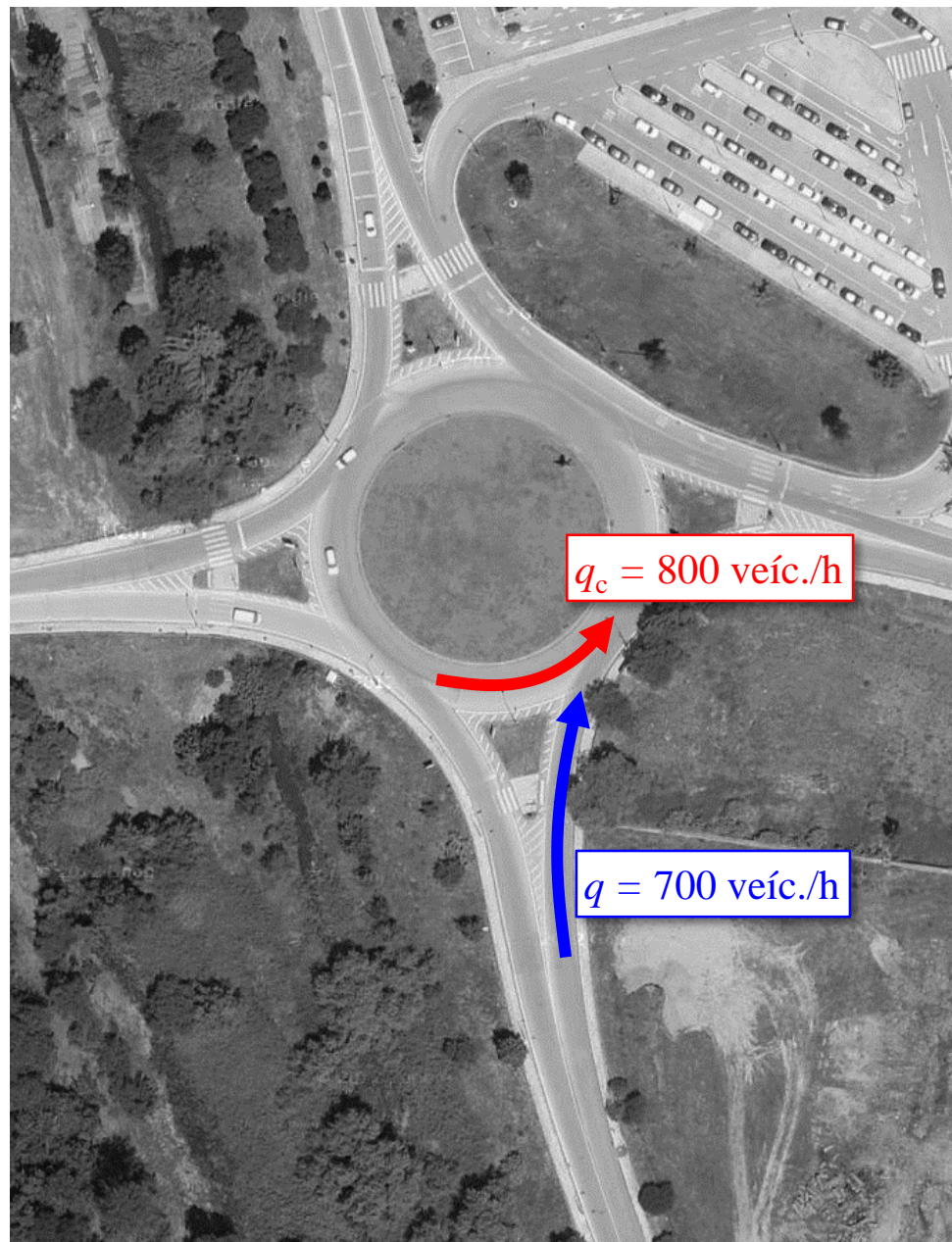
Rotunda de 1 via (EUA)

$t_c = 5.2$  s,  $t_f = 3.2$  s

$Q = 508$  uve/h

$x = q / Q = 700 / 508 = 138\%$

(parâmetros inadequados para as condições nacionais, e sujeitos a alterações a médio prazo nos EUA)



# Exemplos de cálculo

Método 4 – F. de Haging para 1 via  
(recomendada)

$$Q = \frac{q_c \phi e^{-\lambda(t_c - \Delta)}}{1 - e^{-\lambda t_f}} \quad \lambda = \frac{\phi q}{1 - \Delta q}$$

