

# Avaliação preliminar da resiliência na mobilidade urbana decorrente do transporte público

## *Preliminary assessment of resilience in urban mobility considering public transportation*

Luiza Gagno Azolin<sup>1</sup>, Antônio Néelson Rodrigues da Silva<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidade de São Paulo Escola de Engenharia de São Carlos, São Paulo – Brasil, luiza.azolin@gmail.com

<sup>2</sup>Universidade de São Paulo Escola de Engenharia de São Carlos, São Paulo – Brasil, anelson@sc.usp.br

**Recebido:**

02 de julho de 2020

**Aceito para publicação:**

10 de agosto de 2020

**Publicado:**

16 de novembro de 2020

**Editor de área:**

Bruno Vieira Bertoncini

**Palavras-chaves:**

Resiliência.

Mobilidade urbana.

Crise de combustível.

Transporte público.

**Keywords:**

Resilience.

Urban mobility.

Fuel crisis.

Public transport.

DOI:10.14295/transportes.v28i4.2406

**RESUMO**

O objetivo deste estudo é inserir o transporte público em uma estratégia para avaliação da resiliência na mobilidade urbana diante de uma eventual restrição na oferta de combustível. Considerando como disponíveis apenas os modos ativos e o transporte público, são avaliados diferentes cenários com distâncias máximas possíveis para os modos a pé e bicicleta e de funcionamento do transporte público. As viagens são então classificadas em persistentes, excepcionais, adaptáveis ou transformáveis, sendo as três primeiras categorias apontadas como resilientes. No estudo de caso realizado na cidade de São Carlos-SP, observou-se que a inserção do transporte público, mesmo em condições de mínimo funcionamento, proporcionou um ganho considerável na resiliência: 21,4% no cenário mais pessimista para os modos ativos. A abordagem proposta também permite identificar linhas de transporte público que não agregam novos trechos atendidos ao serem colocadas em funcionamento, o que justificaria a sua não utilização na situação de crise avaliada.

**ABSTRACT**

This study aims at introducing urban public transportation in a strategy for the evaluation of resilience in urban mobility in the case of an eventual fuel supply shortage. Different scenarios of public transport operation and maximum possible distances for walking and cycling are evaluated. The resulting trips are then classified as persistent, exceptional, adaptable or transformable, with the three first categories defined as resilient. Results of the application of the method in the city of São Carlos-SP showed that the introduction of even a single public transportation route could produce a considerable increase in resilience: 21.4% in the most pessimistic scenario for the active modes. This approach also allows the identification of the routes that do not add any additional demand coverage when put into operation, what would be a reason for not using those routes in the critical situation analyzed here.

## 1. INTRODUÇÃO

Mesmo com o desenvolvimento e a crescente inserção dos combustíveis alternativos, o setor de transportes continua dominado pelo uso do petróleo. A previsão é que, em 2040, a demanda por este combustível corresponda a 85% da demanda total dos transportes (BP, 2018). Entretanto, sendo esse um recurso finito, acredita-se que, em algum momento, sua produção global atingirá um limite máximo, o “pico do petróleo”, a partir do qual seu fornecimento será continuamente reduzido (Krumdieck *et al.*, 2010).

Devido ao seu papel fundamental na manutenção e no desenvolvimento dos demais setores da economia, perdas nos sistemas de transportes são capazes de acarretar perdas econômicas

substanciais (Cox *et al.*, 2011). Uma evidência desse impacto foi a crise enfrentada pelos brasileiros em maio de 2018, quando caminhoneiros iniciaram uma greve devido à alta do valor do diesel. Estradas foram bloqueadas, o transporte de produtos em geral e de combustível foi paralisado, o que provocou um enorme desabastecimento e instaurou uma verdadeira calamidade no país (Da Silva *et al.*, 2019).

Na busca por alternativas que contribuam para o crescimento urbano sustentável, é essencial que haja menor dependência dos automóveis e um transporte público eficiente, ou seja, um sistema de transporte sustentável (Zhao, 2010). A necessidade de um sistema de transporte robusto e confiável vem impulsionando pesquisas para compreender as relações que geram vulnerabilidades ao sistema e, assim, encontrar maneiras de reduzir as consequências de possíveis choques e interrupções, tornando-o mais resiliente (Berdica, 2002). A resiliência é entendida como a capacidade de um sistema resistir (Jin *et al.*, 2014; Leobons *et al.*, 2019), se adaptar (Ta *et al.*, 2009; Gaitanidou *et al.*, 2017) ou ainda se transformar (Seeliger e Turok, 2013; Mehmood, 2016), para se recuperar de uma interrupção, absorver suas consequências e manter sua funcionalidade. Dessa forma, o desenvolvimento de estratégias que quantifiquem a resiliência contribui para o processo de tomada de decisão e melhorias dos sistemas (D’Lima e Medda, 2015). Entretanto, na análise de sistemas de transporte, ainda são poucos os estudos que avaliam a resiliência inter-relacionando diferentes modos de transporte (Leobons *et al.*, 2019).

Assim, este trabalho tem por objetivo inserir o transporte público em uma estratégia para avaliação da resiliência na mobilidade urbana, considerando a possibilidade da oferta restrita de combustível. Em um estudo de caso, pretende-se utilizar o método proposto para avaliar a variação da resiliência na mobilidade em diferentes circunstâncias. A construção de cenários permite analisar a influência de diferentes níveis de oferta do transporte público na resiliência, em comparação ao cenário de restrição total aos modos motorizados.

## 2. REFERENCIAL TEÓRICO

A primeira associação do termo resiliência aos sistemas ecológicos foi localizada no estudo de Holling (1973), definida como a capacidade de um sistema para manter seus relacionamentos, absorvendo as mudanças causadas por eventuais distúrbios, ou seja, uma medida de persistência. Ao longo dos anos, diferentes interpretações e perspectivas foram desenvolvidas para esse conceito. Na literatura, destacam-se a resiliência segundo a engenharia e a resiliência multiequilíbrio, ou ecológica. A resiliência da engenharia está associada à recuperação de um sistema diante de uma instabilidade, caso em que a ênfase está na eficiência em retornar a um estado de equilíbrio anterior, estacionário, com as mesmas estruturas e forma de funcionamento (Seeliger e Turok, 2013). Já a resiliência ecológica admite a existência de múltiplos estados de equilíbrio, considerando a possibilidade de mudanças e adaptações para outros estados de estabilidade (Holling, 1996; Reggiani *et al.* 2015).

