

# IMPACTE DA PRESENÇA DE CICLOVIAS NO DESEMPENHO DO TRÁFEGO RODOVIÁRIO, SEGURANÇA RODOVIÁRIA E EMISSÕES DE POLUENTES EM ÁREAS URBANAS

Behnam BAHMANKHAH<sup>1</sup>, Margarida Coelho<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Engenharia Mecânica/ Centro de Tecnologia Mecânica e Automação, Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal

[behnam.bahmankhah@ua.pt](mailto:behnam.bahmankhah@ua.pt), [margarida.coelho@ua.pt](mailto:margarida.coelho@ua.pt)

## Resumo

*A segurança é apontada como o principal fator para a falta de adesão à bicicleta enquanto meio de transporte. O principal objetivo deste trabalho é analisar as diferenças relativamente ao desempenho do tráfego, emissões e segurança do ciclista a circular em faixas de rodagem com e sem vias dedicadas para a prática do ciclismo. A metodologia deste trabalho tem como base um caso de estudo real que utiliza uma plataforma de simulação microscópica de tráfego (VISSIM), segurança rodoviária (SSAM) e emissões (Vehicle Specific Power – VSP) para analisar tempo de viagem, conflitos e estimar emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) e de óxidos de azoto (NO<sub>x</sub>). O software PC-CRASH foi usado para analisar efeito de velocidade de circulação de veículos motorizados em acidentes envolvendo ciclistas.*

## Introdução e objetivos

Devido aos benefícios inerentes à utilização da bicicleta relativamente aos problemas ambientais, tem havido um aumento na utilização deste meio de transporte.<sup>1</sup> Substituindo os veículos a motor por bicicletas em áreas urbanas é possível melhorar o desempenho de tráfego e emissões<sup>2</sup>, sendo que os países Nórdicos da Europa apresentam a maior taxa de ciclistas que varia dos 10% aos 27%.<sup>3</sup> Uma das preocupações inerentes ao uso das bicicletas é a exposição ao risco a que os ciclistas se encontram.<sup>4</sup> Ainda assim, o número de acidentes fatais com ciclistas decresceu 30% entre 2005 e 2014 nos países pertencentes ao EU28 e 2100 ciclistas foram mortos em acidentes de trânsito em 2014, constituindo 8.1% dos acidentes fatais de trânsito. Um exemplo será a Holanda e a Dinamarca que obtiveram as maiores taxas de acidentes fatais, sendo de 25% e 16% respectivamente.<sup>3</sup>

Os principais objetivos deste trabalho são: comparar a variação dos tempos de viagem, indicadores de segurança/emissões com a presença e ausência de vias

dedicadas para bicicletas; avaliar o tempo de viagem, indicadores de segurança e taxa de emissões em diferentes rotas; investigar o impacto das velocidades dos veículos motorizados na segurança do ciclista nas colisões entre bicicletas e veículos.

## Metodologia

Para este trabalho, consideraram-se diferentes rotas na cidade de Aveiro. Foi utilizado um modelo de tráfego microscópico (VISSIM)<sup>5</sup> para examinar o desempenho de tráfego. O conceito de potência específica do veículo (VSP)<sup>6</sup> é usado para estimar emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) e óxidos de azoto (NO<sub>x</sub>). Os conflitos entre veículos motorizados e ciclistas foram analisados com o modelo SSAM<sup>7</sup>.

Figura 1 demonstra a metodologia seguida para elaborar este trabalho.

