



UMA ANÁLISE EXPLORATÓRIA DA INFLUÊNCIA MÚTUA ENTRE SUSTENTABILIDADE E RESILIÊNCIA DA MOBILIDADE URBANA

Camila Mayumi Nakata Osaki
Antônio Néilson Rodrigues da Silva
Universidade de São Paulo
Escola de Engenharia de São Carlos

RESUMO

A mobilidade desempenha um papel central em sistemas urbanos sustentáveis e resilientes. Com o objetivo de realizar uma análise exploratória da influência mútua entre sustentabilidade e resiliência da mobilidade urbana, este estudo identificou, por meio de uma revisão da literatura, 212 indicadores de resiliência e verificou sua relação com os temas e domínios que integram o Índice de Mobilidade Urbana Sustentável (IMUS). Constatou-se que todos os domínios do IMUS tiveram correspondência com pelo menos um indicador de resiliência e que todos os indicadores de resiliência analisados podiam ser associados a um ou mais temas do IMUS. Por outro lado, 18 dos 37 temas do IMUS não foram associados aos indicadores concebidos para avaliar a resiliência da mobilidade identificados. Ainda que tenha sido observado que os indicadores de resiliência guardam relação com aspectos que caracterizam a mobilidade sustentável, o caráter exploratório da análise deixa abertas inúmeras outras frentes para investigação.

ABSTRACT

Mobility plays a central role in sustainable and resilient urban systems. With the objective of carrying out an exploratory analysis of the mutual influence between sustainability and resilience of urban mobility, this study identified, through a literature review, 212 resilience indicators and verified their relationship with the themes and domains that make up the Index of Sustainable Urban Mobility (I_SUM). We observed that all I_SUM domains matched at least one resilience indicator and that all analyzed resilience indicators could be associated with one or more I_SUM themes. On the other hand, 18 of the 37 themes of I_SUM were not associated with the indicators designed to assess mobility resilience identified in the literature. Although it has been observed that resilience indicators are related to aspects that characterize sustainable mobility, the exploratory nature of the analysis leaves open countless other fronts for investigation.

1. INTRODUÇÃO

Mobilidade é um componente-chave de qualquer sistema urbano, independentemente de sua escala ou estrutura, proporcionando não somente acessibilidade a pessoas, bens e serviços, mas também impactando no desempenho desses sistemas urbanos, tanto em termos socioeconômicos como ambientais. Entre outras características, a mobilidade urbana sustentável direciona o planejamento urbano para cidades mais compactas e densas, dado que maiores densidades urbanas representam por exemplo, em geral, um menor consumo de energia *per capita*. Além disso, preza pela maior integração entre o planejamento territorial e os sistemas de transporte, reduzindo impactos tanto ambientais, como socioeconômicos.

Já no âmbito da construção de cidades resilientes, os sistemas de transporte se destacam pelo fato de serem o contribuinte de crescimento mais rápido para as mudanças climáticas globais e os problemas de saúde urbana nas últimas décadas. Outra razão pela qual os sistemas de transporte são importantes para a sustentabilidade e resiliência é que possuem muito menos capacidade adaptativa do que outros sistemas urbanos (Zhao *et al.*, 2013). Se uma rede de transporte não é resiliente, o fornecimento de bens e serviços pode acabar sofrendo interrupção em caso de choques. Além disso, o tempo de recuperação será muito maior. Portanto, a resiliência da rede de transporte pode ser definida como: a manutenção do nível de serviço e maior rapidez na restauração após eventos de desastre, garantia que o sistema funcione sem falha significativa sob circunstâncias inesperadas e capacidade de absorver a interrupção para



reduzir o possível impacto e manter a mobilidade (Litman, 2006; Ta *et al.*, 2009).

Embora os conceitos de sustentabilidade e resiliência estejam atualmente relativamente consolidados em relação à mobilidade urbana (ainda que possam ser objeto de discussões e até mesmo de modificações), um aspecto que ainda não foi devidamente explorado é a sua influência mútua. Neste sentido, entre as questões que precisam ser respondidas estão: será a tão almejada mobilidade urbana sustentável automaticamente resiliente? Ou ainda, sempre que se assegura a resiliência da mobilidade, isto se dá de forma sustentável? A capacidade de responder a estas questões pressupõe, no entanto, que é possível avaliar tanto a sustentabilidade como a resiliência da mobilidade urbana.

As pesquisas centradas na avaliação de resiliência de sistemas de transporte e mobilidade visam criar soluções abrangentes utilizando parâmetros qualitativos e quantitativos mensuráveis. Uma estratégia para isso é criar um sistema de indicadores. Os indicadores permitem que o usuário faça uma previsão do futuro desenvolvimento ou possíveis consequências de eventos disruptivos em alguma extensão. Por essa razão, eles se tornam uma ferramenta ideal para indicar a falha de elementos críticos da infraestrutura de transporte (Splichalova e Flynnova, 2021). Já os índices são conjuntos relativamente simples de métricas numéricas ou métricas categóricas que podem ser usadas para comparar o status de resiliência relativa de um sistema baseado em um local ao longo do tempo ou em relação a outro sistema (Carvalhoes *et al.*, 2021).

Para se estudar a mobilidade urbana sustentável, também é comum o uso de indicadores e índices. O IMUS (Índice de Mobilidade Urbana Sustentável), por exemplo, é uma ferramenta de avaliação que pode ser usada para revelar as condições atuais de mobilidade urbana ou antecipar os impactos de medidas e estratégias visando a mobilidade sustentável (Costa, 2008). O índice é formado por nove domínios que abrangem três dimensões (social, econômico e ambiental) e trinta e sete temas, os quais são subdivididos em oitenta e sete indicadores, tendo sido desenvolvido em várias etapas (Rodrigues da Silva *et al.*, 2010). Ele foi projetado para abranger tópicos de transporte tradicionais e questões relacionadas ao novo paradigma de mobilidade sustentável. Em uma das primeiras aplicações do índice, na cidade de Curitiba, Miranda e Rodrigues da Silva (2012) verificaram características muito positivas da cidade em relação às políticas de mobilidade sustentável, mas algumas deficiências quanto aos modos de transporte não motorizados.