Sob a dinâmica de sistemas socioecológicos e considerando que a resiliência não está associada apenas à capacidade de um sistema persistir em um domínio de estabilidade, foram inseridos mais dois aspectos: a adaptabilidade e a transformabilidade (Walker *et al.*, 2004). Assim, a resiliência socioecológica representa uma interpretação mais ampla da resiliência para sistemas interdependentes, suscetíveis aos mais variados distúrbios. Nesse caso, os sistemas estão aptos a se adaptarem, o que permite seu desenvolvimento dentro do domínio de estabilidade existente (Folke *et al.*, 2010), e a se transformarem, encontrando novos estados de equilíbrio, aceitando mudanças em sua estrutura e funcionamento.

Em relação aos sistemas de transporte, a resiliência vem sendo avaliada em abordagens qualitativas, menos precisas, e quantitativas, em geral para avaliar a rede de um único modo de transporte diante de eventos prejudiciais, por meio de simulações e de metodologias de otimização (Leobons *et al.*, 2019). Em relação aos eventos perturbadores, são encontrados estudos que consideram, entre outras, interrupções de redes (sem especificar o episódio causador) (Berche *et al.*, 2009; Jin *et al.*, 2014; D'Lima e Medda, 2015), crises econômicas ou energéticas (Fernandes *et al.*, 2017; Martins *et al.*, 2019), desastres de origem humana (Cox *et al.*, 2011) e, em grande parte, desastres naturais (Chan e Schofer, 2016; Beheshtian *et al.*, 2018). Quanto ao modo de transporte explorado, são encontradas pesquisas que avaliam um único modo (Chan e Schofer, 2016; D'Lima e Medda, 2015) e que analisam a integração entre diferentes modos de transportes, considerando a compensação da demanda atingida pela utilização de modos alternativos (Cox *et al.*, 2011; Jin *et al.*, 2014) ou uma adequação no modo de transporte a ser utilizado (Martins e Rodrigues da Silva, 2018, 2019; Martins *et al.*, 2019).

Em uma avaliação da mobilidade urbana considerando o prognóstico de crise energética, Krumdieck *et al.* (2010) sugeriram uma análise de risco tendo em vista a adequação do modo de transporte (priorizando os modos ativos), porém sem abordar o termo resiliência. As viagens foram classificadas em três níveis, segundo sua essencialidade: *opcionais*, passíveis de eliminação sem causar perda de bem-estar; *necessárias*, aquelas que causariam perdas econômicas e sociais; e *essenciais*, que correspondem ao nível de viagens mais difíceis de eliminar, pois sua perda traria danos à saúde, à obtenção de renda e necessidades básicas.

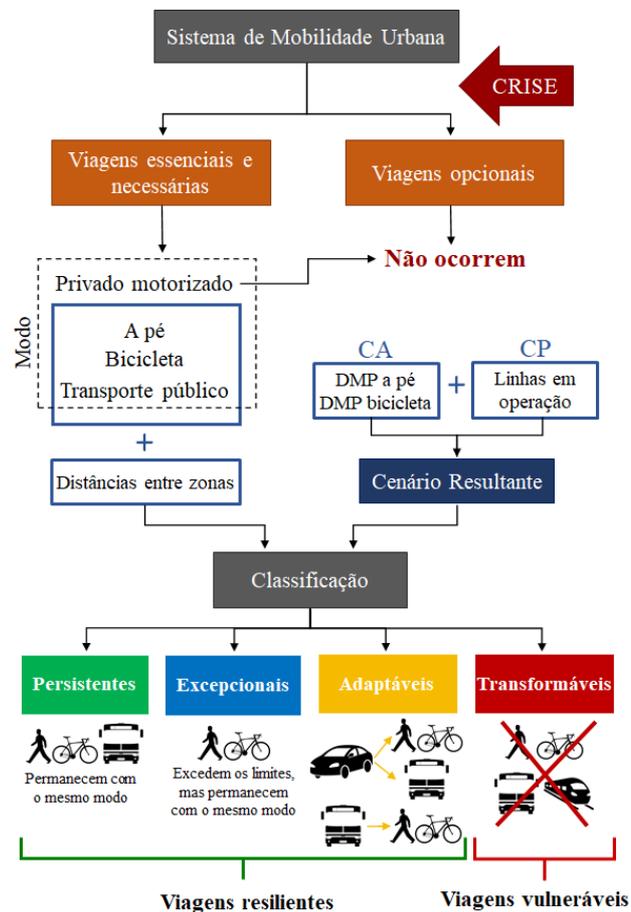
A partir da visão socioecológica para resiliência de Folke *et al.* (2010), Fernandes *et al.* (2017) incorporaram as três etapas (*persistência*, *adaptabilidade* e *transformabilidade*) e propuseram um conceito para resiliência da mobilidade urbana. A *persistência* está relacionada à continuidade do padrão da mobilidade, sem afetar a qualidade de vida. A *adaptabilidade* corresponde à capacidade de se alterar os padrões de mobilidade, sem comprometer a qualidade de vida. Já na *transformabilidade* as alterações causam impactos econômicos e sociais, pois não é possível persistir ou se adaptar.

Nesse contexto, Martins e Rodrigues da Silva (2018, 2019) apresentaram uma estratégia para avaliar a resiliência da mobilidade urbana. Viagens *necessárias* e *essenciais* foram analisadas diante de cenários com diferentes valores atribuídos as Distâncias Máximas Possíveis (DMP) associadas aos modos a pé e bicicleta. Ao classificar essas viagens em *persistentes*, *adaptáveis* e *transformáveis*, os autores propuseram a inserção de mais uma categoria, a *excepcionalidade*, que incorpora as viagens por modos ativos que possuem distâncias além das máximas admitidas. Utilizando essa estratégia, Martins *et al.* (2019) realizaram dois estudos de caso: um na cidade de São Carlos e outro na Região Metropolitana de Maceió e avaliaram a relação entre os níveis de renda e as distâncias das viagens, demonstrando uma associação entre os níveis de resiliência e a renda dos indivíduos. Consideraram, no entanto, a possibilidade de escassez total de combustível ao tratar dos modos motorizados, sem fazer distinção entre os transportes público e privado, justamente a lacuna que se pretende preencher com este estudo exploratório.