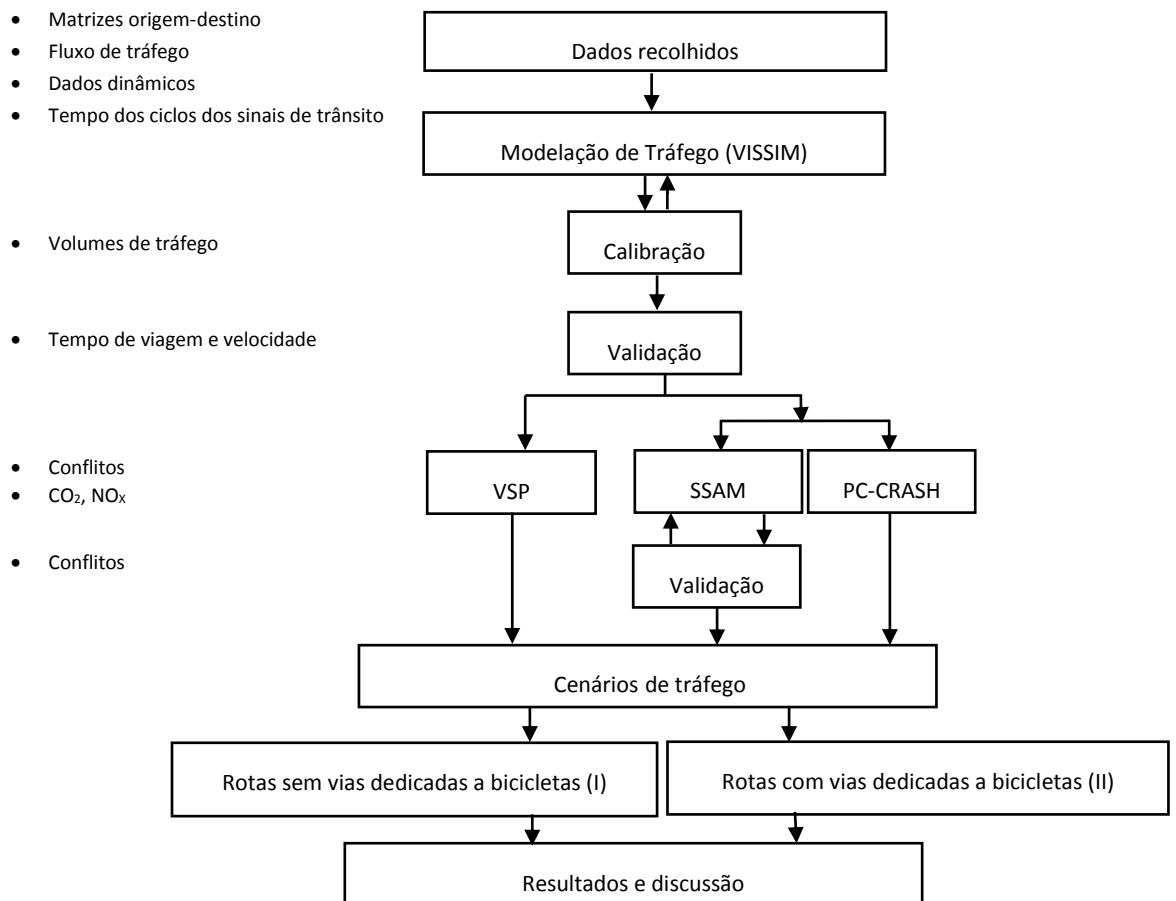


Figura 1: Metodologia.

Para explorar o efeito da variação da velocidade dos veículos motorizados na segurança dos ciclistas foi utilizado o software PC-CRASH (versão 11.1).

### Seleção de rotas e recolha de dados dinâmicos

A rede urbana selecionada (Figura 2) inclui quatro rotas alternativas (A, B, C, D) entre a Universidade de Aveiro e o centro comercial Glícínias. Foram recolhidos dados de dinâmica de veículos motorizados e bicicletas (velocidades de circulação, acelerações) dois dias da semana em diferentes horários: 9:30 até 11:30 e 17:00 até 19:00.



Figura 2: Rede desenvolvida no modelo de tráfego VISSIM

### Modelação de tráfego

O modelo VISSIM foi utilizado para modelar o desempenho de tráfego, pois permite inserir vários parâmetros de tráfego de entrada e dados geométricos das interseções. Por sua vez, é possível interligar modelos de emissões e segurança a este modelo de simulação.

O VISSIM simulou operações de tráfego com um cruzamento semaforizado foi baseado na operação de tempo fixo.<sup>5</sup> Foram considerados os seguintes critérios no VISSIM: via dedicada para bicicletas com 1.5m de largura e separada da via principal<sup>8</sup>; também foram consideradas as dimensões das mesmas e dos veículos motorizados.<sup>9</sup> O VISSIM foi calibrado com base nos volumes de tráfego observados e estimados. Calibrou-se também o comportamento do condutor que inclui a distância média de paragem quando o condutor segue outro veículo; distância de segurança e visibilidade relativamente a pontos mortos e mudança de vias (fator de redução da distância de segurança, e máxima distância para travagem cooperativa). Foram

usadas estatísticas modificadas do qui-quadrado que incorporam diferenças relativas e absolutas (Geoffrey E. Havers - GEH), em comparação com os volumes observados e estimados. Quinze simulações foram executadas para cada cenário teste.<sup>10,11</sup>

