

VERIFICAÇÃO DE VULNERABILIDADES EM REDES DE TRANSPORTE: UMA ABORDAGEM PELA TEORIA DOS GRAFOS

André Borgato Morelli

André Luiz Cunha

Universidade de São Paulo

Escola de Engenharia de São Carlos

RESUMO

A concepção e manutenção de sistemas sustentáveis e resilientes de transporte depende da identificação de possíveis vulnerabilidades no sistema antes que crises ocorram, para que a infraestrutura e as estratégias de ação em períodos de crise sejam elaboradas com efetividade. Contudo, dada a grande complexidade dos sistemas de transporte, os métodos propostos para a verificação de vulnerabilidades em geral são de difícil implementação e requerem dados inacessíveis a grande parte dos municípios brasileiros. Tendo isso em vista, e com o intuito de simplificar a análise preliminar de um sistema na busca por vulnerabilidades, o objetivo deste trabalho é apresentar o parâmetro de rede que melhor representa a vulnerabilidade local em redes de transporte terrestre das cidades brasileiras a partir da teoria dos grafos. O método utilizado no estudo foi a degradação sistemática da rede com acompanhamento do decaimento da continuidade do sistema, a partir da determinação da proporção de caminhos válidos que ainda restam na rede após a remoção de um determinado número de vias. Foi constatado que a centralidade de intermediação é o parâmetro que melhor reflete a vulnerabilidade do sistema, já que a estratégia de ataque baseada neste parâmetro apresentou uma redução média de 68% na área sob a curva de continuidade se comparada ao caso de um ataque aleatório. Os resultados também constataram que a remoção aleatória de menos de 40% das arestas possui pouca influência na continuidade de rede se comparada aos métodos determinísticos a partir de centralidade de intermediação, grau e proximidade. Com a remoção de 40% das arestas ou mais (grandes impactos no sistema), a estratégia de remover primeiramente as arestas de menor centralidade de intermediação apresenta melhores resultados. Por fim, foi construído um mapa de vulnerabilidade para o estudo de caso na cidade de São Carlos-SP a partir da centralidade de proximidade desta rede.

ABSTRACT

The design and maintenance of sustainable and resilient transport systems depends on the identification of potential vulnerabilities in the system before crises occur so that infrastructure and strategies of action in times of crisis are efficiently developed. However, given the great complexity of transport systems, the methods proposed for vulnerability verification are generally difficult to implement and require data that is inaccessible to most Brazilian municipalities. With this in mind, and in order to simplify the preliminary analysis of a system in the search for vulnerabilities, the purpose of this paper is to present the network parameter that best represents local vulnerability in terrestrial transport networks of Brazilian cities based on graph theory. The method applied in the study was based on the systematic degradation of the network and further monitoring of the proportion of valid paths still remaining in the network after the removal of a determined number of street segments. It was verified that betweenness centrality is the parameter that best reflects the vulnerability of the system, since the strategy of attack based on this parameter presented a mean reduction of 68% in the area under the continuity curve when compared to the case of a random attack. The results also showed that the random removal of less than 40% of the edges has little influence on the continuity of the network if compared to the deterministic methods from the centrality of intermediation, degree and proximity. From the removal of 40% of the edges (large impacts on the system), the strategy of first removing the edges of lower intermediation centrality presents better results. Finally, a vulnerability map was built for the case study in the city of São Carlos-SP, based on the proximity of this network.