### 3. METODOLOGIA

Neste item estão descritas as etapas para implantação de uma estratégia para avaliação da resiliência na mobilidade urbana com a inserção do transporte público. A partir de uma divisão da cidade analisada em zonas de tráfego, inicialmente devem ser determinadas as distâncias entre os centroides destas zonas e as Distâncias Máximas Possíveis para os modos ativos de

transporte, conforme descrito nos itens 3.1 e 3.2, respectivamente. O terceiro tópico apresenta o processo de identificação dos itinerários e dos trechos de atendimento do transporte público disponível. Por fim, o quarto item expõe como são classificadas as viagens e como é encontrado o nível de resiliência na mobilidade urbana para diferentes cenários. O procedimento proposto é baseado em dados obtidos através de uma Pesquisa Origem e Destino (OD), em que são consideradas apenas as viagens *necessárias* e *essenciais*, segundo a classificação realizada por Krumdieck *et al.* (2010) e adotada por Martins *et al.* (2019).



**Figura 1.** Esquema ilustrativo da metodologia. (CA: Cenário de modos ativos, CP: Cenários de funcionamento de transporte público, DMP: Distância Máxima Possível)

Com o intuito de facilitar a compreensão do método apresentado, a Figura 1 exibe um esquema com os elementos utilizados e como são inseridos na análise. Considera-se, inicialmente, que um sistema de mobilidade esteja diante de uma situação de crise, neste estudo a crise de combustíveis fósseis. Então, as viagens, obtidas através de uma Pesquisa OD, são classificadas em *opcionais*, *necessárias* e *essenciais*. Devido a restrição imposta pela crise, as viagens *opcionais* e as viagens *necessárias* e *essenciais* realizadas por transporte privado motorizado não ocorreriam. Considerando as classes de viagens que continuariam sendo feitas, com o modo de transporte utilizado e as distâncias possíveis de serem viajadas (aqui consideradas através das distâncias entre zonas de tráfego), a classificação é feita para cada cenário resultante estabelecido. Os cenários resultantes, por sua vez, são formados pelas combinações entre os cenários de modos ativos (CA), compostos pelas Distâncias Máximas Possíveis de serem percorridas a pé e por bicicleta, e os cenários de funcionamento de transporte público (CP), compostos pelas linhas de

transporte público em funcionamento e seus itinerários. Dessa forma, as viagens são classificadas em *persistentes*, *excepcionais*, *adaptáveis* e *transformáveis*. Por fim, são consideradas resilientes as três primeiras categorias mencionadas.

### 3.1. Determinação das distâncias entre os centroides das zonas

A mensuração da acessibilidade pode ser feita de diferentes formas. Algumas delas, mais robustas, incorporam aspectos como a velocidade e o custo (Vale, 2020). Entretanto, o presente estudo tem como objetivo fornecer uma estratégia que possa ser aplicada através de medidas simples e em contextos sem conjuntos de dados abrangentes e/ou detalhados disponíveis. Assim, são utilizadas as distâncias entre os centroides das zonas de tráfego, que podem ser medidas com a utilização de um Sistema de Informações Geográficas (SIG), através da malha viária. Dessa forma, são obtidas as distâncias de todos os trechos origem-destino possíveis para as viagens da região a ser estudada. A distância atribuída para as viagens intrazonais será igual a zero e as viagens entre um mesmo par de zonas, porém em sentidos opostos (da zona A para zona B, ou da zona B para zona A), possuem a mesma distância, conforme adotado por Martins *et al.* (2019).

### 3.2. Distâncias máximas possíveis e composição dos cenários para os modos ativos

Entende-se que há uma limitação da distância máxima possível a ser percorrida com modos ativos de transporte, que é influenciada por características locais e dos indivíduos. Ao se determinar as Distâncias Máximas Possíveis (DMP) para os modos a pé e bicicleta, são definidos os valores limites de distâncias que podem ser percorridas por esses modos no local analisado (Martins *et al.*, 2019). Assim, diferentes cenários de DMP podem ser construídos, com a única restrição de que a distância máxima para o modo a pé deve ser sempre menor do que para bicicleta, compondo os cenários de modos ativos (CA).

### 3.3. Trechos atendidos e composição dos cenários para o transporte público

A fim de inserir o transporte público na análise de resiliência devem ser identificadas as zonas de tráfego e os trechos origem-destino atendidos por esse serviço, conforme será descrito no primeiro subitem. Em seguida podem ser elaborados os possíveis cenários de funcionamento desse modo de transporte diante de uma eventual crise.

#### 3.3.1. Trechos atendidos

Para avaliação dos trechos origem-destino atendidos pelo transporte público local é necessário obter, primeiramente, seus itinerários. De posse desses dados e com o auxílio de um SIG devem ser identificadas as zonas percorridas por cada itinerário. Com o intuito de ilustrar o procedimento de forma simplificada, supõe-se uma região composta por 6 zonas de tráfego em que é realizada a identificação das zonas percorridas no sentido de ida e de volta da Linha A de transporte público (Figura 2). Cada linha de transporte público da região analisada terá suas particularidades: os trajetos de ida e de volta podem ou não passar pelas mesmas zonas; e uma zona pode ou não ser atendida mais de uma vez durante um mesmo trajeto.

Identificadas as zonas percorridas por cada linha, assim como a ordem do trajeto, é possível constituir o itinerário utilizando as zonas de tráfego, como é apresentado na Tabela 1, que considera a existência de três linhas de transporte para compor um exemplo, linhas A, B e C. Na Tabela 1, nota-se que a Linha C possui característica circular e, assim, apresenta um percurso

em sentido único. Em seguida, é elaborada a Matriz de Trechos Atendidos (MTA) para cada linha. A Tabela 2 apresenta a MTA de cada linha do exemplo analisado de forma conjunta (linha A/linha B/linha C) e os números 1 e 0 mostram se o trecho entre zonas é ou não atendido pela linha, respectivamente. É importante observar que sempre que uma zona é percorrida após a outra, havendo ou não zonas intermediárias nesse percurso, o trecho origem-destino é considerado como atendido. A linha C, por ser uma linha circular, promove o acesso mútuo entre todas as zonas que percorre. Além disso, viagens intrazonais não são relevantes nesse processo, visto que, por possuírem distância igual a zero, no cenário mais pessimista já são consideradas como possíveis de serem feitas por modos ativos.

