

AVALIAÇÃO DA RESILIÊNCIA EM SISTEMAS DE TRANSPORTES

Camila Maestrelli Leobons
Vania Barcellos Gouvea Campos
Renata Albergaria de Melo Bandeira
Programa de Engenharia de Transportes – PGT
Instituto Militar de Engenharia - IME

RESUMO

A resiliência em transportes está relacionada à continuidade do serviço prestado ou à recuperação das atividades após um evento, retornando à normalidade ou próximo desta numa região. Porém, não há um consenso sobre a definição do conceito de resiliência, tampouco existe nenhuma medida amplamente aceita para resiliência em transportes. Contudo, sua quantificação auxilia na tomada de decisão para a implementação das estratégias mais favoráveis, principalmente diante das incertezas de ameaças futuras. Em vista disso, o presente artigo apresenta uma revisão sistemática da literatura com o objetivo de identificar o estado-da-arte referente à avaliação da resiliência em transportes.

ABSTRACT

Resilience in transportation systems is related to the continuity of the service performed or to the recovery of activities after an event, returning to or near normality within a region. However, there is no consensus on the definition of resilience, nor is there any widely accepted measure for resilience in transport. However, its quantification assists in the decision-making process regarding the implementation of the most favorable strategies, especially in the face of uncertainties of future threats. In this scenario, this paper presents a systematic literature review that aims to identify the state of the art regarding the evaluation of resilience in transportation systems.

1. INTRODUÇÃO

Grandes eventos, como shows ou jogos esportivos, manifestações, problemas de enchentes e deslizamentos ou mesmo eventos recorrentes, como acidentes, dificultam o deslocamento em algumas regiões das cidades, gerando diversos transtornos. Assim, qualquer problema que afete o sistema de transportes pode levar a redução no desempenho deste e comprometer sua operação, prejudicando os serviços de emergência, entregas e acesso ao trabalho, entre outros, afetando o mercado interno e a economia em efeito dominó (Siemens e Arup, 2013).

O aumento dos desastres relacionados ao clima (CRED e UNISDR, 2015) pode comprometer o sistema de transportes, cujo impacto variará conforme as vulnerabilidades meteorológicas existentes, a oferta de transporte e região do planeta, exigindo mudanças no planejamento, desenho, construção, operação e manutenção dos sistemas (Ribeiro e Santos, 2015).

Neste contexto, torna-se essencial melhorar a resiliência do sistema de transportes, o que inclui uma ampla variedade de atividades de antecipação, prevenção, mitigação e restauração, com a finalidade de reduzir os impactos e restabelecer a normalidade dos deslocamentos no menor tempo possível, tanto na movimentação de pessoas quanto de carga.

A preocupação com o planejamento de sistema de transportes resilientes levou alguns estudiosos a propostas de avaliação, visando reduzir os impactos de uma ameaça na mobilidade de uma região. Porém, não existe nenhuma medida amplamente aceita para resiliência em transportes (Chan e Schofer, 2016; King e Shalaby, 2016; Machado-León e Goodchild, 2017; Murray-Tuite, 2006). Contudo, sua quantificação auxilia na tomada de decisão para a implementação das estratégias mais favoráveis, principalmente diante das incertezas de ameaças futuras (Adams *et al.*, 2012; Bhavathrathan e Patil, 2015).

Em vista disso, o presente artigo tem como objetivo identificar o estado da arte sobre a avaliação da resiliência em transportes. Deste modo, desenvolveu-se uma revisão sistemática da literatura sobre o tema, sendo esta analisada em duas visões, qualitativa e quantitativa, esta última considerando um único sistema (unimodal) e mais de um sistema (multimodal).

2. METODOLOGIA PARA REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA

A revisão sistemática da literatura (RSL) foi realizada, seguindo a metodologia proposta por Thomé *et al.* (2016). A pesquisa utilizou os bancos de dados da *Science Direct*, *Scopus* e *Web of Science*, sendo adotados os seguintes grupos de palavras-chave para a busca no título, resumo ou palavras-chave: (1) transport* AND resilien*; (2) urban OR city; (3) variable OR indicator OR metric OR index. A busca foi restrita a artigos publicados nos últimos dez anos.

Essa pesquisa retornou 105 artigos. Inicialmente, foram analisados os títulos das publicações, sendo excluídas aquelas com focos fora do objetivo da busca como na área de saúde, energia, sustentabilidade, gestão de resíduos. Assim, restaram 76 artigos, cujos resumos foram analisados, permanecendo apenas artigos que focam em avaliações de sistemas de transportes (26 artigos). Em seguida, após a leitura completa dos artigos, onde foram excluídas mais 20 publicações que não estavam relacionadas à avaliação da resiliência. Por fim, 29 publicações foram incluídas pelo processo *snowball*, totalizando 35 trabalhos analisados. Destes, dois apresentaram uma revisão da literatura, três discutiram medidas qualitativas, e os outros 30 analisaram sistemas de transportes quantitativamente. Assim, estruturou-se a análise da literatura de resiliência de sistemas de transporte segundo esta abordagem. A seguir, apresenta-se uma discussão dos trabalhos revisados relacionadas a análise qualitativa e posteriormente, a análise quantitativa.

3. PUBLICAÇÕES COM ABORDAGEM QUALITATIVA

Apenas três publicações desenvolveram estruturas qualitativas de avaliação da resiliência em transportes. Ortiz *et al.* (2009) e VTPI (2017) apresentam estruturas conceituais, enquanto Hughes e Healy (2014) trazem uma análise semiquantitativa.