Este estudo parte da premissa que indicadores e índices já desenvolvidos seriam capazes de permitir um diagnóstico razoável das condições da sustentabilidade e da resiliência da mobilidade, fornecendo assim elementos que podem ajudar a responder às questões acima mencionadas. Desta maneira, tem por objetivo realizar uma análise exploratória de influência mútua destes elementos da mobilidade urbana. Isto será feito a partir do cruzamento de indicadores de resiliência, identificados por meio de uma revisão da literatura, com os temas que estruturam o Índice de Mobilidade Urbana Sustentável - IMUS (Costa, 2008). Para este fim, o documento foi assim organizado: o capítulo 2 aborda os materiais e métodos, seguido das discussões dos resultados (capítulo 3) e considerações finais (capítulo 4).

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Os procedimentos metodológicos para analisar a influência mútua entre sustentabilidade e



resiliência da mobilidade urbana foram divididos nas etapas de: 1. seleção de artigos em base de dados abrangente e reconhecida na área; 2. escolha das ferramentas; 3. definição de critérios de elegibilidade; 4. análise de conteúdo e de agrupamentos e 5. classificação dos indicadores de resiliência com base na estrutura do Índice de Mobilidade Urbana Sustentável (Costa, 2008).

2.1. Seleção de artigos na base de dados

A base de dados selecionada para a análise exploratória proposta foi a *Science Direct*. Para o procedimento de busca no banco de dados de artigos relacionados ao tema de interesse foram utilizadas palavras-chave gerais (“*indicators*” e “*resilience*”) combinadas com palavras-chave específicas (“*mobility*”, “*transport*” e “*socio-ecological systems*”) resultando nas seguintes combinações para a busca: 1. *indicators AND resilience AND mobility*; 2. *indicators AND resilience AND transport*; e 3. *indicators AND resilience AND socio-ecological systems*. Essas combinações foram utilizadas na ferramenta de busca avançada do *Science Direct* para os campos de “título”, “resumo” e “palavras-chave”.

2.2. Escolha das ferramentas

Para a importação de alguns dados dos registros (autores, ano, título e fonte) foi escolhida a ferramenta *Mendeley Web Importer*, que é instalada como uma extensão do *Google Chrome* e facilita a extração dos dados diretamente da base de dados *Science Direct*. Dessa forma, esses dados são carregados de forma automatizada para o programa *Mendeley Reference Manager* (<https://www.mendeley.com/reference-management/reference-manager>), o qual, por sua vez, organiza esses registros em coleções e grupos, facilitando a visualização das informações específicas de cada artigo e possibilitando a leitura do trabalho completo. A partir do programa *Mendeley Reference Manager*, os registros selecionados foram exportados como arquivo *.xml*, o qual foi importado para uma planilha eletrônica. Através da análise da tabela de registros foi utilizada a ferramenta de remoção de dados duplicados (pelo título).

2.3. Definição de critérios de elegibilidade

Após a seleção dos artigos para leitura, foi realizada uma classificação de elegibilidade. Essa classificação deve ser feita para descartar alguns artigos de menor importância para a revisão sistemática de literatura, como, por exemplo, artigos relativos a projetos em andamento, artigos de estudo duplicado (mesmos autores e mesmo estudo em revistas diferentes) e aqueles que apresentam um foco de interesse muito diferente do que é procurado nessa revisão, como por exemplo: vulnerabilidade ecológica (rios, mares e oceanos), avaliação de materiais específicos de construção, vulnerabilidade de animais aquáticos, dentre outros.

2.4. Análise de conteúdo e de agrupamentos

Após a exclusão de artigos com base nos critérios de elegibilidade, os artigos selecionados foram todos lidos na íntegra, em busca de características comuns e variáveis de interesse na pesquisa, realizando-se uma análise de conteúdo por agrupamentos.

2.5. Classificação dos indicadores de resiliência

Baseando-se no Índice de Mobilidade Urbana Sustentável (IMUS), elaborado por Costa (2008), os domínios e temas do índice (Tabela 1) foram confrontados com os índices e indicadores de resiliência de mobilidade encontrados na revisão da literatura.



Tabela 1: Tabela da estrutura do Índice de Mobilidade Urbana Sustentável - IMUS (adaptado de Costa, 2008).

Domínio	Temas
Acessibilidade	Acessibilidade aos sistemas de transporte Acessibilidade universal Barreiras físicas Legislação para pessoas com necessidades especiais
Aspectos ambientais	Controle dos impactos no meio ambiente Recursos naturais
Aspectos sociais	Apoio ao cidadão Inclusão social Educação e cidadania Participação popular Qualidade de vida
Aspectos políticos	Integração de ações políticas Captação e gerenciamento de recursos Política de mobilidade urbana
Infraestrutura de transporte	Provisão e manutenção de infraestrutura de transportes Distribuição da infraestrutura de transporte
Modos não motorizados	Transporte cicloviário Deslocamentos a pé Redução de viagens
Planejamento integrado	Capacitação de gestores Áreas centrais e de interesse histórico Integração regional Transparência do processo de planejamento Planejamento e controle do uso e ocupação do solo Planejamento estratégico e integrado Planejamento da infraestrutura e equipamentos urbanos Plano Diretor e legislação urbanística
Tráfego e circulação urbana	Acidentes de trânsito Educação para o trânsito Fluidez e circulação Operação e fiscalização de trânsito
Sistemas de transporte urbano	Transporte individual Disponibilidade e qualidade do transporte público Diversificação modal Regulação e fiscalização do transporte público Integração de transporte público Política tarifária

3. RESULTADOS

A apresentação dos resultados será feita em três etapas. A primeira delas contém um resumo da seleção de artigos na base de dados consultada, considerando a escolha das ferramentas e os critérios de elegibilidade mencionados na seção anterior. Na sequência, foi realizada a análise de conteúdo e de agrupamentos, o que facilitou a terceira etapa, de classificação dos indicadores de resiliência com base na estrutura do Índice de Mobilidade Urbana Sustentável.