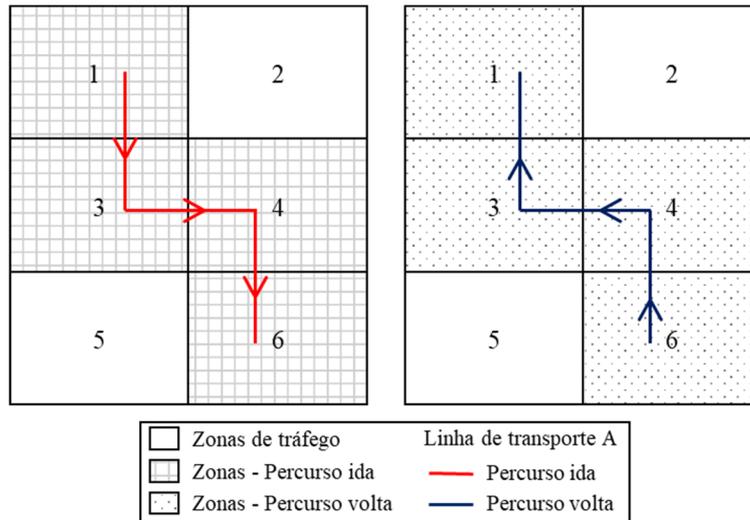


Figura 2. Identificação das zonas percorridas por uma linha de transporte público em um exemplo hipotético

Tabela 1 – Itinerários das linhas de transporte público (zonas) – Exemplo hipotético

Linha	A	B	C
Ida	1	6	3
	3	4	5
	4	2	6
Volta	6	1	4
	6	1	3
	4	2	5
	3	4	6
	1	6	4

Nota: Linha C - Circular: Sentido único

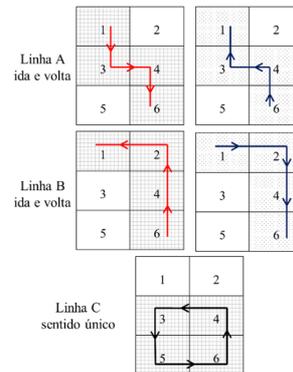


Tabela 2 – Matriz de Trechos Atendidos (MTA) das Linhas (A/B/C) - Exemplo hipotético

O\D	1	2	3	4	5	6
1	-	0/1/0	1/0/0	1/1/0	0/0/0	1/1/0
2	0/1/0	-	0/0/0	0/1/0	0/0/0	0/1/0
3	1/0/0	0/0/0	-	1/0/1	0/0/1	1/0/1
4	1/1/0	0/1/0	1/0/1	-	0/0/1	1/1/1
5	0/0/0	0/0/0	0/0/1	0/0/1	-	0/0/1
6	1/1/0	0/1/0	1/0/1	1/1/1	0/0/1	-

Nota: Trechos numerados em vermelho e negrito: atendidos na ida; Trechos numerados em azul e itálico: atendidos na volta; Trechos sem destaque: atendidos pela linha circular.

### 3.3.2. Cenários de funcionamento do transporte público

Diante de uma situação de crise de combustível, considerando a oferta limitada desse recurso energético, acredita-se que gestores e responsáveis pela administração do sistema de transporte de uma cidade devem optar por manter em funcionamento as linhas de transporte público consideradas prioritárias. Com o objetivo de determinar essa ordem de prioridade é proposto um cálculo de demanda potencial (DP) para cada linha. A DP é calculada a partir dos dados da Pesquisa OD e da MTA de cada linha.

Primeiramente, é identificado o número de viagens motorizadas referentes a cada trecho origem-destino existente nos resultados da Pesquisa OD. Em seguida, são identificados, para cada linha de transporte público, quais trechos são por ela atendidos. Então, a DP é calculada pelo somatório do número de viagens motorizadas dos trechos atendidos pela respectiva linha. A Tabela 3 apresenta essa análise para o exemplo utilizado. Neste caso, quanto maior a DP, melhor a colocação da linha na lista de ordem de prioridade.

Para elaborar os possíveis cenários de funcionamento de transporte público (CP) é considerado que um número restrito de linhas poderá permanecer em funcionamento, seja esse número igual a zero (cenário mais pessimista) ou correspondente ao número total de linhas do local (cenário mais otimista). Assim, para uma região que possui N linhas de transporte público, os cenários são compostos da seguinte forma: o CP 0 corresponde à situação com nenhuma linha de transporte público em funcionamento; o CP 1 corresponde à situação com 1 linha em funcionamento, de maior prioridade; o CP 2 considera 2 linhas em funcionamento, duas primeiras na lista de prioridade; e assim por diante até a composição do CP N, com todas as linhas em funcionamento.

**Tabela 3** – Exemplo hipotético de determinação da prioridade das linhas (considerando que os dados de OD utilizados contemplam apenas as 7 possibilidades apresentadas abaixo)

Zona Origem	Zona Destino	Viagens motorizadas	Linha A	Linha B	Linha C
1	2	29	Não atende	Atende	Não atende
1	6	63	Atende	Atende	Não atende
2	6	81	Não atende	Atende	Não atende
4	1	37	Atende	Atende	Não atende
4	3	25	Atende	Não atende	Atende
3	6	45	Atende	Não atende	Atende
5	4	31	Não atende	Não atende	Atende
Demanda Potencial (DP)			170	210	101
Prioridade			2	1	3

A partir das MTA das linhas e da ordem de prioridade estabelecida é possível compor a MTA referente a cada CP. Esse procedimento é feito pela simples junção das matrizes correspondentes às linhas em funcionamento no respectivo cenário.

### 3.4. Cenários resultantes e classificação das viagens

Com os cenários de modos ativos (CA) e de funcionamento de transporte público (CP) estabelecidos, são formados os cenários resultantes (C) em que serão realizadas as análises da resiliência na mobilidade urbana. Isso é feito a partir de todas as combinações possíveis entre CA e CP. Para o exemplo apresentado, considerando 3 cenários compostos para modos ativos de transporte, a Tabela 4 exhibe os cenários encontrados.