## **Emissões**

Para estimar as emissões de Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>) e óxidos de Azoto (NO<sub>x</sub>) utilizou-se a metodologia VSP baseado no conceito de potência específica do veículo. Com esta metodologia é possível estimar segundo a segundo os diferentes perfis de velocidades para um veículo ligeiro de passageiros<sup>6</sup> tendo ainda a capacidade de estimar emissões em interseções com diferentes controlos de tráfego.<sup>12-15</sup>

A equação genérica do VSP é demonstrada da seguinte forma<sup>6</sup>:

$$VSP = v \cdot [1.1 a + 9.81 \cdot \sin(\arctan(d)) + 0.123] + 0.0003v^3$$

Em que VSP é potência específica do veículo (kW/ton); v é velocidade instantânea (m/s); a é a aceleração instantânea (m/s<sup>2</sup>); d é o declive (%). O VSP é caracterizado por 14 modos diferentes e cada modo está associado a diferentes gamas de taxas de emissão. É importante referir que por causa do terreno ser plano negligenciou-se o declive. Foi considerado o seguinte parque automóvel nacional<sup>16</sup>: 44.7% veículos ligeiros de gasolina, 34.3% veículos ligeiros a diesel e 21% veículos ligeiros comerciais a diesel.

## **Modelo de segurança**

Para a análise de segurança foi utilizado o software SSAM (Surrogate Safety Assessment Model).<sup>7</sup> A avaliação da segurança do trânsito depende da análise de dados de acidentes, em que o número de acidentes é usado como medida para avaliar o desempenho de segurança das infraestruturas rodoviárias.<sup>17</sup> Para cada simulação o SSAM guarda as trajetórias dos veículos do modelo de tráfego que podem ser conectadas a modelos de tráfego como o VISSIM determinando que certo evento satisfaça as condições para ser declarado de conflito. Para simular as colisões entre veículos motorizados e bicicletas e demonstrar as vantagens das vias dedicadas às mesmas foi usado o software PC-CRASH (versão 11.1).<sup>18</sup>

## **Resultados e discussões**

### **Calibração e validação**

Os dados recolhidos das vias principais foram usados para calibrar e validar o modelo de simulação. Para encontrar uma boa correlação entre os dados observados e estimados utilizando uma regressão linear ( $R^2 = 0.85$ ) foi necessário alterar os parâmetros de tráfego e do condutor. Quanto ao modelo de validação, foram

filmadas 4 horas de vídeo nas intersecções principais da rede de forma a ser possível obter conflitos de tráfego e registar a informação associada a cada conflito. Os resultados do modelo VISSIM foram classificados em intervalos de 15 minutos. Os conflitos observados são classificados em três tipos: (a) conflitos traseiros, (b) conflitos na mudança de via, (c) conflitos de atravessamento. Modelos de regressão linear foram ajustados para relacionar os conflitos simulados com os observados, em que foi obtido uma correlação superior a 0.74 ( $R^2$ ).

### **Resultados do cenário alternativo (via dedicada)**

Os resultados demonstram que a rota A tem o menor tempo de viagem entre a origem e destino para bicicletas (379s) e veículos motorizados (388s). Existe uma redução no tempo de viagem para as quatro rotas para veículos motorizados de 4% a 8% e para bicicletas de 6% a 18% (Tabela 1).

É possível notar que o tempo de viagem das bicicletas utilizando vias dedicadas é menor que os veículos motorizados sem as vias dedicadas propostas. Por exemplo na rota A e B o tempo de viagem das bicicletas é de 379s e 468s respetivamente enquanto que para os veículos motorizados é de 404s e 455s.

Relativamente à segurança os valores de TTC aumentaram demonstrando que existe menos conflitos. Para as diferentes rotas os números de conflitos diminuíram entre 13% a 24% (Tabela 1), sendo a rota C a mais segura no que diz respeito a conflitos. Esta rota também representa as menores taxas de emissões de CO<sub>2</sub> e NO<sub>x</sub>. Enquanto a máxima melhoria de emissões para NO<sub>x</sub> foi de 3%, para as emissões de CO<sub>2</sub> foi possíveis melhorias de 2% a 7% nas diferentes rotas. Devido à presença de dois semáforos do maior volume de tráfego e da distância percorrida ser superior, a rota D apresenta os piores resultados.