3.1. Resultados gerais da seleção dos artigos

Foram encontrados, na busca por “*Title, abstract, keywords*” na base *Science Direct*, 81 registros assim distribuídos:

- *indicators AND resilience AND mobility* - 18 registros
- *indicators AND resilience AND transport* - 50 registros
- *indicators AND resilience AND socio-ecological systems* - 13 registros



Do total de artigos selecionados, havia 6 repetições, resultando em 75 selecionados para a primeira leitura. Após a leitura considerando os critérios de elegibilidade, foram selecionados 23 artigos para a análise de conteúdo e de agrupamentos. Esses 23 artigos foram publicados entre os anos de 2012 e 2021, sendo que a incidência maior foi no ano de 2021 (com 7 artigos), seguido do ano de 2017 (com 4 artigos) e dos anos de 2018, 2019 e 2020 (com 3 artigos cada). Isso parece demonstrar uma maior preocupação com a quantificação da resiliência da mobilidade a partir de 2017. Dentre os artigos analisados, vale mencionar os periódicos que apareceram em número maior que três publicações, sendo eles: *Science of the Total Environment* (4), *Transportation Research Procedia* (4) e *Transportation Research Part A* (3).

3.2. Análise de conteúdo e de agrupamentos

Dentre os 23 artigos analisados, um número maior (18 artigos - Grupo 1) representa artigos de estudo de caso e uma pequena parcela são artigos de revisão de literatura (5 artigos - Grupo 2), os quais foram analisados separadamente, nas subseções a seguir. Como o foco da busca eram os indicadores, cabe observar que alguns estudos adotam indicadores com base em alguma categorização (exemplo dos 4Rs - Robustez, Redundância, Recursos e Rapidez - de Leobons *et al.*, 2019). Já outros estudos adotaram um índice, como o *Disaster resilience indices - DRI* em Carvalho *et al.* (2021), o *Accessibility Index* em Borghetti e Malavasi (2016), e o *Empirical Evidence Resilience Index (EERI)* em Feldmeyer *et al.* (2021).

3.2.1. Grupo 1: artigos de estudo de caso

A análise geral dos artigos de “estudo de caso” é apresentada na Tabela 2, que contém um resumo do tipo de cenário, do número de ameaças e diante de quais ameaças foram utilizados os indicadores de resiliência. Os cenários classificados como estático e dinâmico dizem respeito a dados de um único período temporal/único cenário e para mais de um período temporal/mais de um cenário (de dados reais ou simulados), respectivamente. Do total analisado, 6 artigos desenvolvem o estudo em cenário estático e 12 em cenário dinâmico.

A resiliência também é tratada diante de um único tipo de ameaça em alguns artigos (15) ou múltiplas ameaças (3). Embora o número de estudos que tratam da resiliência de mobilidade diante de um único tipo de ameaça seja bem maior, os estudos que abordam a resiliência diante de múltiplas ameaças podem gerar indicadores mais abrangentes, considerando que o sistema de mobilidade depende de vários fatores e pode sofrer impactos advindos de mais de um setor/esfera simultaneamente. Dessa forma, uma abordagem que contemple múltiplas ameaças pode ter maior êxito na previsão e agilidade na recuperação da mobilidade.

Dos tipos de ameaças mencionados nos estudos vê-se, principalmente, uma grande preocupação (4 artigos) nas falhas e condições de emergências de estações ferroviárias (Borghetti e Malavasi, 2016; Carboni e Deflorio, 2020; Chan *et al.*, 2021; e Wang *et al.*, 2017), no pico do petróleo impactando em choques nos preços de combustíveis (4 artigos: Jewell *et al.*, 2014; Leung *et al.*, 2018; Mattioli *et al.*, 2018; e Watcharasukarn *et al.*, 2012), inundações (3 artigos: Arrighi *et al.*, 2019; Feldmeyer *et al.*, 2021; e Vajjarapu e Verma, 2021) e impactos decorrentes da poluição do ar gerada pelo setor de transportes (2 artigos: Cai *et al.*, 2020; e Cariolet *et al.*, 2018).

Alguns estudos utilizam a abordagem de simulação (*software Aimsun*® em Carboni e Deflorio,



2020) para investigar cenários de condições de equilíbrio, de interrupção/perturbação e de recuperação. Outros estudos utilizam, como parte do método, os questionários (Mattioli *et al.*, 2018; Olowosegun *et al.*, 2021; Loo e Leung, 2017; Watcharasukarn *et al.*, 2012), modelos de avaliação multicritério (Olowosegun *et al.*, 2021) e jogo de computador (*TACA Sim* em Watcharasukarn *et al.*, 2012).