As viagens da Pesquisa OD são então classificadas, para cada cenário, a partir dos segmentos de resiliência apresentados por Folke *et al.* (2010) e Martins *et al.* (2019). Viagens realizadas a pé ou por bicicleta, dentro das respectivas DMP, e realizadas por transporte público, com distâncias acima da DMP para bicicleta e trechos atendidos pelo CP correspondente, são consideradas *persistentes*. Viagens realizadas por modos ativos, com distâncias acima das respectivas DMP, são classificadas como *excepcionais*. Viagens feitas por modos motorizados, com distâncias dentro das DMP, e apenas por automóveis, com distâncias maiores que as DMP, porém com trechos origem-destino atendidos pelo transporte público em funcionamento, são consideradas *adaptáveis*. Por fim, viagens motorizadas, com distâncias superiores às DMP e com percurso não atendido de acordo com o CP, são classificadas como *transformáveis*, sendo essas as mais afetadas pela restrição imposta.

**Tabela 4** – Composição dos cenários resultantes (C) a partir dos cenários de modos ativos (CA) e de transporte público (CP)

Cenários								
CA	CP	C	CA	CP	C	CA	CP	C
	0	1-0		0	2-0		0	3-0
1	1	1-1	2	1	2-1	3	1	3-1
	2	1-2		2	2-2		2	3-2
	3	1-3		3	2-3		3	3-3

São consideradas resilientes as viagens *persistentes*, *adaptáveis* e *excepcionais*. As viagens *transformáveis* são avaliadas como vulneráveis. Então, o nível de resiliência é dado pela porcentagem de viagens resilientes em relação ao total de viagens e é categorizado, por uma divisão em intervalos iguais, em: muito baixo (0 a 20,0%), baixo (20,1 a 40,0%), médio (40,1 a 60,0%), alto (60,1 a 80,0%) e muito alto (80,1 a 100,0%), como proposto por Martins *et al.* (2019).

#### 4. RESULTADOS

Uma aplicação do método proposto foi realizada na cidade de São Carlos, no estado de São Paulo. Foram utilizados dados da Pesquisa Origem e Destino (OD) realizada em 2007/2008 pelo Departamento de Engenharia de Transportes da Escola de Engenharia de São Carlos (Rodrigues da Silva, 2008). A região de estudo e as viagens consideradas foram estabelecidas a partir de Martins e Rodrigues da Silva (2018, 2019), que aplicaram a estratégia por eles desenvolvida na mesma cidade.

Do total de 6821 viagens consideradas, 33,5% são viagens realizadas a pé, 3,2% por bicicleta, 42,1% por automóvel e 21,2% por transporte público. O transporte público ofertado em São Carlos é realizado unicamente por ônibus. Os itinerários das linhas de ônibus em operação no ano de realização da Pesquisa OD foram obtidos junto à Prefeitura Municipal de São Carlos. Na época, o sistema contava com 54 linhas, em sua grande maioria radiais e diametrais.

##### 4.1. Distâncias entre zonas, distâncias máximas possíveis e cenários para os modos ativos

A distância entre zonas foi obtida a partir de seus centroides e foi considerada a distância através da malha viária. Em seguida, foi necessário determinar as Distâncias Máximas Possíveis (DMP) para os modos a pé e bicicleta a serem avaliadas. Em seu trabalho, ao analisarem a resiliência em São Carlos, considerando apenas os modos ativos de transporte em funcionamento,

Martins *et al.* (2019) destacam três cenários de DMP que apresentaram uma mudança expressiva no nível de resiliência. Assim, optou-se por utilizar esses valores de DMP para compor os cenários de modos ativos: CA 2, 7 e 8; e o primeiro e o último dos cenários avaliados, compondo os CA 1 e 9, respectivamente. Foram escolhidas também as condições de DMP em que a resiliência máxima (100%) foi atingida, apenas com o funcionamento dos modos a pé e bicicleta, estabelecendo o CA 10. Além disso, foram consideradas situações intermediárias (CA 3, 4, 5 e 6). Os valores de DMP para as viagens a pé e de bicicleta, bem como os respectivos cenários, constam da Tabela 7 (item 4.3).

#### 4.2. Trechos atendidos e cenários para o transporte público

De posse dos itinerários das 54 linhas de ônibus em funcionamento em São Carlos no ano de 2007, em formato digital, foram identificadas as zonas percorridas por cada percurso e elaboradas as Matrizes de Trechos Atendidos (MTA) para cada linha, conforme o item 3.3.1.

A fim de compor os cenários relativos ao transporte público (CP), o primeiro passo foi determinar a ordem de prioridade das linhas de ônibus em operação na cidade de São Carlos. Para isso, a partir dos dados utilizados da Pesquisa OD, verificou-se o número de viagens motorizadas por trecho origem-destino. A Tabela 5 contém os cinco trechos que apresentaram os maiores valores. Posteriormente, foram identificados os trechos que cada linha de ônibus atendia, possibilitando a determinação da Demanda Potencial (DP) e a classificação das linhas em ordem de prioridade. As seis linhas com maiores valores de DP são listadas na Tabela 6.

**Tabela 5** – Análise de viagens por trechos: trechos com maior número de viagens motorizadas na cidade de São Carlos, segundo dados da pesquisa OD de 2007-2008

Zona Origem	Zona Destino	Trecho	Nº de viagens motorizadas	Nº de linhas que atendem o trecho
8	21	8-21	79	15
9	21	9-21	54	14
1	21	1-21	51	7
10	21	10-21	51	4
34	21	34-21	50	19

**Tabela 6** – Seis primeiras linhas de ônibus de São Carlos na ordem de prioridade definida pela demanda potencial (DP), segundo dados da pesquisa OD de 2007-2008

Linha	DP	Prioridade	Linha	DP	Prioridade
3969	1462	1	1111	923	4
3869	1331	2	4169	904	5
4069	966	3	4765	876	6

Dessa forma, foi possível compor cada MTA para cada cenário de transporte público. A MTA do CP 0 foi completamente preenchida por zeros, pois nesse cenário não haveria transporte público em funcionamento. A MTA do CP 1 corresponde exatamente a MTA da Linha 3969, número 1 na ordem de prioridade, visto que apenas essa linha estaria em operação nesse caso. Como no CP 2 são consideradas 2 linhas em funcionamento (3969 e 3869), sua MTA foi preenchida com a junção das matrizes dessas linhas. Seguiu-se esse procedimento até a determinação do CP 54, com todas as linhas de ônibus ativas.