Sob a ótica do transporte de cargas, o trabalho de Ortiz *et al.* (2009) destaca a necessidade de tornar o sistema mais resiliente devido à preocupação da comunidade empresarial com o aumento do fluxo de veículos, somado a uma capacidade limitada do sistema e ao envelhecimento da infraestrutura, que tornam o sistema de transportes frágil, à medida que pequeno evento pode causar efeitos adversos. Assim, os autores apresentam cinco condições de operação de uma rede de transportes que podem afetar a resiliência: congestionamento e envelhecimento da infraestrutura como pontos negativos, e conectividade e flexibilidade; capacidade em excesso; e capacidade de resposta às emergências influenciando positivamente. Dessa forma, as organizações governamentais deveriam coordenar seus esforços ao investir e planejar focando nos fatores que aumentam a resiliência.

Numa abordagem mais geral da resiliência em transportes, VTPI (2017) apresentou uma estrutura de análise da resiliência em quatro etapas. O primeiro passo é definir o sistema que será avaliado e seus limites. O segundo passo é a identificação das funções críticas, observando quais atividades e serviços têm maior valor para a sociedade. Em seguida, identificam-se as vulnerabilidades do sistema, no qual se detecta o que pode falhar ou se tornar ineficiente. Nessa etapa, é importante generalizar os riscos para se encontrar categorias de vulnerabilidades, já que não tem como prever todos os possíveis problemas que possam

ocorrer e suas combinações. Por fim, formas de melhorar a resiliência e a segurança são identificadas ao encontrar modos de reduzir uma vulnerabilidade específica, e incorporar os princípios da resiliência no planejamento e gerenciamento dos componentes críticos do sistema de transportes. Para VTPI (2017), boas práticas que levariam a um sistema mais resiliente como: aumentar a diversidade, a redundância e a conectividade do sistema; projetar componentes resistentes a condições extremas; desenvolver um sistema de informação e comunicação com os usuários; alocar os recursos de forma eficiente; planejar respostas de emergência e planos de contingência.

Em uma abordagem semiquantitativa, Hughes e Healy (2014) apresentaram uma ferramenta de avaliação da resiliência para o transporte terrestre (ferroviário e rodoviário), adotando duas dimensões de Bruneau *et al.* (2003), técnica e organizacional, ou seja, não consideraram as dimensões social e econômica porque estas já estariam implícitas na resiliência em transportes, dado que este sistema tem uma função vital para a sociedade e a economia. Para cada dimensão, Hughes e Healy (2014) elegeram três propriedades, que são avaliadas por diversos indicadores. Na dimensão técnica, robustez, redundância e “seguro em falhar” são avaliados por 18 medidas. Já a dimensão organizacional apresenta 74 indicadores relacionados a “mudança rápida”, redes, e “liderança e cultura”. O *framework* proposto por Hughes e Healy (2014) é apresentado na Figura 1. Ao todo, 92 indicadores foram apresentados e graduados de 1 a 4, onde 1 indica o pior caso e 4 o melhor cenário. Da mesma forma, o nível de resiliência do sistema em análise pode variar de 4 (alta resiliência) a 1, que aponta um sistema com baixa resiliência onde a performance é baixa e melhorias são necessárias. Ainda, os autores consideram que o *framework* proposto pode ser aplicado tanto para avaliar a resiliência em ativo, quanto em redes ou regionalmente.

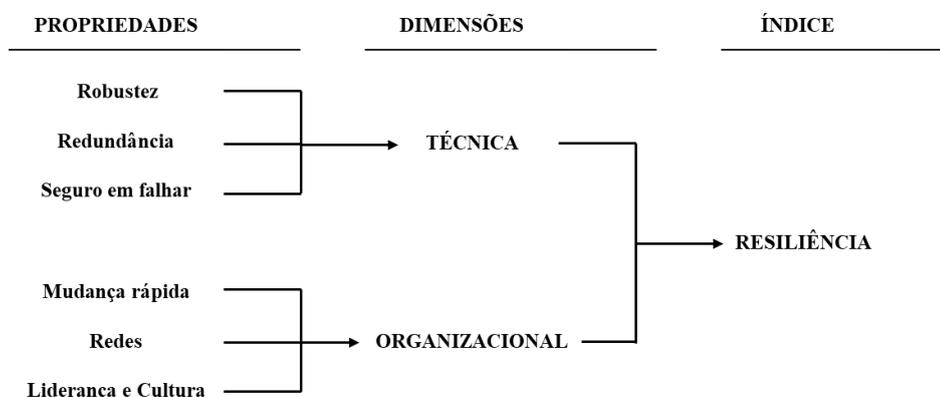


Figura 1: Framework de Hughes e Healy (2014)

4. PUBLICAÇÕES COM ABORDAGEM QUANTITATIVA

Dos 30 trabalhos com estrutura quantitativa, observam-se duas visões de análise: uma relacionada a um único modo e outra que considera que inclui, dentro de uma visão sistêmica, mais de um modo de transporte. Dessa forma, a seguir serão discutidos os trabalhos em cada categoria.

4.1 Publicações com Visão Unimodal

Murray-Tuite (2006) utilizou métodos de alocação para avaliar o impacto em métricas de resiliência relacionadas a adaptabilidade, segurança, mobilidade e capacidade de se recuperar rapidamente, observando que o método ‘Equilíbrio do Usuário’ apresenta um melhor

desempenho em relação à adaptabilidade e a segurança, enquanto a alocação ótima uma melhor performance para as métricas relacionadas a mobilidade e recuperação.