Tabela 2: Análise de conteúdo para o Grupo 1 - artigos de estudo de caso (em que: *Est.* significa *estático*, *Din.* significa *dinâmico*, *Uni.* significa *única* e *Mul.* significa *múltiplas*)

Publicação	Cenário		Nº Ameaças		Ameaças consideradas
	Est.	Din.	Uni.	Mul.	
Arrighi <i>et al.</i> , 2019		✓	✓		Inundações
Borghetti e Malavasi, 2016		✓		✓	Condições de emergência para acessibilidade de linha férrea utilizando o sistema viário
Cai <i>et al.</i> , 2020	✓		✓		Impacto das emissões de carbono em áreas urbanas
Carboni e Deflorio, 2020		✓	✓		Falha de funcionamento de estações ferroviárias
Cariolet <i>et al.</i> , 2018	✓		✓		Poluição do ar relacionada ao tráfego
Chan <i>et al.</i> , 2021		✓	✓		Falha de estação
Fonseca <i>et al.</i> , 2017	✓		✓		Efeito negativo de sistemas de energia sobre os sistemas de transporte
Feldmeyer <i>et al.</i> , 2021	✓			✓	Tempestades, secas, inundações e terremotos
Jewell <i>et al.</i> , 2014		✓	✓		Riscos associados ao fornecimento de energia
Leung <i>et al.</i> , 2018	✓		✓		Vulnerabilidade do petróleo
Loo e Leung, 2017		✓	✓		Movimento político de ocupação central
Martins <i>et al.</i> , 2019		✓	✓		Indisponibilidade dos modos motorizados
Mattioli <i>et al.</i> , 2018		✓	✓		Aumento dos preços dos combustíveis
Olowosegun <i>et al.</i> , 2021	✓		✓		Baixa acessibilidade do serviço de transporte informal
Ramírez-Buitrago <i>et al.</i> , 2021		✓	✓		Pandemia covid-19
Vajjarapu e Verma, 2021		✓	✓		Inundações
Wang <i>et al.</i> , 2017		✓		✓	Falha ou ataques direcionados a redes metropolitanas
Watcharasukarn <i>et al.</i> , 2012		✓	✓		Pico do petróleo (choques de preços de combustível)

3.2.2. Grupo 2: artigos de revisão de literatura

A Tabela 3 apresenta as ameaças consideradas e domínios do IMUS (conforme a Tabela 1) relacionados aos indicadores dos cinco artigos de revisão de literatura. Achillopoulou *et al.* (2020) enfocaram a resiliência da infraestrutura de transporte, não considerando os ativos leves, como políticas, regulamentos e procedimentos. Consideram perigos ambientais e induzidos pelo homem (exemplos: incêndios, inundações e aumento do nível do mar pelas alterações climáticas) e avaliam a resiliência com base em diferentes indicadores de desempenho, que são: a capacidade de componente estrutural e capacidade ou funcionalidade para os ativos e redes. Splichalova e Flynnova (2021) adotaram uma abordagem também mais centrada na falha de elementos críticos da infraestrutura de transporte rodoviário, fazendo uma reflexão sobre a descrição dos indicadores e seus usos (na engenharia de segurança, na proteção de infraestrutura crítica e sua resiliência, e na infraestrutura de transporte) e citam alguns índices, indicadores e métodos para avaliação da resiliência da infraestrutura.



Carvalhoes *et al.* (2021) revisaram a literatura de Sistemas Adaptativos Complexos (CAS) e Sistemas Socioecológicos (SES) para identificar princípios predominantes que podem ser usados para analisar conceitualmente escolhas típicas para indicadores de resiliência e variáveis. Leobons *et al.* (2019) propuseram um quadro de indicadores de resiliência, abordando os domínios ecológico, comunitário e econômico da resiliência no campo do transporte. Xu e Xue (2017), por outro lado, adotaram análise de conteúdo, investigação de especialistas e o método AHP (*Analytic Hierarchy Process*) para identificação, análise e avaliação da contribuição dos indicadores-chave, fornecendo um sistema de indicadores de resiliência para os espaços públicos urbanos complexos, que conta com 46 indicadores, 13 categorias e 6 dimensões. Dessa forma, nota-se que o sistema de indicadores apresentado por Xu e Xue (2017) consegue abranger um maior número de domínios (4) de sustentabilidade em relação aos demais artigos analisados neste grupo.

Tabela 3: Análise de conteúdo para o Grupo 2 - artigos de revisão de literatura

Publicação	Ameaças consideradas	Domínios do IMUS* relacionados aos indicadores citados
Achillopoulou <i>et al.</i> , 2020	Incêndios, inundações e aumento do nível do mar pelas alterações climáticas.	Infraestrutura de transportes.
Carvalhoes <i>et al.</i> , 2021	Mudanças climáticas, evolução sociotecnológica e um futuro não estacionário devido a eventos surpresa.	Planejamento integrado.
Leobons <i>et al.</i> , 2019	Eventos esportivos, motins, inundações, deslizamentos de terra, engarrafamentos e acidentes.	Sistemas de transportes urbanos.
Splichalova e Flynnova, 2021	Falha de elementos críticos da infraestrutura de transporte terrestre.	Tráfego e circulação urbana.
Xu e Xue, 2017	Choque de eventos de risco.	Aspectos ambientais, Aspectos políticos, Infraestrutura de transportes, Planejamento integrado.

* IMUS - Índice de Mobilidade Urbana Sustentável (Costa, 2008) - o resumo dos Domínios pode ser encontrado na Tabela 1.

3.3. Análise da relação mobilidade urbana sustentável x indicadores de resiliência

Foram verificados nos artigos selecionados um total de 212 indicadores de resiliência, os quais foram distribuídos dentro dos temas e domínios do Índice de Mobilidade Urbana Sustentável (Tabela 4). ‘Sistemas de transportes urbanos’ foi o domínio de maior número de indicadores (38), seguido de ‘Infraestrutura de transportes’ (35), ‘Aspectos políticos’ (34), ‘Aspectos ambientais’ (31), ‘Modos não motorizados’ (25) e ‘Planejamento integrado’ (24). Os domínios com menor número de indicadores foram ‘Tráfego e circulação urbana’ (12), ‘Acessibilidade’ (10) e ‘Aspectos sociais’ (3).

A partir da síntese constante na Tabela 4, é possível constatar que todos os domínios do IMUS tiveram correspondência com indicadores de resiliência e que, dos trinta e sete temas, dezenove (os que possuem grifo cinza na Tabela 1) tiveram correspondência com os indicadores de resiliência de mobilidade urbana mencionados na revisão da literatura. Isso fornece indícios de grande tendência de os indicadores já existentes de resiliência da mobilidade corresponderem a temas comuns da mobilidade sustentável. Entretanto, foram identificados dezoito temas de mobilidade sustentável que não foram associados aos indicadores voltados para a análise da resiliência da mobilidade.