1. INTRODUÇÃO

Estudos de resiliência têm ganhado enfoque devido à sua importância instrumental na construção e manutenção de sistemas sustentáveis de transportes. Os deslocamentos em massa de bens e pessoas são fundamentais para a economia e o estilo vida contemporâneos, contudo, os sistemas que fazem esses deslocamentos possíveis possuem certa fragilidade, sendo constantemente sujeitos a congestionamentos, superlotações e atrasos generalizados. Além disso, fenômenos naturais também possuem impacto significativo nas redes de transporte terrestre, o que pode ser verificado de maneira muito clara em enchentes e alagamentos que limitam o trânsito tanto de veículos quando de pessoas a depender de sua intensidade. Por conta

disso, existe grande interesse em estudar resiliência urbana já que cidades resilientes possuem maior flexibilidade de operação, sendo capazes de lidar melhor com imprevistos. O papel central da resiliência em sistemas de infraestrutura urbana deve se consolidar com as mudanças climáticas que acontecem na atualidade e seu potencial de exacerbar eventos já catastróficos, tonando cada vez mais importante que cidades sejam adaptáveis e capazes de resistir aos impactos com o menor custo social, técnico e econômico possível.

Resiliência possui várias definições. Uma das mais úteis para sistemas de transporte talvez seja: a habilidade inerente de um sistema em se adaptar a situações adversas evitando perdas em potencial (Westrum, 2006). Nesse contexto, medir resiliência de maneira precisa, depende de suposições sobre o tipo de evento que gerará um impacto no sistema e os elementos do sistema que serão atingidos. Assim, estudos de resiliência possuem duas categorias: (1) os específicos, que analisam o impacto de um evento ou choque específico; e (2) os generalizados que se interessam pela capacidade do sistema em resistir choques de maneira geral, mesmo quando esses não têm seu efeito conhecido a priori (Folke *et al.*, 2010). Este trabalho explora a segunda categoria de resiliência a partir de uma análise genérica de impactos da rede de transporte. O objetivo principal deste trabalho é a determinação do parâmetro local de rede que mais reflete a resiliência/vulnerabilidade do sistema. O enfoque da análise foi dado a características topológicas da rede, obtidas da teoria dos grafos, de forma a verificar as características locais de redes que favorecem ou prejudicam a continuidade do sistema de transportes. Como objetivo secundário, determinou-se a construção de um mapa de vulnerabilidade a partir da métrica que melhor representa a vulnerabilidade do sistema.

2. TRABALHOS ANTERIORES

No âmbito dos transportes, existem trabalhos específicos e generalistas. A análise específica é contemplada em estudos que consideram fenômenos recorrentes como congestionamentos e perturbações geradas por acidentes em regiões onde esses são mais prováveis (Cox, Prager e Rose, 2011; Wang *et al.*, 2015). Além disso, análises mais específicas foram propostas em outros estudos, que consideram desastres naturais como tempestades e enchentes (Litman, 2005; Lu, Peng e Zhang, 2014; Morelli e Cunha, 2019) e outros que estudam possíveis crises de abastecimento de petróleo e seus impactos no sistema de transportes (Newman, Beatley e Boyer, 2009; Martins, Rodrigues da Silva e Pinto, 2019). Essas análises específicas, em geral, dependem de dados complexos e de difícil obtenção, o que inviabiliza a análise em grande parte das cidades brasileiras nas quais até mesmo pesquisas origem destino (OD) são raras. Com relação à visão generalizada de resiliência, os estudos em transportes focaram na dependência da rede em elementos específicos, da conectividade e da redundância de caminhos em redes de transportes, levando em consideração o formato da rede de transportes para a identificação de possíveis vulnerabilidades de transporte (Leu, Abbass e Curtis, 2010; Ip e Wang, 2011; Zhang, Miller-Hooks e Denny, 2015). Contudo, apesar de alguns trabalhos parecerem facilmente aplicáveis a diversas redes urbanas, nenhum deles se propôs a comparar um número significativo de cidades, com a maioria apresentando a comparação de duas ou três redes, quando essa comparação existe, impossibilitando a determinação de quais parâmetros de fato influem na resiliência de rede.