Adotando a concepção de que resiliência é a taxa de recuperação dada uma estratégia, Liu e Murray-Tuite (2008) avaliaram a efetividade de estratégias de recuperação de congestionamento causados por um incidente que bloqueia um corredor por meio das seguintes medidas de performance/efetividade (MOE): tempo total de viagem na rede (veículo horas trafegadas), a velocidade média nas autoestradas, o tempo médio de viagem entre um par origem-destino e a extensão máxima de fila. Dentre as estratégias analisadas pelos autores, estão: (1) abertura das faixas destinadas a veículos de alta ocupação ao tráfego geral; (2) ajuste da velocidade limite das autoestradas para situações não usuais; (3) desvio do tráfego para vias menos congestionadas com o uso de dispositivos eletrônicos (celulares, GPS e internet); (4) desvio do tráfego com o uso de PMV (Painel de Mensagem Variada). O resultado levou às seguintes conclusões de efetividade das estratégias: (1) a abertura de faixas é recomendada quando a percentagem de veículos de alta ocupação é baixa; (2) ajustar a velocidade limite não deve ser adotada quando o incidente gera congestionamento; (3) o plano de desvio por dispositivos eletrônicos não apresentou conclusões consistentes; e (4) o desvio por PMVs deve ser realizado até 20 minutos após a liberação do trânsito.

Vugrin *et al.* (2010) empregaram a otimização para a identificação de uma sequência ótima de recuperação a perturbações no sistema com o objetivo de maximizar sua resiliência, minimizando o custo. O custo é considerado como um indicador de desempenho, sendo quantificado pela soma do custo do tempo e de recursos gastos na reparação. Os autores simularam a obstrução de pontes de fundamental importância entre o leste e oeste dos EUA.

Bekkem *et al.* (2011) apresentaram um método para identificação dos segmentos mais críticos de uma rodovia (baixa resiliência operacional). Focando no transporte de cargas, a resiliência de cada segmento de um corredor rodoviário foi quantificada em função de sua vulnerabilidade, importância econômica e o aumento nas distâncias de viagem devido à mudança de rota. Enfim, o inverso da resiliência indica o nível de prioridade do segmento, cuja finalidade é fornecer suporte nas tomadas de decisão em relação às políticas de mitigação e preparação para possíveis eventos de ruptura.

Adam *et al.* (2012) estudaram o transporte de cargas em um corredor rodoviário por meio da análise da série histórica da velocidade de caminhões em diferentes trechos de uma rodovia. Os autores propuseram uma metodologia para qualificar duas medidas da resiliência, a redução e a recuperação, baseados nas propriedades R4 (Robustez, Redundância, Restauração/Recursos e Rapidez) de Bruneau *et al.* (2003). A medida de redução reflete as características da Robustez e da Redundância e é estimada pelo declive α do desempenho no triângulo da resiliência (Figura 2), e a medida de recuperação é determinada pelo aclave β da função de velocidade de caminhões, e revela a disponibilidade de Recursos e a Rapidez.

Arcidiacono *et al.* (2012) analisaram a interdependência entre prédios e ruas, considerando o impacto dos detritos dos edifícios sobre as vias, após um sismo, visando identificar um plano ótimo de recuperação em função da extensão total de vias trafegáveis, com base no tempo necessário para retornar ao estado anterior ao evento. Dessa forma, a resiliência é calculada adotando-se a ideia do triângulo da resiliência.

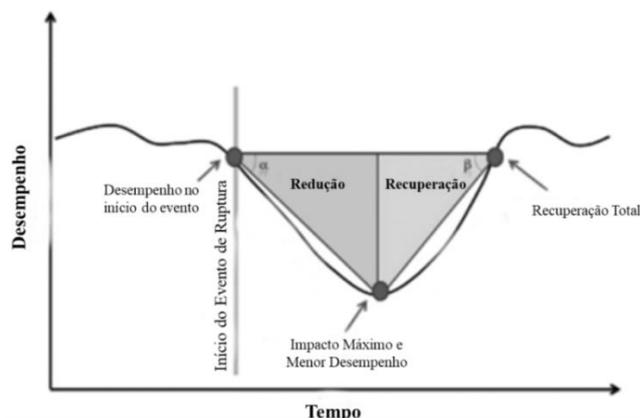


Figura 2: Triângulo da Resiliência segundo Adams *et al.*(2012)

Omer *et al.* (2013) propuseram um *framework* para a avaliação da resiliência de uma rede rodoviária regional (*Networked Infrastructure Resilience Assessment – NIRA*) que possui três etapas. Na primeira, os limites espaciais, operacionais e temporais são definidos. Em seguida, a resiliência é avaliada e, no terceiro estágio, estratégias de melhoria da resiliência são identificadas e analisadas. No trabalho apresentado, os autores se limitaram às duas primeiras etapas, empregando três indicadores para avaliar a resiliência de um corredor rodoviário: tempo de viagem, impacto ambiental e custo. O tempo de viagem é calculado a partir de uma minimização do tempo médio de viagem. O impacto ambiental reflete as emissões de CO₂ e o custo está associado ao tempo adicional que os indivíduos perderão no trânsito (custo do tempo), o custo extra de combustível e o custo da mitigação de CO₂.

Beiler *et al.* (2013) apresentaram indicadores para avaliação espacial e temporal da resiliência de um corredor rodoviário, permitindo a observação do comportamento da variável ao longo do tempo e a identificação de áreas/segmentos críticos (Tabela 1). A avaliação dos indicadores requer um banco de dados histórico, já que os autores se propõem a avaliar a resiliência antes de um possível evento e não empregando a simulação do impacto do evento.