Tabela 4: Classificação cruzada entre domínios e temas de mobilidade urbana sustentável e indicadores de resiliência de mobilidade urbana identificados na literatura

Índice de Mobilidade Urbana Sustentável (IMUS)		Resiliência da mobilidade urbana
Domínio	Temas	Índices (ou Categorias) e Indicadores
Acessibilidade	Acessibilidade aos sistemas de transportes	<p>- <i>Índice de acessibilidade</i>: presença de uma passagem de nível; indicador de uma estação/parada; presença e extensão de uma rede viária veicular; indicador para o uso permitido da terra; indicador da hora de chegada dos bombeiros (Borghetti e Malavasi, 2016).</p> <p>- <i>Sistema de indicadores de resiliência de CUPSs (espaço público urbano complexo) - dimensão 'Acessibilidade do tráfego'</i> - categoria 'condição do tráfego': número de modos de transporte integrados nos CUPSs, número de estradas conectadas aos CUPSs, localização dos CUPSs na cidade; categoria 'resgate de emergência': acessibilidade dos veículos de resgate, acessibilidade dos socorristas (Xu e Xue, 2017).</p>
Aspectos ambientais	Controle dos impactos no meio ambiente	<p>- Mapas de inundação, impacto de inundações para pedestres e veículos estacionados, vulnerabilidade dos pedestres e veículos às inundações, exposição à inundação (Arrighi <i>et al.</i>, 2019).</p> <p>- <i>Dados estatísticos</i>: estatísticas de energia, relatório de uso final de energia e emissões da aviação civil; <i>coeficientes específicos</i>: fatores de emissões de CO₂ (setores residencial, comercial, industrial e de transporte), eficiência de oxigenação e valores caloríficos líquidos; <i>dados espaciais</i>: limite de TPU (Unidade de Planejamento Terciário), volume de tráfego, rota de MTR - <i>Mass Transit Railway</i> (ferrovia de transporte de massa), balsa, 3D das construções, uso das construções (Cai <i>et al.</i>, 2020).</p> <p>- Capacidade de diminuir as emissões relacionadas ao tráfego, capacidade de diminuir as concentrações de poluição do ar, capacidade de diminuir a exposição à poluição do ar (Cariolet <i>et al.</i>, 2018).</p> <p>- Emissões de gases de efeito estufa por unidade de área associada à construção e operação de edificações e infraestrutura energética (CO_{2E}), energia primária por unidade de área utilizada para a produção e entrega de energia aos edifícios (PEN_E) (Fonseca <i>et al.</i>, 2017).</p> <p>- <i>Sistema de indicadores de resiliência de CUPSs (espaço público urbano complexo) - dimensão 'Ambiente natural'</i> - categoria 'Estatísticas de desastres naturais': <i>ranking</i> de frequência de vários desastres naturais da região dos CUPS e as perdas de CUPSs causadas pelos desastres naturais a cada ano; categoria 'As características próprias dos CUPSs com desastre natural': as seções do CUPS que são vulneráveis a serem danificadas, o desastre natural de maior frequência que acontece nos CUPSs, a preparação da resposta de emergência dos CUPSs para os desastres naturais e os planos especiais de emergência dos CUPSs estabelecidos para desastres naturais (Xu e Xue, 2017).</p>
	Recursos naturais	<p>- Margem mínima de reserva de energia e margem mínima de recurso potencial (Fonseca <i>et al.</i>, 2017).</p> <p>- Comércio de petróleo, comércio de carvão, comércio de hidrogênio, diversidade geográfica das exportações (de gás, de carvão e de hidrogênio), diversidade de eletricidade, diversidade de fornecimento total de energia primária (Jewell <i>et al.</i>, 2014).</p>
Aspectos sociais	Apoio ao cidadão	<p>- <i>Índice de Risco Empírico (EmRI)</i>: considera fatalidades e pessoas afetadas em situação de tempestades, seca, inundações e terremotos (Feldmeyer <i>et al.</i>, 2021).</p>
	Inclusão social	<p>- <i>Indicador de sensibilidade à vulnerabilidade do petróleo</i>: proporção de famílias com baixa renda (Leung <i>et al.</i>, 2018).</p>
Aspectos políticos	Integração de ações políticas	<p>- <i>Indicadores diante de movimento político de ocupação central</i>: respostas do governo ao nível do sistema, respostas pelos operadores de transporte público (ônibus, metrô e bonde) (Loo e Leung, 2017).</p> <p>- <i>Sistema de indicadores de resiliência de CUPSs (espaço público urbano complexo) - dimensão 'Governança do governo'</i> - categoria 'Cooperação de várias partes interessadas': número de departamentos de governança/gestão para os CUPS (os espaços públicos urbanos complexos), cooperação multissetorial proativa, cooperação eficaz com outras partes interessadas, número de mecanismos de cooperação proativa estabelecido entre os diferentes departamentos e os períodos de tempo em que os mecanismos gerais de cooperação foram desenvolvidos; categoria 'Plano de emergência': número de planos de emergência especial, período de tempo em que o plano geral de emergência foi estabelecido, frequência do exercício de emergência,</p>