Tabela 1: Resultados de conflitos rodoviários e emissões

Rota		A	B	C	D
Tempo médio de viagem (s) (veículos a motor)	Sem via de bicicleta	<b>404</b>	455	510	656
	Com via de bicicleta	<b>388</b>	419	490	603
	Variação	-4%	-8%	-4%	-8%
Tempo médio de viagem (s) (bicicleta)	Sem via de bicicleta	<b>461</b>	497	638	774
	Com via de bicicleta	<b>379</b>	468	570	671
	Variação	-18%	-6%	-11%	-13%
Conflitos totais (n)	Sem via de bicicleta	89	92	<b>75</b>	144
	Com via de bicicleta	68	80	<b>61</b>	123
	Variação	-24%	-13%	-19%	-15%
TTC (s)	Sem via de bicicleta	1.14	1.14	1.13	1.08
	Com via de bicicleta	1.20	1.23	<b>1.23</b>	1.0
	Variação	+5%	+8%	+9%	-7%
CO <sub>2</sub> (g/km)	Sem via de bicicleta	192.6	193.6	<b>176.2</b>	246.9
	Com via de bicicleta	181.4	190.1	<b>165.6</b>	228.2
	Variação	-6%	-2%	-6%	-7%
NO <sub>x</sub> (g/km)	Sem via de bicicleta	0.370	0.340	<b>0.263</b>	0.456
	Com via de bicicleta	0.358	0.331	<b>0.260</b>	0.444
	Variação	-3%	-3%	-1%	-3%

Legenda: Foi analisado como modelo de segurança "time-to-collision" (TTC)

### Simulação do PC-CRASH para colisões Veículos motorizados-bicicleta

Nesta secção explora-se a relação entre a velocidade do veículo motorizado e as lesões provocadas ao ciclista. Foi definido que a distância da localização do ponto de impacto da cabeça do ciclista no veículo até à frente do veículo (CHID)<sup>18</sup> representa o ponto de impacto da cabeça por ser considerado o principal fator para analisar as lesões do impacto.

Por causa de afetarem os resultados é necessário considerar fatores como o ângulo de colisão, velocidade de colisão, forma do veículo e posição inicial, pois são os principais fatores que também vão influenciar a cinemática do ciclista.<sup>18,19</sup>

Através do PC-CRASH (versão 11.1) foi simulado um acidente na traseira de um veículo entre uma bicicleta e um veículo motorizado em condições de pavimento seco e sob condições climáticas secas. Por causa de estar definido que se o ângulo de conflito é  $\leq 30^\circ$  o conflito ocorre entre dois veículos<sup>7</sup> assumiu-se neste estudo um ângulo de  $30^\circ$  entre bicicletas e veículos motorizados. Variou-se a velocidade inicial dos veículos motorizados entre 32 km/h e 88 km/h. Considerou-se a seguinte sequência de colisão: reação-desaceleração-travagem-desaceleração. Incluíram-se os

seguintes parâmetros no modelo: parâmetros gerais do veículo motorizado e bicicleta (como comprimento, largura, etc), condutor e ciclista (sexo, peso, altura), coeficientes de restituição (0.1) e fricção (1.0). Foi considerada uma velocidade de 5km/h e constante para a bicicleta. A distância longitudinal entre bicicleta e veículos motorizados é de 3.5 metros antes da colisão. Uma vez que a forma do veículo pode influenciar os resultados dos impactos, selecionou-se um tipo de veículo com uma forma mais genérica possível da base de dados do PC-CRASH (Renault Clio IV 2012). Teve que se desenhar também uma bicicleta com o ciclista para o modelo. A figura 3 representa um tipo de colisão com detalhe entre uma bicicleta e um veículo motorizado.