Parametrização de  $\lambda$ ,  $\Delta$  e  $\phi$  para as condições portuguesas

$\Delta = 2$  s (parâmetro com valor fixo)

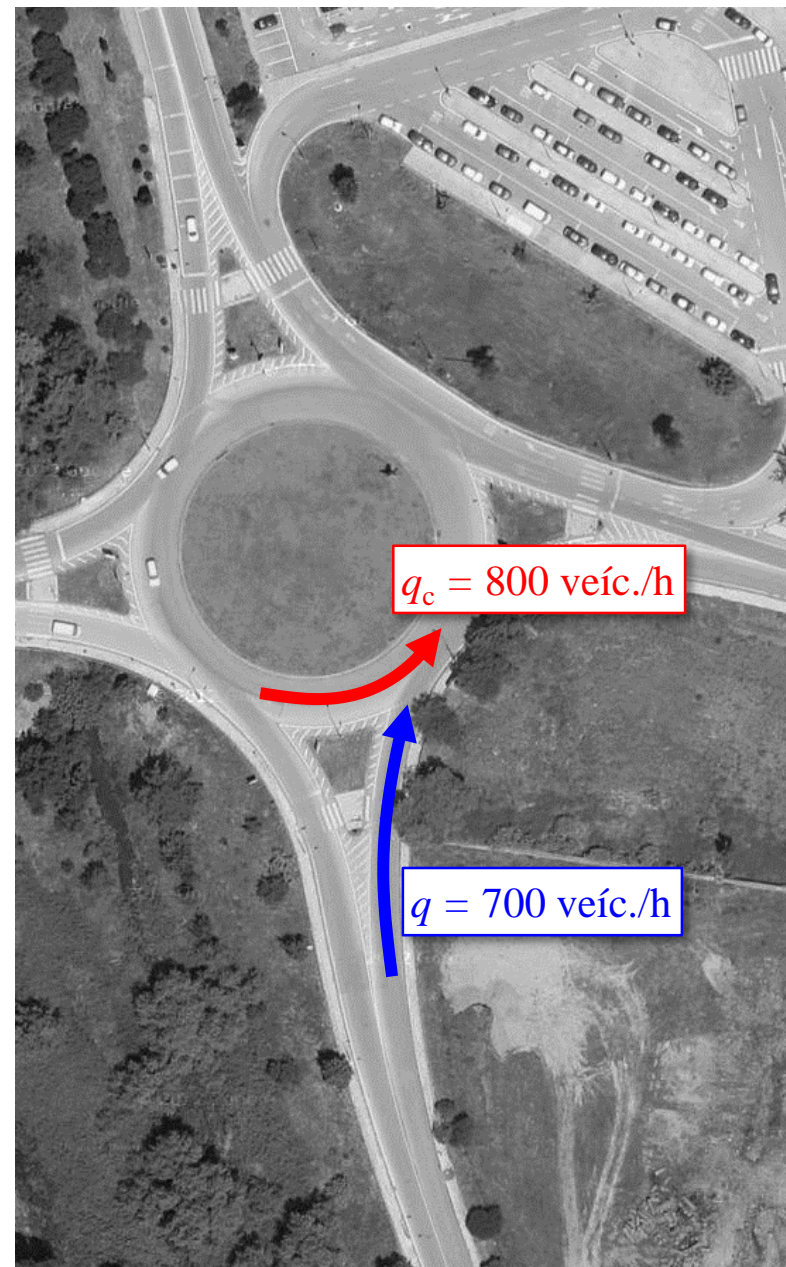
$$\phi = \begin{cases} 1 & \text{se } q_c < 0.178 \\ 1.553(1 - 2q_c) & \text{se } 0.178 < q_c < 0.5 \\ 0 & \text{se } q_c > 0.5 \end{cases}$$