Tabela 1: Indicadores e Estratégias apresentados por Beiler *et al.* (2013)

Tipo	Amostra de Indicadores	Estratégias
Funcional	Idade/ Probabilidade de falha estrutural	Renovação e Reabilitação
	Redundância/ Disponibilidade de modos/rotas alternativos	Planejamento holístico e de desvio de rotas
	Robustez	Melhoria de links críticos
	Tempo de resposta a emergências	Planos de resposta
	Colaboração entre Agências	Planos regionais para o corredor
Comportamental	Tempo de Viagem	Revitalização Urbana/ Conflito espacial Casa-Trabalho
	Confiabilidade do Tempo de Viagem/ Índice do Tempo de Viagem	Sistemas de Transporte Inteligentes (ITS)
	Seleção de Rota	Informação do tráfego em tempo real
Econômico/ Financeiro	Capacidade econômica de manter a rede	Plano funcional para o corredor
	Capacidade econômica de expandir a rede	Plano funcional para o corredor
	Acesso a recursos para recuperação e preparação para desastres	Coordenação de Planos de resposta
	Capacidade econômica que permita a colaboração entre jurisdições e Agências	Iniciativas Federais de assistência aos corredores

Faturechi e Miller-Hooks (2014b, 2014c) apresentaram modelos de maximização da resiliência através da identificação de um conjunto ótimo de estratégias pré e pós evento. Assim, Faturechi e Miller-Hooks (2014c) apresentam a resiliência em função do tempo total de viagem no sistema, específica para o modo rodoviário, e quantificam a resiliência em relação à demanda atendida e outras aplicações (2014b). Fotouhi et al. (2017) estenderam o trabalho de Faturechi e Miller-Hooks (2014c) ao adicionar a interdependência da rede rodoviária com a rede elétrica.

Posteriormente, Zhang e Miller-Hooks (2015) também empregaram a otimização para maximizar a resiliência, identificando um conjunto ótimo de estratégias em função da demanda atendida, porém, seu modelo é específico para o transporte ferroviário de cargas e trata apenas de estratégias pós-evento. Além disso, Zhang e Miller-Hooks (2015) acrescentaram ao modelo uma limitação na disponibilidade de recursos, supondo assim que as ações de recuperação selecionadas não podem ser realizadas simultaneamente nem imediatamente ao evento.

Num estudo do impacto das características topológicas na resiliência da rede, Zhang *et al.* (2015) analisaram a resiliência em relação a três indicadores: demanda atendida, conectividade e acessibilidade. Enquanto a demanda atendida avalia a capacidade da rede em manter o serviço, a conectividade e a acessibilidade são medidas topológicas que examinam a estrutura em relação a redundância e conexão, e a posição relativa dos nós na rede, respectivamente. Para isso, Zhang *et al.* (2015) investigaram estruturas topológicas genéricas, concluindo que a redundância e a conectividade são fatores determinantes para uma boa resiliência.

Sob outra ótica, Ye e Ukkusuri (2015) empregaram o triângulo da resiliência para a identificação de uma sequência ótima de recuperação. Os autores buscaram maximizar a resiliência em função do tempo total de viagem em uma rede rodoviária, avaliando diariamente a alocação do tráfego a fim de acompanhar a evolução do fluxo durante a recuperação.

D'lima e Medda (2015) buscaram a quantificação da resiliência de um sistema metroviário por meio da rapidez de retorno ao equilíbrio. Para isso, os autores utilizaram o modelo estocástico de reversão à média quando as perturbações são pequenas e este somado a processos de Poisson quando o evento tem maiores impactos. Este método admite que o sistema volte ao equilíbrio após um desvio de seu estado normal. Os autores consideraram que os choques apresentam uma natureza aleatória e a ruptura causada por este (no próximo intervalo de tempo) assume uma distribuição de Gauss com a variância igual a raiz quadrada da duração do intervalo. A aplicação no metrô de Londres mostrou que, conforme esperado, um sistema com uma alta taxa de reversão a média será resiliente independentemente de seu grau de volatilidade.

Tomando a definição de resiliência como a medida de tolerância a falhas a que a rede está susceptível, Bhavathrathan e Patil (2015) apresentaram um modelo para determinar a máxima degradação que *links* rodoviários suportariam sem comprometer a operacionalidade da rede. Tal condição foi chamada de estado crítico e representa o custo operacional máximo em que a rede continua operante. Os autores se basearam na Teoria dos Jogos para a formulação da otimização minimax, que minimiza o fluxo nos links e maximiza a degradação do sistema

para encontrar o tempo total crítico de viagem. Em 2016, Patil e Bhavathrathan (2016) expandiram esse modelo ao considerar o efeito da variação da demanda na quantificação da resiliência, introduzindo o índice de resiliência generalizada (GIR). Os autores analisaram diferentes redes e empregaram a regressão, constatando uma relação exponencial entre a resiliência e a demanda. Enfim, o GIR pode ser calculado pela integral da função da resiliência em relação à demanda.

Em uma análise do transporte ferroviário, Adjetey-Bahun *et al.* (2016) observaram a inter-relação da rede metroviária com os sistemas de energia, de telecomunicações e organizacional, após falhas em estações de energia, por meio da demanda transportada de passageiros em linhas de metrô, levando também em consideração o tempo necessário para retornar ao estado anterior ao evento adotando o entendimento do triângulo da resiliência para a sua quantificação.

Com o objetivo de examinar como diferentes métricas de resiliência em transportes podem resultar em análises distintas da ruptura da rede, Balal *et al.* (2017) avaliaram comparativamente cinco medidas consistentes com o triângulo da resiliência de Bruneau *et al.* (2003): distância de fila, velocidade no *link*, tempo de viagem no *link*, e atrasos levando a um desvio para uma via alternativa paralela à bloqueada ou uma arterial local. Os resultados expuseram a falta de correlação estatística entre as medidas, indicando que os pesquisadores devem escolher as medidas de resiliência que mais se adequam a seus objetivos.

4.2 Publicações com Visão Multimodal

Leu *et al.* (2010) propuseram uma abordagem baseada na representação gráfica de dados de GPS avaliando a resiliência da estrutura de diferentes sistemas de transportes de uma cidade por meio de três conjuntos de métricas (topológicas). O primeiro grupo analisa a estrutura da rede antes da perturbação revelando possíveis falhas em relação à conectividade, presença de gargalos na rede e disponibilidade de rotas alternativas. O segundo conjunto de métricas avalia o impacto da remoção de cada nó na integridade da rede, expondo possíveis vulnerabilidades da rede relacionadas à falta de redundância e potenciais gargalos. Por fim, a terceira classe de medidas examina a distribuição espacial do risco ao mapear os indicadores do segundo grupo e a pondera com a densidade populacional das zonas, chegando a um *proxy* do possível impacto da perturbação na população local.