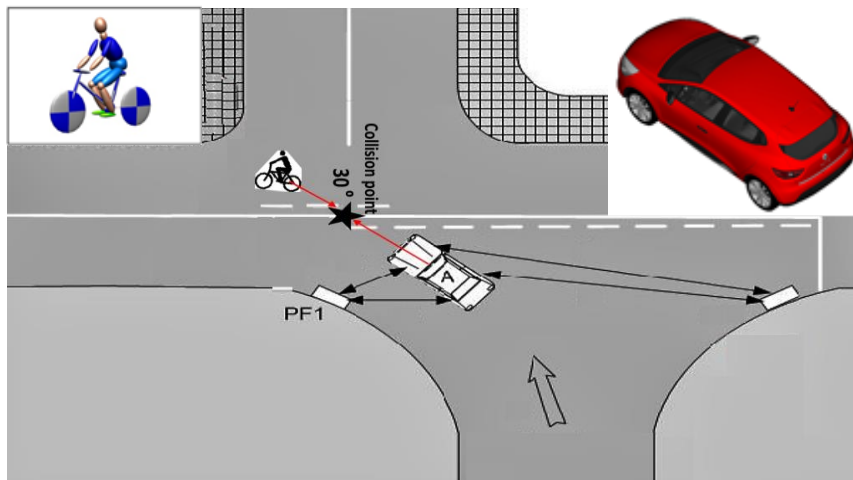


Figura 3: tipo de colisão (traseira 30°) para o veículo motorizado e bicicleta.

Os resultados mostram que o ponto do impacto do ciclista no veículo é menor para velocidades entre 45 km/h e 60 km/h do que nas outras velocidades praticadas. Na Tabela 2 pode-se ver que a localização do impacto da cabeça do ciclista para a velocidade máxima é aproximadamente no meio do vidro.

Tabela 2: Distância longitudinal do impacto da cabeça do ciclista com um Angulo de colisão de 30º

<b>Número de simulações</b>	<b>Velocidades de impacto do veículo motorizado (km/h)</b>	<b>CHID (m)</b>
1	36.2	1.01
2	40.2	1.07
3	47.1	1.10
4	48.8	1.18
5	53.7	1.04
6	58.3	1.12
7	59.5	1.09
8	63.0	1.12
9	66.0	1.26
10	67.7	1.30
11	70.3	1.41
12	73.0	1.51
13	75.4	1.55
14	78.6	1.60
15	81.0	1.63

## **Conclusão**

Este trabalho propõe uma via dedicada a bicicletas numa rede urbana de forma a melhorar o desempenho de tráfego, emissões e segurança em comparação com um trabalho anterior que não considerou este tipo de vias.

Foi feita uma análise microscópica utilizando o modelo de tráfego VISSIM em conjunto com a metodologia VSP e modelo SSAM. Tanto para ciclistas como para condutores, os dados de saída analisados foram o tempo de viagem médio, emissões de CO<sub>2</sub> e NO<sub>x</sub>, número de conflitos e TTC. Os resultados do PC-CRASH demonstram que a velocidades superiores (entre 60 km/h e 80 km/h) o ponto de impacto da cabeça é próximo ao centro do pára-brisas. Os resultados mostraram que a presença de uma via para ciclistas melhora os desempenhos de tráfego, emissões e segurança tanto para condutores e como ciclistas. Neste sentido a rota D apresenta os piores desempenhos enquanto a rota C apresenta os melhores desempenhos relativamente à segurança e taxas de emissões e a rota A o melhor desempenho nos tempos de viagem. A rota A e B representam menor tempo de viagem para bicicletas e veículos motorizados.



A mesma simulação para o PC-CRASH pode ser repetida utilizando diferentes tipos de acidentes com diferentes ângulos de acidentes. A velocidade da bicicleta foi considerada constante neste estudo. Sugere-se para trabalho futuro variar a velocidade da bicicleta de forma a ser possível obter diferentes resultados de segurança. É importante referir que o formato do veículo motorizado selecionado pode também alterar os resultados da simulação; assim, pretende-se repetir o mesmo tipo de análise para diferentes tipos de veículos motorizados em trabalhos futuros.

## Agradecimentos

Os autores agradecem os seguintes projetos: Projeto estratégico UID/EMS/00481/2013-FCT e CENTRO-01-0145-FEDER-022083; @CRUISE (PTDC/EMS-TRA/0383/2014), financiado pelo projeto 9471 – Reforçar a Investigação, o Desenvolvimento Tecnológico e a Inovação (Project 9471 – RIDTI) e suportado pelo fundo da comunidade Europeia FEDER; MobiWise (P2020 SAICTPAC/0011/2015), financiado por COMPETE2020, Portugal 2020, FEDER, e FCT – Fundação para ciência e tecnologia. A bicicleta utilizada foi cedida pela Órbita Bikes. Os autores também agradecem à Toyota Caetano Portugal, que permitiu a utilização de um dos seus veículos. Os autores gostariam de agradecer ao J. Teixeira e M. Vilaça pela sua ajuda ao nível da tradução.