#### 4.3. Cenários resultantes e classificação das viagens

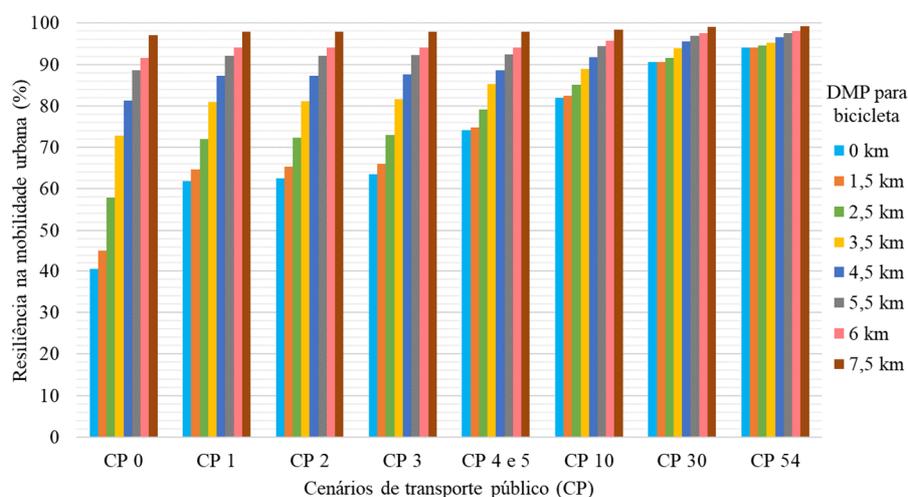
A partir de todas as combinações possíveis dos CA e CP elaborados, foram determinados os 550

cenários resultantes (C), indicados na última coluna da Tabela 7. Ao avaliar cada cenário resultante, as viagens foram segmentadas em *persistentes*, *excepcionais*, *adaptáveis* e *transformáveis*, como descrito no item 3.4, e a resiliência na mobilidade urbana, considerada como a porcentagem de viagens correspondentes às três primeiras categorias citadas em relação ao total de viagens, foi calculada.

**Tabela 7:** Distâncias Máximas Possíveis (DMP) consideradas, cenários de modos ativos (CA), de funcionamento de transporte público (CP) e resultantes (C)

DMP (km)					DMP (km)				
A pé	Bicicleta	CA	CP	C	A pé	Bicicleta	CA	CP	C
0	0	1	0	1-0	2	5,5	6	0	6-0
			1	1-1				1	6-1
			2	1-2				2	6-2
			...	...				...	...
			54	1-54				54	6-54
1,5	1,5	2	0	2-0	2,5	6	7	0	7-0
			...	...				...	...
			54	2-54				54	7-54
1,5	2,5	3	0	3-0	3,5	7,5	8	0	8-0
			...	...				...	...
			54	3-54				54	8-54
1,5	3,5	4	0	4-0	4	11	9	0	9-0
			...	...				...	...
			54	4-54				54	9-54
1,5	4,5	5	0	5-0	4	12,5	10	0	10-0
			...	...				...	...
			54	5-54				54	10-54

Comparando diferentes cenários de DMP, o valor da resiliência só é alterado com a mudança da DMP para bicicleta, pois a variação desse parâmetro para o modo a pé só causa a migração de viagens entre as categorias *persistentes* e *excepcionais*, ambas resilientes (Martins e Rodrigues da Silva, 2018). Assim, a partir dos resultados obtidos, foi elaborado um gráfico com variação da resiliência em função da DMP para bicicleta (Figura 3), considerando diferentes cenários de funcionamento de transporte público (CP 0, 1, 2, 3, 4, 5, 10, 20, 30 e 54). O número do "CP" representa o número de linhas de ônibus em operação no cenário considerado.



**Figura 3.** Variação da resiliência para diferentes Distâncias Máximas Possíveis (DMP) para bicicleta e cenários de funcionamento de transporte público (CP) - São Carlos/SP

O cenário mais pessimista avaliado, C 1-0 (DMP a pé e para bicicleta iguais a 0 km e nenhuma linha de ônibus ativa, CP 0), apresentou resiliência de 40,4%, que é considerado nível médio segundo Martins e Rodrigues da Silva (2018). Para as mesmas condições de DMP para os modos ativos (0 km), porém considerando apenas 1 linha de ônibus em funcionamento (CP 1), se alcança um nível de resiliência alto (61,9%). Apenas a inserção do transporte público, em mínimo funcionamento (uma linha - CP 1), já gerou um aumento considerável na resiliência: 21,4%, 19,5% e 14,3%, para DMP de bicicleta de 0 km, 1,5 km e 2,5 km, respectivamente. Além disso, nota-se que o nível de resiliência na mobilidade “muito alto” (maior que 80%) é alcançado, para qualquer cenário de modos ativos (qualquer DMP), a partir do CP 9, ou seja, com 9 linhas de ônibus, ou mais, em funcionamento (a Figura 3 apresenta os cenários, CP 10, 30 e 54, em que isso ocorre). Na situação sem a inserção do transporte público (CP 0), esse nível só é alcançado nos cenários com DMP de 4,5 km ou maiores (para bicicleta).

Ao fixar a análise em um valor de DMP notou-se que, quanto maior o número de linhas consideradas em operação, maior é o valor para resiliência encontrado, como esperado. Por exemplo, no caso da DMP para bicicleta de 2,5 km: com nenhuma linha ativa foi encontrada resiliência nível médio (57,8%); considerando 1 linha em funcionamento, nível alto (72,1%); e com 30 linhas, nível muito alto (91,6%). Ademais, quanto maior a distância máxima admitida, menor é a variação da resiliência com a inserção do transporte público e com o acréscimo de linhas. Para a DMP de 5,5 km para bicicleta alguns dos resultados de resiliência obtidos foram: 88,7%, 92,1% e 96,9%, para 0, 1 e 30 linhas ativas, respectivamente. Em comparação com o exemplo de DMP de 2,5 km anteriormente citado, é visível que a inserção da primeira linha de ônibus gerou menor variação na resiliência (3,4% para DMP de 5,5 km e 14,3% para DMP de 2,5 km). Da mesma forma, ao considerar 30 linhas ativas, em comparação com o CP 0, a variação foi de 8,2% (ou 96,9% - 88,7%) e 33,8% (ou 91,6% - 57,8%), para as distâncias de 5,5 km e 2,5 km, respectivamente.