Cox *et al.* (2011) apresentaram um indicador de resiliência, baseado na métrica de resiliência econômica introduzida por Rose (2007), levando em consideração as particularidades dos sistemas de transportes. Os autores estudaram o comportamento do número de viagens em diferentes modos de transportes em Londres, analisando os ataques terroristas de julho de 2005 que atingiram o metrô e o sistema de ônibus. Assim, a resiliência é calculada em relação à transferência modal, sendo o maior valor de resiliência alcançado quando os indivíduos são capazes de se adaptar, trocando de modo e mantendo a demanda de viagens inalterada. Os autores ainda propuseram medidas de resiliência para avaliar o sistema antes do evento baseadas na vulnerabilidade, flexibilidade e disponibilidade de recursos. No caso investigado de Londres, foi estimado que 76,9% da diminuição das viagens nos modos atacados foram resultado do fator medo, e o restante está relacionado à redução da capacidade.

Serulle *et al.* (2011) e Freckleton *et al.* (2012) empregaram a lógica *fuzzy* em análises da resiliência a desastres. Esta técnica permite a avaliação de variáveis interdependentes sem a

necessidade de acurácia nos dados ou uma grande quantidade destes. Para a quantificação da resiliência, Serulle *et al.* (2011) utilizam os indicadores apresentados na Figura 3.

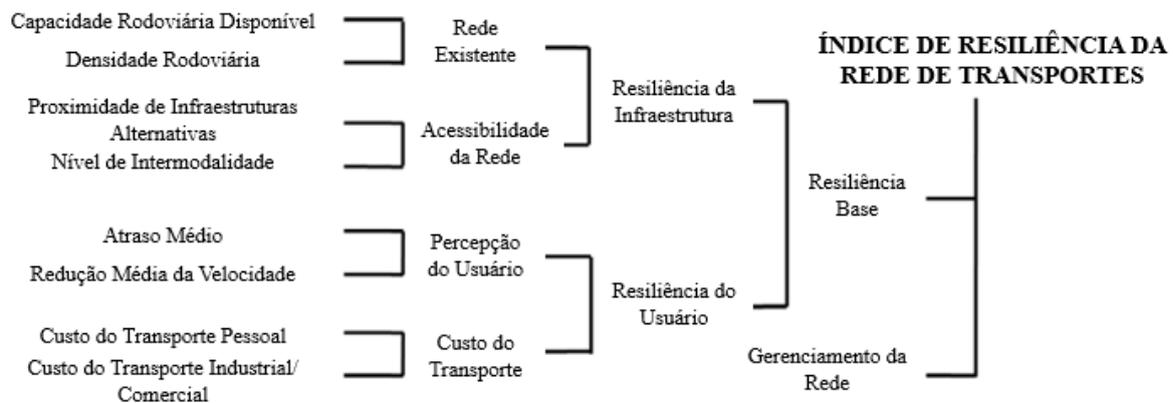


Figura 3: Diagrama de Dependência (Serulle *et al.*, 2011)

Freckleton *et al.* (2012) utilizaram praticamente os mesmos indicadores de Serulle *et al.* (2011), porém, os categorizaram, em uma estrutura de quantificação, sob a ótica divergente quanto às dimensões de um sistema. Freckleton *et al.* (2012) agruparam suas variáveis, quanto às dimensões, em: individual, da comunidade, econômica e de recuperação. Ainda, adicionaram outras cinco variáveis: acesso a materiais e suprimentos, acesso a combustível e energia, resposta à emergência e disponibilidade de recursos, além de segregar outras, especificamente relacionadas à escolha modal e ao custo do transporte. Enfim, apresentaram uma curva aproximada da resiliência necessária para cada intensidade de terremoto segundo a Escala de Mercalli Modificada, que permite a percepção da resiliência que a região em análise demanda para um dado impacto de um terremoto.

Pant (2012) avaliou a resiliência por quatro indicadores: capacidade extra da rede, diversidade de rotas, disponibilidade de modos alternativos e além da eficiência/desempenho da rede. Em uma primeira análise, *links* críticos são identificados, a partir da simulação de retirada do *link* da rede, para a posterior computação de um grupo de *links* críticos e a quantificação da resiliência em função de uma sequência ótima de restauração dos *links* recuperação, sem considerar a disponibilidade de recursos financeiros, usando o triângulo da resiliência.

Adotando o conceito de resiliência de Rose (2004), relacionado às propriedades da rede (como a redundância) e a adaptativas (como atividades de recuperação), Chen e Miller-Hooks (2012) e Miller-Hooks *et al.* (2012) apresentaram modelos de otimização específicos para o transporte intermodal de cargas. Esses têm como objetivo maximizar a resiliência em função da porcentagem de demanda atendida por meio da identificação de um conjunto ótimo de estratégias de resiliência. Enquanto o primeiro considera apenas estratégias após o evento, Miller-Hooks *et al.* (2012) adicionam estratégias pré-evento.

Numa abordagem do transporte metroviário, Jin *et al.* (2014) desenvolveram um modelo de otimização para maximizar a resiliência, considerando serviços de ônibus integrados à rede metroviária. Os autores adotaram a demanda atendida como indicador, considerando em seu modelo restrições como número de ônibus adicionais disponíveis para cada linha de ônibus em cada plano de contingência e suas interações. A aplicação do modelo de Jin *et al.* (2014) mostrou que: (1) conforme esperado, a resiliência aumenta quanto menor é a dimensão do

evento; (2) apesar de linhas de ônibus paralelas a linhas de metrô não serem economicamente viáveis, num cenário de perturbação, estas conseguem suprir melhor a demanda quando comparada às linhas de ônibus que conectam as estações de metrô (Inter linhas); (3) linhas de ônibus devem ser posicionadas em áreas com grande probabilidade de perturbações.