$$q_c = 0.222 \text{ veíc./h} \rightarrow \phi = 0.863, \lambda = 0.345$$

Rotunda de 1 via

$$t_c = 3.7 \text{ s}, t_f = 2.2 \text{ s}$$

$$Q = 0.2005 \text{ uve/s} = 722 \text{ uve/h}, x = 97\%$$



# Exemplos de cálculo

## Exemplo 2 – rotunda de 2 vias de circulação

Rotunda Artur Paredes, entrada Oeste

- 1.º Método – modelo linear do Transportation Research Laboratory

$$q_c = 1600 \text{ uve/h}$$

$$v = 6.0 \text{ m}$$

$$e = 9.9 \text{ m}$$

$$l = 13 \text{ m}$$

$$r = 52 \text{ m}$$

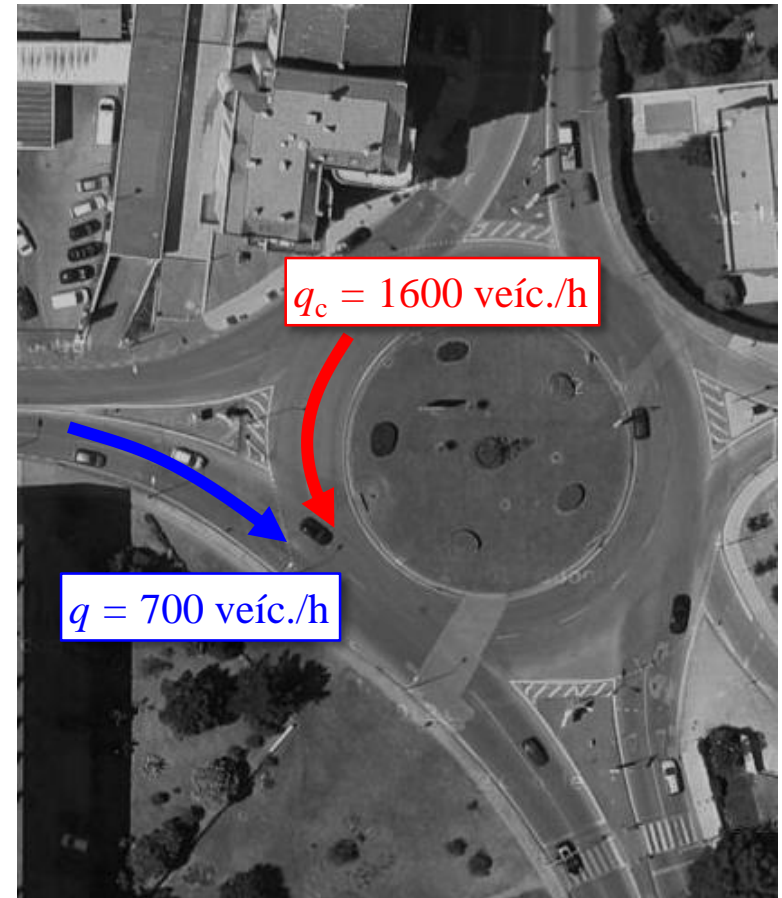
$$\phi = 35^\circ$$

$$D = 55 \text{ m}$$

$$Q = 2452 - 0.7245 q_c = 1293 \text{ uve/h}$$

$$x = 54\%$$

*O efeito potencial do leque não se verifica na prática (não há aumento do número de vias) – a capacidade está sobrestimada*



# Exemplos de cálculo

## 2.º Método – F. de Siegloch (HCM, 2 vias)

$$Q_E = 1130 e^{q_c(-0.75 \times 10^{-3})} \quad Q_D = 1130 e^{q_c(-0.70 \times 10^{-3})}$$

$Q_E$  Capacidade da via da esquerda (uve/h)

$Q_D$  Capacidade da via da direita (uve/h)

$q_c$  Fluxo conflituante total (uve/h)