		número de socorristas profissionais e reservas de suprimentos de resgate; <i>categoria 'Medidas de segurança diária'</i> : monitoramento abrangente de eventos de risco e medidas de avaliação de risco, planos de redução de risco, indicação de prevenção de eventos de risco, propaganda de prevenção de eventos de risco, número de rotas de fuga de emergência, número de policiais de segurança, categoria e número de equipamentos e instalações de segurança (Xu e Xue, 2017).
	Captação e gerenciamento de recursos	- Estresse econômico relacionado ao carro (CRES) (Mattioli <i>et al.</i> , 2018). - <i>Sistema de indicadores de resiliência de CUPSs (espaço público urbano complexo) - dimensão 'Desenvolvimento da economia'</i> - categoria <i>'apoio financeiro para CUPS'</i> : produto interno bruto (PIB), dotação financeira para a segurança dos CUPSs, reservas financeiras para o resgate de emergência após eventos de risco; categoria <i>'Suprimentos de resgate preparados'</i> : quantidade de suprimentos de resgate preparados, o grau e a categoria que os suprimentos de resgate podem ser usados para responder (Xu e Xue, 2017).
	Política de mobilidade urbana	- <i>Indicadores para Índice de Adaptabilidade Composto (CAI)</i> : veículo-quilômetros percorridos, horas por veículo percorridas, velocidade média do veículo, duração média da viagem, viagens canceladas devido às inundações urbanas (Vajjarapu e Verma, 2021).
Infraestrutura de transporte	Provisão e manutenção da infraestrutura de transportes	- <i>Indicadores chave de performance (KPI)</i> : fluxo de tráfego, tempo de retorno, atraso, fila máxima e consumo de combustível em ferrovias (Carboni e Deflorio, 2020). - <i>Indicadores de desempenho do Monitoramento de Integridade e Funcionalidade Estrutural (SHFM - Structural Health and Functionality Monitoring)</i> : deslocamento/desvios/deformações, aceleração, tensão, forças, carregamentos, temperatura, mudanças estruturais (por exemplo: geometria, rachaduras, vazios, delaminação, condições de contorno, erosão), corrosão, umidade/cloretos/poluição do ar/poluição da água/ventos/trovões, tráfego, acúmulo de neve/água/detrimentos (Achillopoulou <i>et al.</i> , 2020). - <i>Sistema de indicadores de resiliência de CUPSs (espaço público urbano complexo) - dimensão 'Estrutura física'</i> - categoria <i>'Estrutura de várias camadas'</i> : número de camadas de todo o CUPS, número de camadas de espaços subterrâneos, número de escadas conectadas e capacidade projetada de volume de tráfego de passageiros; categoria <i>'Multifuncional'</i> : número de funções de operação e correlação do multifuncional (Xu e Xue, 2017).
	Distribuição da infraestrutura de transportes	- Avaliação da diversidade de rotas, efeitos de resiliência de novas linhas e efeito distributivo de novas linhas de ferrovia de transporte de massa - MRT (Chan <i>et al.</i> , 2021). - <i>Indicadores de robustez relacionados à infraestrutura de redes metropolitanas</i> : indicador de robustez, condutância gráfica efetiva, confiabilidade, eficiência média, coeficiente de agrupamento, conectividade algébrica, grau médio, conectividade natural, diversidade de graus, coeficiente de malha (Wang <i>et al.</i> , 2017).
Modos não motorizados	Redução de viagens	- Distâncias máximas possíveis (DMP) de modos ativos de transporte (Martins <i>et al.</i> , 2019). - <i>Informações pessoais</i> : idade, sexo, situação profissional, situação familiar, renda pessoal, número de pessoas no domicílio, número de filhos na escola, idade e número de veículos no domicílio; <i>Indicação da capacidade adaptativa de deslocamento</i> : atividades para o dia, detalhes de cada viagem, hora de partida e chegada, origem, destino, modo e rota para cada trecho de viagem, padrões regulares de trabalho, rotinas escolares e hobbies, atividades, em que se envolveram nas últimas semanas, representativas de viagens aleatórias; <i>Captura de capacidade adaptativa de deslocamento</i> : os usuários pontuam sua dependência do carro, intensidade de combustível e risco (Watcharasukarn <i>et al.</i> , 2012).
Planejamento integrado	Capacitação de gestores	- <i>Índices de Resiliência de Desastres (DRI)</i> : sentimento de pertencimento da comunidade próxima das áreas urbanas, renda, abrigos, rotas de evacuação, superfícies impermeáveis, edifícios de vários tipos (emergência, governo, poder, pontos, comercial), recuperação prévia, gravidade do perigo, planos de mitigação, nível educacional, organizações cívicas/religiosas (Carvalhoes <i>et al.</i> , 2021).
	Planejamento e controle do uso e ocupação do solo	- <i>Indicadores de heterogeneidade espacial</i> : diversidade de uso do solo, diversidade de grupos-alvo, diversidade de usuários das edificações, diversidade de tipologias de construção, diversidade de intensidade de construção e diversidade de mobilidade (Fonseca <i>et al.</i> , 2017). - <i>Sistema de indicadores de resiliência de CUPSs (espaço público urbano complexo)</i> -