King e Shalaby (2016) usaram indicadores de Eficiência Global e integridade topológica, métrica apresentada por Leu *et al.* (2010). A eficiência mede a troca de fluxo dentro da rede e é avaliada quando os nós mais críticos são retirados primeiro (criticidade identificada por meio da centralidade de intermediação – *Betweenness Centrality*). A integridade topológica revela a vulnerabilidade da rede. Numa segunda abordagem, King e Shalaby (2016) adotaram as métricas de importância do nó “k”, determinada pela diferença média no tempo de viagem com a remoção da estação de metrô “k”, e de exposição do distrito “m”, caracterizada pelo aumento médio do tempo das viagens com origem no distrito “m” ponderado por cenários de interrupção do serviço nas estações de metrô. Esta análise detectou estações críticas que se danificadas produziriam um grande impacto negativo nos tempos de viagem dos passageiros. Além disso, foi constatado que a redundância, retratada por modos alternativos, aumenta a resiliência de regiões onde há estações críticas.

Chan e Schofer (2016) utilizaram os dados de uma variável definida como “Receita Veículo Milhas” diário do metrô de Nova York e do trem urbano de Nova Jersey para mensurar a resiliência em eventos relacionados ao clima. A partir da análise histórica deste parâmetro, os autores empregaram a medida “Dias de Serviço Perdidos”, métrica mensurada em função da oscilação do valor da variável “Receita Veículo Milhas”, e outros parâmetros como a “Receita Veículo Milhas Perdida”, e dias com nível de serviço prestado superior a 75% e 95% foram avaliados. O estudo revelou a influência de três fatores sobre a resiliência: a intensidade da tempestade, resistência da infraestrutura, e ações de gerenciamento operacional.

Donovan e Work (2017) propuseram uma técnica para a mensuração da resiliência de sistemas de transportes através da análise dos dados de GPS de taxis. O método é organizado em três etapas. Na primeira, os dados de coordenadas da origem e do destino da viagem, sua distância e seu tempo são computados para o cálculo do inverso da velocidade generalizada (ritmo típico), medido em minutos por milha, entre as regiões da cidade. A segunda etapa consiste em definir um padrão semanal das viagens através de uma distribuição de probabilidade que permita a identificação de variações diárias. Por fim, a terceira fase detecta ritmos atípicos que são considerados como eventos.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Um sistema de transportes resiliente tem como finalidade a redução dos impactos na circulação de pessoas e cargas e, o restabelecimento da normalidade após uma perturbação no sistema devido a um evento, como um desastre natural ou antropogênico, numa região. Uma interrupção dos serviços em um determinado modo pode sobrecarregar os demais que, não tendo capacidade de absorver, podem impactar a mobilidade numa cidade, gerando grandes inconvenientes para a população. Nesse contexto, melhorar a resiliência por estratégias inclui uma ampla variedade de atividades de antecipação, prevenção, mitigação e restauração, que tem como finalidade a redução dos impactos e o restabelecimento da normalidade dos deslocamentos no menor tempo possível, tanto na movimentação de pessoas quanto de carga.

Diante dessa busca por um sistema de transportes mais resiliente como forma de reduzir os impactos de uma ameaça, a avaliação da resiliência em transportes representa um importante

instrumento de monitoramento da resiliência, de modo que a proposta de identificar o estado da arte sobre a avaliação da resiliência em transportes foi o objetivo deste artigo. A RSL permitiu que fossem observadas diferentes abordagens para mensurar a resiliência. Murray-Tuite (2006) optou pela avaliação de propriedades da resiliência. Esta abordagem foi também adotada por Hughes e Healy (2014), que integrou propriedades da resiliência com as dimensões Técnica e Organizacional de Bruneau *et al.* (2003). Por sua vez, Leu *et al.* (2010), Serulle *et al.* (2011), Freckleton *et al.* (2012) e Omer *et al.* (2013) avaliaram a resiliência categorizando seus indicadores em dimensões da resiliência.

Além da classificação das publicações quantitativas numa visão unimodal ou multimodal, os trabalhos revisados também podem ser agrupados em relação a visão temporal, segundo Rose (2004, 2007), em estáticos ou dinâmicos. As avaliações estáticas são aquelas que avaliam os indicadores em determinado ponto no tempo, enquanto que as dinâmicas levam em consideração a variável tempo. Os trabalhos de quantificação da resiliência com dados reais (Adams *et al.*, 2012; Chan e Schofer, 2016; Cox *et al.*, 2011; Donovan eWork, 2017) estão na categoria dinâmica. Além destes, Vugrin *et al.* (2010), Arcidiacono *et al.* (2012), Pant (2012), Adjetey-Bahun *et al.* (2016) e Balal *et al.* (2017) examinaram a resiliência dinamicamente ao adotar o triângulo da resiliência de Bruneau *et al.* (2003), enquanto que D'lima e Medda (2015) apresentaram um método para estimação da rapidez de recuperação do sistema. Beiler *et al.* (2013) também considerou a variação temporal de indicadores, porém, analisando-os historicamente.

A revisão detectou um maior número de análises de um único modo, sendo o rodoviário o mais discutido, e grande parte destes adotaram modelos de alocação do tráfego. Em relação às variáveis, o tempo ou distância de viagem, a relação demanda de fluxo e capacidade, disponibilidade de recursos financeiros para ações de resiliência e ações para melhoria da resiliência foram as mais empregadas.

Quanto à escala de análise, foi observado que a análise de redes foi a mais explorada na literatura avaliada, prevalecendo a utilização modelos de alocação. Neste contexto a remoção de *links* ou nós foi muito utilizada, o que, em alguns casos (King e Shalaby, 2016; Leu *et al.* 2010; Omer *et al.*, 2013; Pant, 2012), resultou na identificação de componentes críticos.