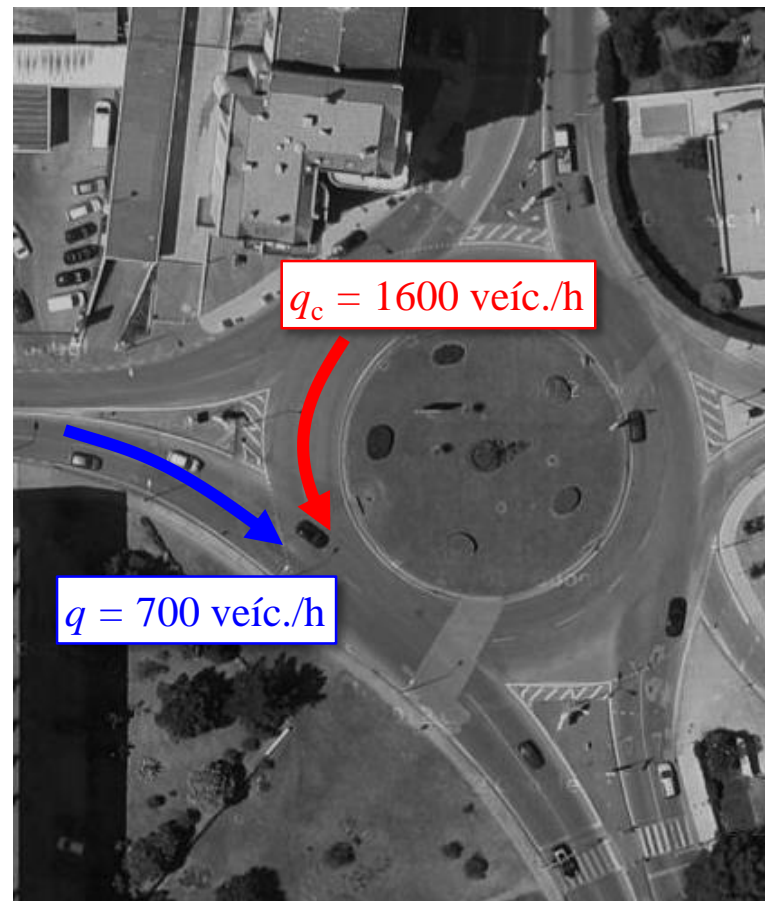
$$Q_E = 340 \text{ uve/h}, Q_D = 369 \text{ uve/h}$$

Distribuição de tráfego pelas vias de entrada  
(valores pré-definidos no HCM):

- Esquerda: 47%, Direita: 53%

Taxas de saturação:

- $q_E = 0.47 \times 700 = 329 \text{ uve/h}$ ,  $x = 97\%$
- $q_D = 0.53 \times 700 = 371 \text{ uve/h}$ ,  $x = 101\%$



# Exemplos de cálculo

## F. de Hagring para 2 vias (recomendada)

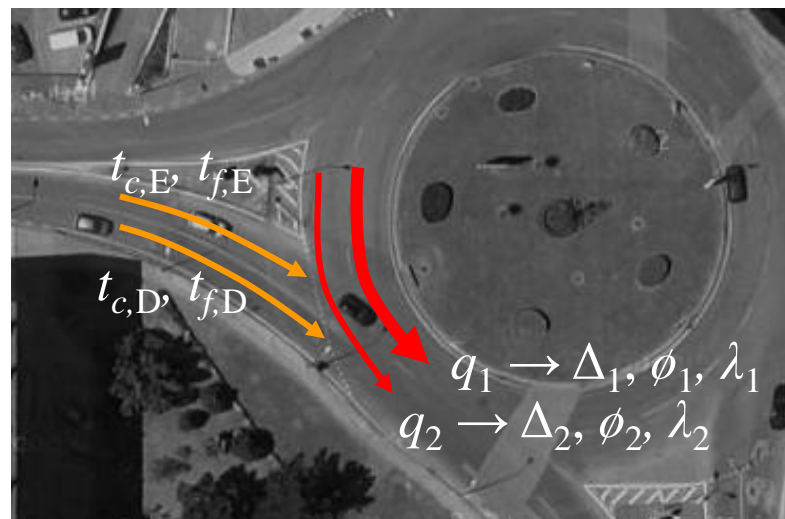
- O cálculo da capacidade é feito individualmente para cada uma das vias de entrada (esquerda, direita)
- É necessário quantificar o fluxo em cada uma das vias conflitantes

$$Q = \frac{\exp\left\{-\left[(t_c - \Delta)(\lambda_1 + \lambda_2)\right]\right\}(\lambda_1 + \lambda_2)\phi_1\phi_2}{\left\{1 - \exp\left[-t_f(\lambda_1 + \lambda_2)\right]\right\}(\phi_1 + \lambda_1\Delta)(\phi_2 + \lambda_2\Delta)}$$

$$\lambda = \frac{\phi q}{1 - \Delta q}$$

$\Delta = 2$  s (parâmetro com valor fixo)

$$\phi = \begin{cases} 1 & \text{se } q_c < 0.178 \\ 1.553(1 - 2q_c) & \text{se } 0.178 < q_c < 0.5 \\ 0 & \text{se } q_c > 0.5 \end{cases}$$