Os resultados encontrados para os CP 4 e 5 apresentaram os mesmos valores, considerando todas as DMP avaliadas. Ademais, ao analisar os CP 1, 2 e 3, nota-se que os acréscimos das segunda e terceira linhas de ônibus não geraram ganho expressivo na resiliência para nenhum valor de DMP para bicicleta. Nesses casos, para maiores distâncias, o ganho chegou a ser nulo. Esse comportamento foi observado em outras comparações entre diferentes CP, mostrando que a análise permite identificar as linhas que, devido aos seus itinerários, não agregam novos trechos de atendimento em determinados cenários.

## 5. CONCLUSÕES

O estudo teve como objetivo inserir o transporte público em uma estratégia de avaliação da resiliência na mobilidade urbana. Foi considerada a situação hipotética de que as viagens poderiam ocorrer apenas pelos modos a pé, bicicleta ou através do transporte público, que estaria limitado em virtude de uma oferta restrita de combustível. O método proposto é aplicado a partir de dados de viagens obtidos por uma Pesquisa Origem e Destino e dos itinerários do serviço de transporte público da região a ser avaliada. Para o estudo de caso realizado na cidade de São Carlos, no estado de São Paulo, 10 diferentes cenários de modos ativos (CA) com diferentes Distâncias Máximas Possíveis (DMP) para os modos a pé e bicicleta foram estabelecidos e, para cada CA, foram aplicados 55 cenários de transporte público (CP), totalizando 550 diferentes situações avaliadas. Em cada circunstância analisada, as viagens foram categorizadas em

*persistentes, excepcionais, adaptáveis e transformáveis*, o que possibilitou a determinação da resiliência.

A partir dos resultados obtidos foi possível concluir que, em comparação com os cenários de restrição total aos modos motorizados, a inserção do transporte público, em mínimo funcionamento, proporcionou um ganho considerável de resiliência na mobilidade urbana para os cenários com menores valores de DMP para bicicleta. Ademais, considerando 9 linhas de ônibus, ou mais, em funcionamento, se obteve o nível de resiliência “muito alto” (maior que 80%) independente da DMP admitida, o que só foi alcançado nos cenários com DMP de 4,5 km ou maiores (para bicicleta) quando o transporte público não era considerado.

Os resultados também comprovaram que quanto maior o número de linhas consideradas em operação, ou seja, quanto maior a oferta de combustível disponível considerada, maior o ganho no valor para resiliência encontrado. Na DMP para bicicleta de 2,5 km, ao considerar 1 linha de ônibus em funcionamento se obteve nível alto de resiliência. No caso com a mesma DMP e 30 linhas, por exemplo, encontrou-se nível muito alto de resiliência. Ao relacionar a resiliência e a DMP para bicicleta, notou-se que quanto maior a distância máxima admitida para o modo bicicleta e, como consequência, maior a distância admitida aos modos ativos de transporte, menor é o aumento da resiliência com a inserção do transporte público. Tal observação é compreensível, pois quanto maiores as distâncias associadas aos modos ativos, mais viagens devem ser realizadas por esses modos e menor é a demanda por transporte público para atender às demais viagens (viagens mais longas).

É interessante ressaltar também que o acréscimo de algumas linhas gerou pouco ou nenhum ganho no valor da resiliência na mobilidade urbana em determinados cenários, o que revela que seu acréscimo não provoca um aumento no número de trechos origem-destino atendidos. Essa observação possibilita identificar tais linhas e reorganizar a ordem de prioridade encontrada durante a aplicação do método proposto, não colocando em operação linhas que não agreguem ganhos, no caso da situação de risco estudada. Além disso, a identificação dessas linhas aponta, para o gestor do sistema, a necessidade de uma reavaliação das linhas e itinerários operantes, na qual pode ser identificada uma possibilidade de melhoria.

Esta pesquisa apresenta a conclusão de mais uma etapa de um projeto de pesquisa que tem o objetivo de desenvolver uma metodologia para avaliar a resiliência da mobilidade urbana diante de diversas perturbações. Assim, a estratégia proposta apresenta algumas limitações: não considera aspectos dinâmicos dos sistemas de transportes, nos quais a migração de usuários causa alterações no custo e na relação oferta-demanda, bem como a perspectiva do usuário em relação aos efeitos econômicos decorrentes da crise e as particularidades individuais não são inseridas nesta abordagem. A demanda reprimida pelas limitações de acessibilidade do sistema, que permanece existente durante a crise, também não é estudada. Por isso, propõe-se que estudos futuros incorporem essas questões para que a metodologia possa ser aprimorada. Além destas, a análise da resiliência por zona de tráfego, identificando as regiões mais vulneráveis, pode fornecer informações mais precisas para auxiliar no planejamento e na elaboração de estratégias para redução de impactos na mobilidade urbana.

#### **AGRADECIMENTOS**

Os autores agradecem ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico), à FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo), à CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) e à Universidade de São Paulo, pelo apoio para a realização da pesquisa.