Verificou-se, ainda, que os estudos propuseram, em sua maioria, uma unificação da medida da resiliência, cujas quantificações predominantes foram em função do tempo de viagem e capacidade dos sistemas, incluindo a da demanda (não) atendida e os custos em alguns casos. As abordagens de Serulle *et al.* (2011), Freckleton *et al.* (2012), por meio da lógica fuzzy, e a de Hughes e Healy (2014), por estrutura semiquantitativa, também geraram uma unificação da resiliência. Porém, dentre todas as publicações (qualitativas e quantitativas), apenas quatro chegaram a estimar um nível de resiliência: Adams *et al.* (2012), Serulle *et al.* (2011), Freckleton *et al.* (2012) e Hughes e Healy (2014). O primeiro analisou a resiliência em um segmento de um corredor rodoviário após eventos climáticos, não chegando numa unificação da resiliência. Os três últimos propuseram um índice de resiliência com o uso de diversos indicadores, porém, sem avaliar a rede objetivamente. Enquanto Serulle *et al.* (2011) e Freckleton *et al.* (2012) adotam a lógica fuzzy para a mensuração da resiliência com o uso de bons indicadores, porém, medidos de forma superficial, Hughes e Healy (2014) propõe indicadores mais genéricos, sem uma quantificação.

Enfim, pode-se concluir que ainda não existe um índice de resiliência que possa ser genericamente aplicado, porém, o estado da arte possibilita uma visão dos processos que podem ser utilizados, assim como, das variáveis que foram validadas em cada análise, o que permite uma base para definir um modelo de resiliência para cidades no Brasil, principalmente, em grandes regiões com alto risco de eventos climáticos e volume intenso de deslocamentos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adams, T. M., Bekkem, K. R., e Toledo-Durán, E. J. (2012) Freight Resilience Measures. *Journal of Transportation Engineering*, 138(11), 1403–1409. doi:10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000415
- Adjetey-Bahun, K., Birregah, B., Châtelet, E., e Planchet, J.-L. (2016) A model to quantify the resilience of mass railway transportation systems. *Reliability Engineering & System Safety*, 153, 1–14. doi:10.1016/j.ress.2016.03.015
- Arcidiacono, V., Cimellaro, G. P., Reinhorn, A. M., e Bruneau, M. (2012) Community resilience evaluation including interdependencies. *15th World Conference on Earthquake Engineering*. Sociedade Portuguesa de Engenharia Sismica, Lisboa, POR. Obtido de http://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/WCEE2012_5532.pdf
- Balal, E., Paso, E., Valdez, G., Paso, E., Miramontes, J., Paso, E., Mercado, M., Paso, E., Cheu, R. L., e Paso, E. (2017) Urban Transportation Network Resilience: Comparative Evaluation of Measures. *TRB 2017 Annual Meeting*. Transportation Research Board, Washington, D.C.
- Beiler, M. O., McNeil, S., Ames, D., e Gayley, R. (2013) Identifying Resiliency Performance Measures for Megaregional Planning Case Study of the Transportation Corridor Between Boston, Massachusetts, and Washington, DC. *Transportation Research Record*, (2397), 153–160. doi:10.3141/2397-18
- Bekkem, K., Adams, T. M., e Bier, V. M. (2011) Evaluating Freight Transportation Resilience on a Highway Corridor. *Transportation Research Record*, (608).
- Bhavathrathan, B. K., e Patil, G. R. (2015) Capacity uncertainty on urban road networks: A critical state and its applicability in resilience quantification. *Computers, Environment and Urban Systems*, 54, 108–118. doi:10.1016/j.compenvurbsys.2015.07.005
- Bruneau, M., Chang, S. E., Eguchi, R. T., Lee, G. C., O'Rourke, T. D., Reinhorn, A. M., Shinozuka, M., Tierney, K., Wallace, W. A., e Von Winterfeldt, D. (2003) A Framework to Quantitatively Assess and Enhance the Seismic Resilience of Communities. *Earthquake Spectra*, 19(4), 733–752. doi:10.1193/1.1623497
- Chan, R., e Schofer, J. L. (2016) Measuring Transportation System Resilience : Response of Rail Transit to Weather Disruptions. *Natural Hazards Review*, 17(1), 1–8. doi:10.1061/(ASCE)NH
- Chen, L., e Miller-Hooks, E. (2012) Resilience: An Indicator of Recovery Capability in Intermodal Freight Transport. *Transportation Science*, 46(1), 109–123. doi:10.1287/trsc.1110.0376
- Cox, A., Prager, F., e Rose, A. (2011) Transportation security and the role of resilience: A foundation for operational metrics. *Transport Policy*, 18(2), 307–317. doi:10.1016/j.tranpol.2010.09.004
- CRED, e UNISDR. (2015) *The Human Costs of Weather Related Disasters: 1995-2015*. UNISDR, Louvain. doi:10.1017/CBO9781107415324.004
- D'Lima, M., e Medda, F. (2015) A new measure of resilience: An application to the London Underground. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 81, 35–46. doi:10.1016/j.tra.2015.05.017
- Donovan, B., e Work, D. B. (2017) Empirically quantifying city-scale transportation system resilience to extreme events. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 79, 333–346. doi:10.1016/j.trc.2017.03.002
- Faturechi, R., e Miller-Hooks, E. (2014a) A Mathematical Framework for Quantifying and Optimizing Protective Actions for Civil Infrastructure Systems. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 29(8), 572–589. doi:10.1111/mice.12027
- Faturechi, R., e Miller-Hooks, E. (2014b) Travel time resilience of roadway networks under disaster. *Transportation Research Part B: Methodological*, 70, 47–64. doi:10.1016/j.trb.2014.08.007
- Fotouhi, H., Moryadee, S., e Miller-Hooks, E. (2017) Quantifying the resilience of an urban traffic-electric power coupled system. *Reliability Engineering and System Safety*, 163(January), 79–94. doi:10.1016/j.ress.2017.01.026
- Freckleton, D., Heaslip, K., Louisell, W., e Collura, J. (2012) Evaluation of Resiliency of Transportation Networks After Disasters. *Transportation Research Record*, 5, 109–116. doi:10.3141/2284-13
- Hughes, J. F., e Healy, K. (2014) *Measuring the resilience of transport infrastructure*. NZ Transport Agency, Wellington.