Tráfego e circulação urbana	Acidentes de trânsito	- <i>Indicadores de segurança no transporte</i> : número de mortes per capita, número de óbitos por distância percorrida e número de óbitos por número de veículos automotores (Splichalova e Flynnova, 2021).
	Liberdade de movimentos e circulação	- <i>Indicadores de desempenho do tráfego</i> : indicadores de densidade de estradas e ferrovias: número de veículos automotores por mil habitantes, número de acidentes fatais por milhão de habitantes, participação econômica no valor agregado do setor de transportes; <i>Intensidade do tráfego</i> : número de km percorridos por um veículo no país, passageiros-quilômetros no país, quantidade e toneladas-quilômetros de mercadorias transportadas (Splichalova e Flynnova, 2021).
Sistemas de transporte urbano	Transporte privado	- <i>Indicadores de exposição de vulnerabilidade do petróleo</i> : proporção do uso de veículos de baixa ocupação como modo habitual de trabalho, distância média estimada de deslocamento (Leung <i>et al.</i> , 2018).
	Disponibilidade e qualidade do transporte público	- <i>Indicadores de resposta à movimentos políticos de ocupação</i> : identificação da parte do sistema de transporte diretamente afetado, como os diferentes modos de transporte foram afetados à medida que o comportamento de viagem das pessoas mudou em resposta ao movimento (tráfego rodoviário, mudanças para diferentes modos, aspecto geográfico, caminhada e ciclismo) (Loo e Leung, 2017). - Idade e densidade populacional, e suas condições de saúde anterior, e validações de passagens (Ramírez-Buitrago <i>et al.</i> , 2021). - <i>Indicadores para Índice de Adaptabilidade Composto (CAI)</i> : veículo-quilômetros percorridos, horas por veículo percorridas, velocidade média do veículo, duração média da viagem e viagens canceladas devido às inundações urbanas (Vajjarapu e Verma, 2021). - <i>Indicadores de Robustez</i> : conectividade/vulnerabilidade da rede, capacidade da rota, capacidade de transporte de massa, demanda e tempo/distância da viagem (pós evento); <i>Redundância</i> : rotas alternativas em relação a pontos críticos, nível de acessibilidade e modos alternativos; <i>Recursos</i> : tempo necessário para começar a recuperar e disponibilidade de pessoas e outros recursos para agir; <i>e de Rapidez</i> : tempo necessário para restaurar e funcionamento normal ou próximo disso (Leobons <i>et al.</i> , 2019).
	Diversificação modal	- Diversidade de transporte (Jewell <i>et al.</i> , 2014). - <i>Indicadores de capacidade adaptativa</i> : proporção da área dentro de 400 m da parada de transporte público classificada por nível de serviço em dias úteis, porcentagem de área dentro de 400 m de buffer de paradas de transporte público elétrico (ferrovias e bondes), proporção do modo de trabalho por transporte ativo (caminhada ou bicicleta) (Leung <i>et al.</i> , 2018).
	Regulação e fiscalização do transporte público	- <i>Indicadores para avaliar a qualidade do serviço de transporte informal</i> : acessibilidade na origem e destino, custo, tempo de viagem, tempo de espera, conforto, atitude dos motoristas, velocidade, segurança e facilidades de parada de ônibus (Olowosegun <i>et al.</i> , 2021).

4. CONCLUSÕES

Com o propósito de realizar uma análise exploratória da influência mútua entre sustentabilidade e resiliência da mobilidade urbana, este estudo identificou indicadores de resiliência de mobilidade e verificou sua relação com os temas e domínios que integram o Índice de Mobilidade Urbana Sustentável (IMUS). Constatou-se que todos os domínios do IMUS tiveram correspondência com pelo menos um indicador de resiliência e que todos os indicadores de resiliência analisados podiam ser associados a algum tema do IMUS. Dessa forma, a correlação entre os indicadores analisados aponta a resiliência como um atributo dos sistemas de mobilidade sustentáveis, ainda que a resiliência se ocupe de questões voltadas ao desempenho dos sistemas urbanos e a sustentabilidade aparentemente seja um conceito mais amplo. Por outro lado, nem todos os temas foram associados aos indicadores concebidos para avaliar a



resiliência da mobilidade identificados na revisão da literatura.

Ainda que tenha sido aqui observado que os indicadores de resiliência guardam relação com temas que caracterizam a mobilidade urbana sustentável, o caráter exploratório da análise deixa abertas outras frentes para investigação. Uma possibilidade seria considerar outros índices de mobilidade sustentável (e não apenas o IMUS), além da ampliação da busca por indicadores de resiliência na literatura. Também seria interessante uma comparação direta de indicadores (de resiliência e de sustentabilidade) e não apenas de indicadores (de resiliência) *versus* domínios e temas (de mobilidade sustentável). Outro ponto importante seria uma avaliação detalhada do “sentido” dos indicadores, isto é, se o que é positivo para a resiliência também o é para a sustentabilidade (e vice-versa). Além disso, estudos subsequentes podem apontar para um sistema de indicadores (de mobilidade, ambientais e socioeconômicos) que permita uma análise integrada dos níveis de resiliência e sustentabilidade dos sistemas urbanos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Achillopoulou, D. V.; S. A. Mitoulis; S. A. Argyroudis e Y. Wang. (2020) Monitoring of Transport Infrastructure Exposed to Multiple Hazards: A Roadmap for Building Resilience. *Science of the Total Environment*, v. 746, p. 1-24. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141001>.
- Arrighi, C.; M. Pregnolato; R. J. Dawson e F. Castelli (2019) Preparedness against Mobility Disruption by Floods. *Science of the Total Environment*, v. 654, p. 1010-1022. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.191>.
- Borghetti, F. e G. Malavasi (2016) Road Accessibility Model to the Rail Network in Emergency Conditions. *Journal of Rail Transport Planning & Management*, v. 6, p. 237-254. <https://doi.org/10.1016/j.jrtpm.2016.10.001>.
- Cai, M.; Y. Shi e C. Ren (2020) Developing a High-Resolution Emission Inventory Tool for Low-Carbon City Management Using Hybrid Method - A Pilot Test in High-Density Hong Kong. *Energy & Buildings*, v. 226, p. 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110376>.
- Carboni, A. e F. Defflorio. (2020) Simulation of Railroad Terminal Operations and Traffic Control Strategies in Critical Scenarios. *Transportation Research Procedia*, v. 45, p. 325-332. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2020.03.023>.
- Cariolet, J.; M. Colombert; M. Vuillet e Y. Diab (2018) Assessing the Resilience of Urban Areas to Traffic-Related Air Pollution: Application in Greater Paris. *Science of the Total Environment*, v. 615, p. 588-596.
- Carvalhoes, T. M.; M. V. Chester; A. T. Reddy e B. R. Allenby (2021) An Overview & Synthesis of Disaster Resilience Indices from a Complexity Perspective. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, v. 57, p. 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2021.102165>.
- Chan, H.; A. Chen; G. Li; X. Xu e W. Lam (2021) Evaluating the Value of New Metro Lines Using Route Diversity Measures: The Case of Hong Kong's Mass Transit Railway System. *Journal of Transport Geography*, v. 91, p. 1-16. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2020.102945>.
- Costa, M. S. (2008) Um Índice de Mobilidade Urbana Sustentável. Tese (Doutorado em Planejamento e Operação de Sistemas de Transportes). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. <https://doi.org/10.11606/T.18.2008.tde-01112008-200521>.
- Feldmeyer, D.; W. Nowak; A. Jamshed e J. Birkmann (2021) An Open Resilience Index: Crowdsourced Indicators Empirically Developed from Natural Hazard and Climatic Event Data. *Science of the Total Environment*, v. 774, p. 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145734>.
- Fonseca, J. A.; L. Estévez-Mauriz; C. Forgaci e N. Björlin (2017) Spatial Heterogeneity for Environmental Performance and Resilient Behavior in Energy and Transportation Systems. *Computers, Environment and Urban Systems*, v. 62, p. 136-145. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2016.11.001>.
- Jewell, J.; A. Cherp e K. Riahi (2014) Energy Security Under De-Carbonization Scenarios: An Assessment Framework and Evaluation under Different Technology and Policy Choices. *Energy Policy*, v. 65, p. 743-760. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.10.051>.
- Leobons, C. M.; V. B. G. Campos e R. A. M. Bandeira (2019) Assessing Urban Transportation Systems Resilience: A Proposal of Indicators. *Transportation Research Procedia*, v. 37, p. 322-329.
- Leung, A.; M. Burke e J. Cui (2018) The Tale of Two (Very Diferente) Cities - Mapping the Urban Transport Oil Vulnerability of Brisbane and Hong Kong. *Transportation Research Part D*, v. 65, p. 796-816.
- Litman, T. (2006) Lessons from Katrina and Rita: What Major Disasters Can Teach Transportation Planners. *Journal*