## REFERÊNCIAS

- Beheshtian, A.; K. Donaghy; H. Gao; S. Safaie e R. Geddes (2018) Impacts and Implications of Climatic Extremes for Resilience Planning of Transportation Energy: A Case Study of New York City. *Journal of Cleaner Production*, v. 174, p. 1299-1313. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.11.039.
- Berche, B.; C. Von Ferber; T. Holovatch e Y. Holovatch (2009) Resilience of Public Transport Networks Against Attacks. *European Physical Journal B*, v. 71, n. 1, p. 125-137. DOI: 10.1140/epjb/e2009-00291-3.
- Berdica, K. (2002) An Introduction to Road Vulnerability: What Has Been Done, Is Done and Should Be Done. *Transport Policy*, v. 9, n. 2, p. 117-127. DOI: 10.1016/S0967-070X(02)00011-2.
- BP (2018) BP Energy Outlook 2018. Disponível em: <<https://www.bp.com/content/dam/bp/en/corporate/pdf/energy-economics/energy-outlook/bp-energy-outlook-2018.pdf>>. Acesso em: 28 nov. 2018.
- Chan, R. e J. L. Schofer (2016) Measuring Transportation System Resilience: Response of Rail Transit to Weather Disruptions. *Natural Hazards Review*, v. 17, n. 1. DOI: 10.1061/(ASCE)NH.1527-6996.0000200.
- Cox, A.; F. Prager e A. Rose (2011) Transportation Security and the Role of Resilience: A Foundation for Operational Metrics. *Transport Policy*, v. 18, n. 2, p. 307-317. DOI: 10.1016/j.tranpol.2010.09.004.
- Da Silva, B. L.; T.A. Sarmiento; V. E. da S. Santos e F. B. R. Tavares (2019) Crise Petrolífera e o Descaso Ferroviário: Da Dependência ao Colapso. *Revista da Universidade Vale do Rio Verde*, v. 17, n. 1, p. 1-10. DOI: 10.5892/ruvrd.v17i1.5063.
- D’Lima, M. e F. Medda (2015) A New Measure of Resilience: An Application to the London Underground. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, v. 81, p. 35-46. DOI: 10.1016/j.tra.2015.05.017.
- Fernandes, V. A.; R. Rothfuss; V. Hochschild; W. R. da Silva e M. P. de S. Santos (2017) Resiliência da Mobilidade Urbana: Uma Proposta Conceitual e de Sistematização. *Transportes*, v. 25, n. 4, p. 147-160. DOI: 10.14295/transportes.v25i4.1079.
- Folke, C.; S. R. Carpenter; B. Walker; M. Scheffer; T. Chapin e J. Rockström (2010) Resilience Thinking: Integrating Resilience, Adaptability and Transformability. *Ecology and Society*, v. 15, n. 4. Disponível em: <<http://www.ecologyandsociety.org/vol15/iss4/art20>>. Acesso em: 22 mar. 2019.
- Gaitanidou, E.; M. Tsamib e E. Bekiaris (2017) A Review of Resilience Management Application Tools in the Transport Sector. *Transportation Research Procedia*, v. 24, p. 235-240. DOI: 10.1016/j.trpro.2017.05.113.
- Holling, C. S. (1973) Resilience and Stability of Ecological Systems. *Annual Review of Ecology and Systematics*, v. 4, p. 1-23. DOI: 10.1146/annurev.es.04.110173.000245.
- Holling, C. S. (1996) Engineering Resilience versus Ecological Resilience. *Engineering within Ecological Constraints*, n. 1996, p. 31-44. ISBN: 0-309-59647-5.
- Jin, J. G.; L. C. Tang; L. Sun e D. H. Lee (2014) Enhancing Metro Network Resilience Via Localized Integration with Bus Services. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, v. 63, p. 17-30. DOI: 10.1016/j.tre.2014.01.002.
- Krumdieck, S.; S. Page e A. Dantas (2010) Urban Form and Long-term Fuel Supply Decline: A Method to Investigate the Peak Oil Risks to Essential Activities. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, v. 44, n. 5, p. 306-322. DOI: 10.1016/j.tra.2010.02.002.
- Leobons, C. M.; V. B. G. Campos e R. A. de M. Bandeira (2019) Assessing Urban Transportation Systems Resilience: A Proposal of Indicators. *Transportation Research Procedia*, v. 37, p. 322-329. DOI: 10.1016/j.trpro.2018.12.199.
- Martins, M. C. M. e A. N. Rodrigues da Silva (2018) Uma Estratégia para Avaliação da Resiliência na Mobilidade Urbana. *Transportes*, v. 26, n. 3, p. 75-86. DOI: 10.14295/transportes.v26i3.1625.
- Martins, M. C. M. e A. N. Rodrigues da Silva (2019) Estudo Hipotético para Avaliação Preliminar da Resiliência na Mobilidade Urbana. *Ambiente Construído*, v. 19, n. 1, p. 209-219. DOI: 10.1590/s1678-86212019000100302.
- Martins, M. C. M.; A. N. Rodrigues da Silva e N. Pinto (2019) An Indicator-based Methodology for Assessing Resilience in Urban Mobility. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, v. 77, p. 352-363. DOI: 10.1016/j.trd.2019.01.004.
- Mehmood, A. (2016) Of Resilient Places: Planning for Urban Resilience. *European Planning Studies*, v. 24, n. 2, p. 407-419. DOI: 10.1080/09654313.2015.1082980.
- Reggiani, A.; P. Nijkamp e D. Lanzi (2015) Transport Resilience and Vulnerability: The Role of Connectivity. *Transportation Research Part A*, v. 81, p. 4-15. DOI: 10.1016/j.tra.2014.12.012.
- Rodrigues da Silva, A. N. (2008) *Elaboração de um Banco de Dados de Viagem para Auxílio ao Desenvolvimento de Pesquisas na Área de Planejamento dos Transportes*. Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, Relatório FAPESP, Processo No 04/15843-4.
- Seeliger, L. e I. Turok (2013) Towards Sustainable Cities: Extending Resilience with Insights from Vulnerability and Transition Theory. *Sustainability (Switzerland)*, v. 5, n. 5, p. 2108-2128. DOI: 10.3390/su5052108.
- Ta, C.; A. V. Goodchild e K. Pitera (2009) Structuring a Definition of Resilience for the Freight Transportation System. *Transportation Research Record*, v. 2097, n. 1, p. 19-25. DOI: 10.3141/2097-03.
- Vale, D. (2020) Effective Accessibility: Using Effective Speed to Measure Accessibility By Cost. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, v. 80, p. e102263. DOI: 10.1016/j.trd.2020.102263.
- Walker, B.; C. S. Holling; S. R. Carpenter e A. Kinzig (2004) Resilience, Adaptability and Transformability in Social-ecological Systems. *Ecology and Society*, v. 9, n. 2. Disponível em: <<http://www.ecologyandsociety.org/vol9/iss2/art5/>>. Acesso em: 22 mar. 2019.
- Zhao, P. (2010) Sustainable Urban Expansion and Transportation in a Growing Megacity: Consequences of Urban Sprawl for Mobility on the Urban Fringe of Beijing. *Habitat International*, v. 34, n. 2, p. 236-243. DOI: 10.1016/j.habitat.2009.09.008.