- Jin, J. G., Tang, L. C., Sun, L., e Lee, D. H. (2014) Enhancing metro network resilience via localized integration with bus services. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 63, 17–30. doi:10.1016/j.tre.2014.01.002
- King, D., e Shalaby, A. (2016) Performance Metrics and Analysis of Transit Network Resilience in Toronto. *TRB 2016 Annual Meeting*. Transportation Research Board, Washington, D. C.
- Leu, G., Abbass, H., e Curtis, N. (2010) Resilience of ground transportation networks: A case study on Melbourne. *33rd Australasian Transport Research Forum*. World Transit Research, Canberra.
- Liu, S., e Murray-Tuite, P. (2008) *Evaluation of strategies to increase transportation system resilience to congestion caused by incidents*. Mid-Atlantic University Transportation Center. Virginia Polytechnic Institute and State University, Virginia.
- Machado-León, J. L., e Goodchild, A. (2017) Review of Transportation Performance Metrics for Community-based planning of Resilience. *TRB 2017 Annual Meeting*. Transportation Research Board, Washington, D. C.
- Murray-Tuite, P. M. (2006) A comparison of transportation network resilience under simulated system optimum and user equilibrium conditions. *Proceedings - Winter Simulation Conference* (p. 1398–1405). Institute of Electrical and Electronics Engineers, Monterey. doi:10.1109/WSC.2006.323240
- Omer, M., Mostashari, A., e Nilchiani, R. (2013) Assessing resilience in a regional road-based transportation network. *International Journal of Industrial and Systems Engineering*, 13(4), 389–408. doi:10.1504/IJISE.2013.052605
- Ortiz, D., Ecola, L., e Willis, H. (2009) *Adding Resilience to the Freight System in Statewide and Metropolitan Transportation Plans: Developing a Conceptual Approach*.
- Pant, S. B. (2012) *Transportation Network Resiliency: A Study of self-Annealing*. Utah State University.
- Patil, G. R., e Bhavathrathan, B. K. (2016) Effect of Traffic Demand Variation on Road Network Resilience. *Advances in Complex Systems*, 19. doi:10.1142/S021952591650003X
- Ribeiro, S. K., e Santos, A. S. (2015) Impactos, Vulnerabilidades e Adaptação nos setores de transporte frente às mudanças climáticas: Como a cidade do Rio de Janeiro deverá se preparar? *XXIX Congresso Nacional de Pesquisa em Transporte da ANPET*. ANPET, Ouro Preto.
- Rose, A. (2004) Defining and Measuring Economic Resilience to Earthquakes. *Disaster Prevention and Management*, 13(4), 307–314. doi:10.1108/09653560410556528
- Rose, A. (2007) Economic resilience to natural and man-made disasters: Multidisciplinary origins and contextual dimensions. *Environmental Hazards*, 7(4), 383–398. doi:10.1016/j.envhaz.2007.10.001
- Serulle, N. U., Heaslip, K., Brady, B., Louisell, W. C., e Collura, J. (2011) A Case Study of Transportation Network Resiliency of Santo Domingo, Dominican Republic. *Transportation Research Record*, 8.
- Siemens, e Arup. (2013) *Resilient Urban Mobility: A Case Study Integrated Transport in Ho Chi Minh City*. ARUP-SIEMENS, Ho Chi Minh. Obtido de http://publications.arup.com/publications/r/resilient_urban_mobility_case_study_of_integrated_transport_in_ho_chi_minh_city
- Thomé, A. M. T., Scavarda, L. F., e Scavarda, A. J. (2016) Conducting systematic literature review in operations management. *Production Planning & Control*, 27(5), 408–420. doi:10.1080/09537287.2015.1129464
- VTPI. (2017) Online TDM Encyclopedia - Evaluating Transportation Resilience. Obtido 1 de janeiro de 2017, de <http://www.vtpi.org/tdm/tdm88.htm>
- Vugrin, E. D., Brown, N. J. K., e Turnquist, M. A. (2010) *Optimal recovery sequencing for critical infrastructure resilience assessment*. Sandia National Laboratories, Albuquerque. doi:10.2172/1007322
- Ye, Q., e Ukkusuri, S. V. (2015) Resilience as an Objective in the Optimal Reconstruction Sequence for Transportation Networks. *Journal of Transportation Safety & Security*, 7(1), 91–105. doi:10.1080/19439962.2014.907384
- Zhang, X., e Miller-Hooks, E. (2015) Scheduling Short-Term Recovery Activities to Maximize Transportation Network Resilience. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 29(6), 04014087. doi:10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000417
- Zhang, X., Miller-Hooks, E., e Denny, K. (2015) Assessing the role of network topology in transportation network resilience. *Journal of Transport Geography*, 46, 35–45. doi:10.1016/j.jtrangeo.2015.05.006

Camila Maestrelli Leobons (camila@maestrelli.org)
Vânia Barcellos Gouvêa Campos (vania@ime.eb.br)
Renata Albergaria de Mello Bandeira (re.albergaria@gmail.com)
Programa de Pós-Graduação, Mestrado em Engenharia de Transportes, Instituto Militar de Engenharia
Praça General Tibúrcio, 80 – Praia Vermelha, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.