Seja:

- $q_1 = 1000$  veíc/h = 0.278 veíc/s
- $q_2 = 600$  veíc/h = 0.167 veíc/s

Parâmetros das vias conflitantes:

- $\Delta_1 = \Delta_2 = 2$  s
- $\phi_1 = 0.690, \lambda_1 = 0.432$
- $\phi_2 = 1, \lambda_2 = 0.250$

Nota: a capacidade é máxima quando  $q_1 = q_2$



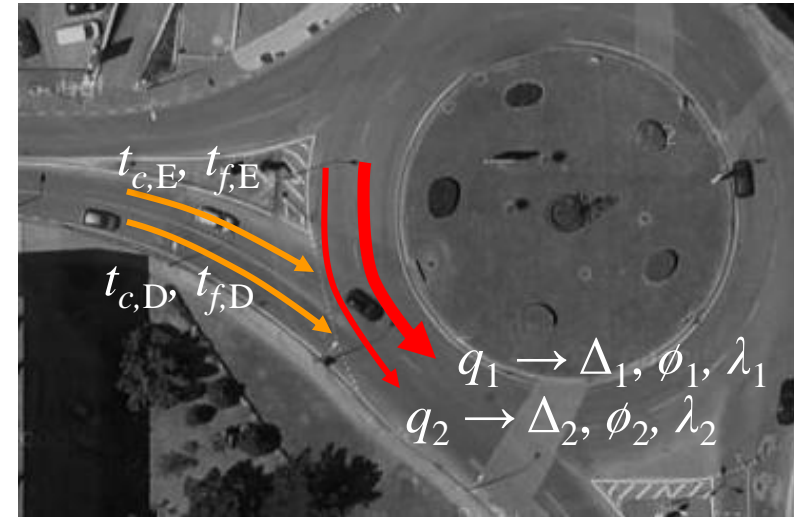
# Exemplos de cálculo

$$Q = \frac{\exp\left\{-\left[(t_c - \Delta)(\lambda_1 + \lambda_2)\right]\right\}(\lambda_1 + \lambda_2)\phi_1\phi_2}{\left\{1 - \exp\left[-t_f(\lambda_1 + \lambda_2)\right]\right\}(\phi_1 + \lambda_1\Delta)(\phi_2 + \lambda_2\Delta)}$$

Rotundas de 2 vias

Esquerda:  $t_c = 3.4$  s,  $t_f = 2.2$  s

Direita:  $t_c = 3.2$  s,  $t_f = 2.2$  s



Resultado:

$$Q_E = 360 \text{ veíc/h}, Q_D = 413 \text{ veíc/h}$$

## Repartição de tráfego pelas vias de entrada

- Os condutores que pretendem virar à esquerda ou inverter a marcha  $q_e$  ocupam a via da esquerda
- Os condutores que pretendem virar à direita  $q_d$  ocupam a via da direita
- Os condutores que seguem em frente  $q_f$  ocupam a via da esquerda ou da direita



# Exemplos de cálculo

$$x_E = x_D \quad \frac{q_E}{Q_E} = \frac{q_D}{Q_D}$$

$$\frac{q_e + q_f p_E}{Q_E} = \frac{q_d + q_f (1 - p_E)}{Q_D}$$

...

$$p_E = \frac{(q_f + q_d) Q_E - q_e Q_D}{q_f (Q_E + Q_D)} \quad 0 \leq p_E \leq 1$$