## Referências

1. M. Winters, M. A. Harris, C. C. Reynolds, P. A. Cripton, M. Chipman, M. D. Cusimano, J. Brubacher, S. M. Friedman, M. Monro, L. Vernich and H. Shen, “Bicyclists’ Injuries and the Cycling Environment: The impact of route infrastructure”, Washington, DC, (2013).
2. D. Rojas-Rueda, A. De Nazelle, O. Teixidó and M. J. Nieuwenhuijsen, “Replacing car trips by increasing bike and public transport in the greater Barcelona metropolitan area: a health impact assessment study” *Environment international*, 49 100-109 (2012).
3. EC. “Traffic Safety Basic Facts 2016 – Cyclists report”, European Road Safety Observatory Documentation, Traffic Safety Basic Facts, 24 p, (2016).
4. A. Fernández-Heredia, A. Monzón, and S. Jara-Díaz, “Understanding cyclists’ perceptions, keys for a successful bicycle promotion”, *Transportation research part A: policy and practice*, 63 1-11 (2014).
5. PTV AG., 2016. VISSIM 7 user manual. Planung Transport Verkehr AG, Karlsruhe, Germany.
6. H. C. Frey, A. Unal, J. Chen, S. Li and C. Xuan, “Methodology for developing modal emission rates for EPA’s multi-scale motor vehicle & equipment emission system”. Ann Arbor, Michigan: US Environmental Protection Agency, (2002).
7. D. Gettman, L. Pu, T. Sayed and S. G. Shelby, “Surrogate safety assessment model and validation: final report”, McLean, VA: Federal Highway Administration 30 (FHWA), U.S. Department of Transportation, Report No. FHWA-HRT-08-051, 31 (2008).

8. AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials), *"Guide for the development of bicycle facilities"*, Washington, DC: American Association of State Highway and Transportation Officials, 4<sup>th</sup> edition, 2012.
9. NACTO (National Association of City Transportation Officials urban bikeway design guide), *"Urban Bikeway Design Guide"*, Available at: <http://nacto.org/cities-for-cycling/design-guide/>. Accessed January 5, 2013.
10. D. Hale, "How many netsim runs are enough?" *McTrans*, 11 (3) 1-9 (1997).
11. R. Dowling, A. Skabardonis, and V. Alexiadis, "Traffic analysis toolbox, volume III: Guidelines for applying traffic microsimulation software", Publication FHWA-HRT-04-040, FHWA, U.S. Department of Transportation, (2004).
12. K. Salamati and N. M. Roupail, "A Simplified Method for Comparing Emissions at Roundabouts and Signalized Intersections 2", *Institute for Transportation Research and Education* 31, 32, (2015).
13. M. C. Coelho, L. Farias, and N. M. Roupail, "Effect of roundabout operations on pollutant emissions", *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 11 (5) 333-343 (2006).
14. HCM. Highway Capacity Manual. Transportation Research Board, Washington, D.C., (2010).
15. K. Salamati, B. Schroeder, D. Geruschat, and N. M. Roupail, "Event-Based Modeling of Driver Yielding Behavior to Pedestrians at Two-Lane Roundabout Approaches", In *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 2389, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., 1-11 (2013).
16. ACAP, "Automobile Industry Statistics 2011 Edition [in Portuguese]", ACAP – Automobile Association of Portugal (2014). <http://www.acap.pt/pt/home/>, Accessed November 24, 2017.
17. F. Huang, P. Liu, H. Yu, and W. Wang, "Identifying if VISSIM simulation model and SSAM provide reasonable estimates for field measured traffic conflicts at signalized intersections", *Accident Analysis & Prevention*, 50 1014-1024 (2013).
18. Q. Lin, G. Lu, F. Ji, Y. Ding, Y. Cheng and L. Shao, "Simulative analysis of cyclist's head impact point in vehicle-electric bicycle rear-end crashes", 161-164 (2010).
19. Q. Yuan and Y. B. Li, "Review and Trend of the Technology of Vehicle Crash Reconstruction", *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2 122-125 (2002).