- of Transportation Engineering*, 132(1), p. 11-18. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-947X\(2006\)132:1\(11\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(2006)132:1(11)).
- Loo, B. P. Y. e K. Y. K. Leung (2017) Transport Resilience: The Occupy Central Movement in Hong Kong from Another Perspective. *Transportation Research Part A*, v. 106, p. 100-115.
- Martins, M. C. da M.; A. N. Rodrigues da Silva; N. Pinto (2019) An Indicator-Based Methodology for Assessing Resilience in Urban Mobility. *Transportation Research Part D*, v. 77, p. 352-363.
- Mattioli, G.; Z. Wadud e K. Lucas (2018) Vulnerability to Fuel Price Increases in the UK: A Household Level Analysis. *Transportation Research Part A*, v. 113, p. 227-242.
- Miranda, H. F. e A. N. Rodrigues da Silva (2012) Benchmarking sustainable urban mobility: The case of Curitiba, Brazil. *Transport Policy (Oxford)*, v. 21, p. 141-151.
- Olowosegun, A.; D. Moyo e D. Gopinath (2021) Multicriteria Evaluation of the Quality of Service of Informal Public Transport: An Empirical Evidence from Ibadan, Nigeria. *Case Studies on Transport Policy*, v. 9, p. 1518-1530.
- Ramírez-Buitrago, F. A.; N. A. Correal-Huertas; L. D. Ramírez-Leuro; D. A. Sandoval-Pedrerros e L. A. Rubio-Caballero (2021) Tools for the Monitoring, User Characterization, and their Applications to the Public Integrated Transport System Due to the COVID-19 Disease Effects: A Case Study in Bogotá, TRANMILENIO Company. *Transportation Research Procedia*, v. 58, p. 431-438.
- Rodrigues da Silva, A. N.; M. S. Costa e R. A. R. Ramos (2010) Development and Application of I_SUM - An Index of Sustainable Urban Mobility. 89th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, D. C.
- Splichalova A. e L. Flynnova (2021) Indicator Approach to the Failure of Critical Road Transportation Infrastructure Elements. *Transportation Research Procedia*, v. 55, p. 1767-1774.
- Ta, C.; A. V. Goodchild e K. Pitera (2009) Structuring a Definition of Resilience for the Freight Transportation System. *Transportation Research Record*, 2097(1), p. 19-25.
- Vajjarapu, H. e A. Verma (2021) Composite Adaptability Index to Evaluate Climate Change Adaptation Policies for Urban Transport. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, v. 58, p. 1-12.
- Vajjarapu, H.; A. Verma e H. Allirani (2020) Evaluating Climate Change Adaptation Policies for Urban Transportation in India. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, v. 47, p. 1-20.
- Wang, X.; Y. Koç; S. Derrible; S. N Ahmad; W. J. A. Pino e R. E. Kooij (2017) Multi-Criteria Robustness Analysis of Metro Networks. *Physica A*, v. 474, p. 19-31.
- Watcharasukarn, M.; S. Page e S. Krumdieck (2012) Virtual Reality Simulation Game Approach to Investigate Transport Adaptive Capacity for Peak Oil Planning. *Transportation Research Part A*, v. 46, p. 348-367.
- Xu, H. e B. Xue (2017) Key Indicators for the Resilience of Complex Urban Public Spaces. *Journal of Building Engineering*, v. 12, p. 306-313. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2017.06.018>.
- Zhao, P.; R. Chapman; E. Randal e P. Howden-Chapman (2013) Understanding Resilient Urban Futures: A Systemic Modelling Approach. *Sustainability*, 5, p. 3202-3223. doi: <https://doi.org/10.3390/su5073202>.

Camila Mayumi Nakata Osaki (camilanakata@usp.br)

Antônio Nelson Rodrigues da Silva (anelson@sc.usp.br)

Departamento de Engenharia de Transportes, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo
Av. Trabalhador São-carlense, 400 - São Carlos, SP, Brasil