$p_E$ : prop. tráfego de ida em frente que ocupa a via de entrada da esquerda

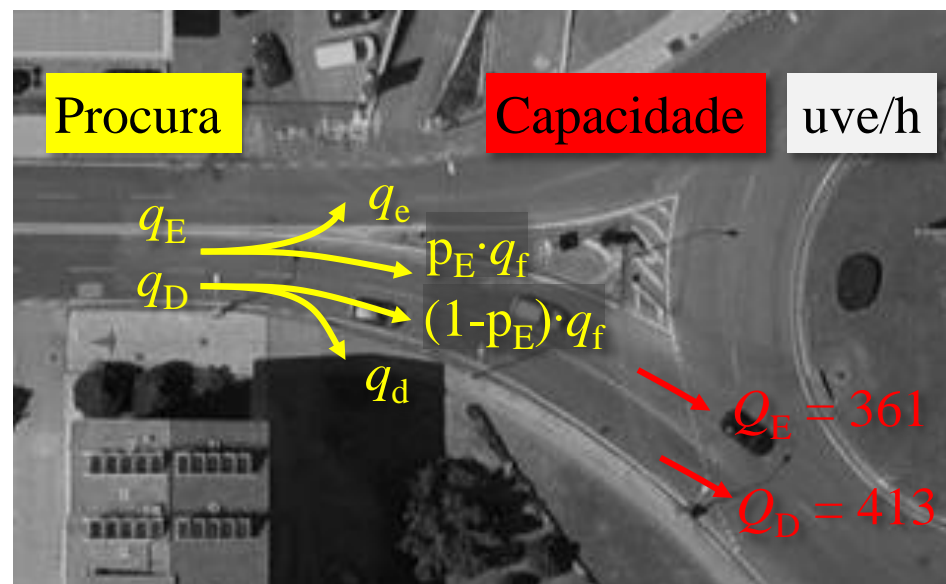
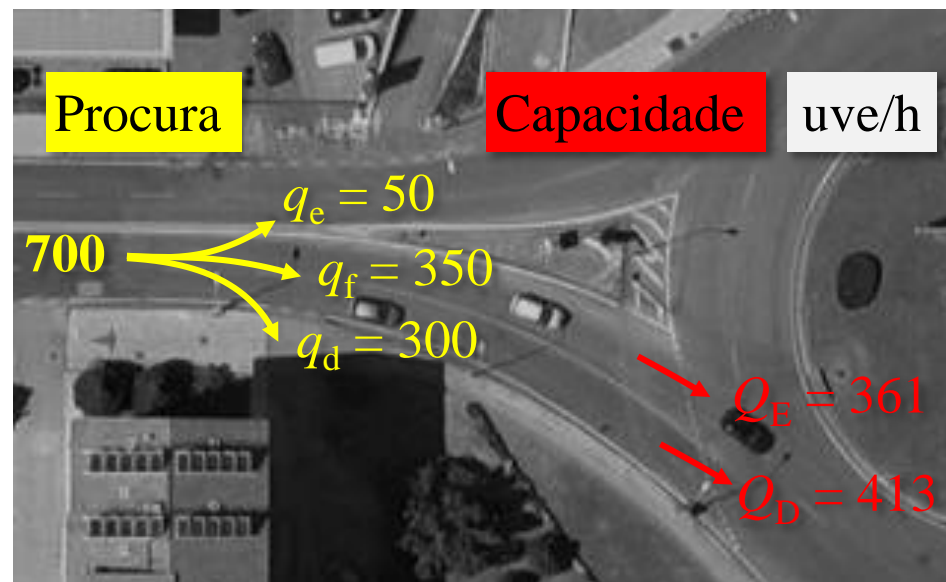
$$p_E = 79.0\%$$

$$q_E = 50 + 0.79 \times 350 = 326 \text{ uve/h}$$

$$q_D = 300 + 0.21 \times 350 = 374 \text{ uve/h}$$

$$x_E = x_D = 90\%$$

*as taxas de saturação resultam iguais nas duas vias de entrada apenas quando  $p_E$  toma um valor entre 0 e 1 (exclusive)*



## Modelo linear do TRL

- Permite identificar influência dos parâmetros geométricos (ex.: comprimento do leque / largura da entrada)
- Não adequado a rotundas não convencionais e/ou em casos em que é necessário realizar as análises de capacidade por via de entrada

## Modelo de Hagrind

- Parametrizado para as condições de circulação portuguesas
- Sensível à distribuição de tráfego nas vias de entrada e de circulação
- Não considera explicitamente a geometria da rotunda

## Recomendação

- Sempre que possível, verificar se o desempenho da rotunda é adequado ( $x < 90\%$ ) pelos modelos do TRL e de Hagrind.



**FCTUC DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**  
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE DE COIMBRA



# AVANÇOS NO CÁLCULO DE CAPACIDADES EM ROTUNDAS

Avaliação operacional e ambiental de rotundas | Seminário final  
do projeto AROUND. Coimbra, 9 de dezembro de 2014

*Obrigado!*

Luís Vasconcelos  
Instituto Politécnico de Viseu

Álvaro Seco e Ana Bastos Silva  
Universidade de Coimbra