Com relação às métricas construídas a partir da teoria dos grafos para determinação de resiliência, Appert e Chapelon (2007) desenvolveram métricas de vulnerabilidade interessantes para serem aplicadas na cidade de Montpellier, na França. As métricas se baseiam essencialmente no impacto que a remoção de uma aresta ou nó tem no comprimento dos

caminhos mínimos na rede. A lógica é que se uma conexão causa aumento significativo no comprimento médio dos caminhos mínimos de uma cidade, essa conexão deve possuir importância maior na rede. Contudo, existem problemas com essa abordagem, sendo o mais imediato o fato de, no caso de uma aresta ser a única conexão entre duas regiões de uma cidade, como uma ponte única entre dois lados de um rio, não é possível calcular o índice já que grande parte dos caminhos mínimos são de fato inviabilizados. Outro problema é a carga computacional requerida para o cálculo da vulnerabilidade em grandes redes. Isso acontece porque para cada aresta ou nó, deve ser removido o elemento e recalculados todos os caminhos na nova rede, o que inviabiliza o uso de atalhos computacionais geralmente utilizados no cálculo de centralidades.

Berche *et al.* (2009) estudaram a resiliência de 14 sistemas de transporte público sob a ótica da remoção de ligações no sistema, ao que denominam “ataques” ao sistema. A discussão interessante levantada pelos autores é a de que existem vários tipos de estratégia de ataque a esses sistemas, podendo-se remover ligações de acordo com vários critérios, sendo alguns critérios mais prejudiciais que outros ao sistema. Para encontrar as estratégias mais efetivas de ataque, os autores utilizaram-se da teoria dos grafos. Os autores descobriram que remover os nós de uma rede em ordem decrescente de centralidade de intermediação ou de grau médio geram impactos mais rapidamente, reduzindo significativamente o tamanho do maior bloco conectado de um sistema de transporte público com uma pequena proporção de nós removidos. Rodríguez-Núñez e García-Palomares (2014) conduziram uma análise similar utilizando o transporte público da cidade de Madrid, na Espanha. A abordagem foi mensurar o impacto em termos de tempo de viagem que a falha de uma linha de metrô causaria para os usuários. Os autores também analisaram o número de viagens de metrô que são impossibilitadas devido à remoção de segmentos do sistema, já que em vários casos viagens se tornam inviáveis no caso de uma remoção. O trabalho proposto é construído a partir das bases desses trabalhos relatados, com expansões metodológicas para a aplicação em redes viárias urbanas e analisa as 309 maiores cidades brasileiras em busca de verificar as métricas da teoria dos grafos que podem ser utilizadas para avaliação da vulnerabilidade local nas cidades.

3. MÉTODO PROPOSTO

Este trabalho leva em consideração as cidades brasileiras com população superior a 100 mil habitantes, o que constitui um total de 309 centros urbanos (IBGE, 2018). São propostas quatro etapas para acessar o parâmetro que melhor reflete a vulnerabilidade local em uma rede de transportes:

- Extração de grafo representativo da rede;
- Cálculo de medidas de centralidade;
- Geração de cenários de impacto (ataques ao sistema);
- Determinação da estratégia que melhor reflete a vulnerabilidade do sistema.

3.1. Extração de grafos

Na primeira etapa do trabalho, foram extraídos os grafos representativos das redes da plataforma de mapeamento colaborativo *OpenStreetMap* (OpenStreetMap, 2019). Nela, os municípios estão cadastrados no sistema *Nominatim* (OpenStreetMap Nominatim, 2019) onde estão registrados os limites dos municípios, bem como o ponto central da cidade. Essas informações foram, em sua maioria, cadastradas na plataforma a partir de dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), incluindo os pontos centrais como definidos pelo órgão, sendo muitas vezes marcados por uma estrutura de importância para o município ou

monumento. Para auxiliar a extração do grafo representativo da malha da cidade foi utilizada a biblioteca para a linguagem Python de programação, *OSMnx* (Boeing, 2017).

Os grafos não são extraídos de forma a representar toda a região contida nos limites municipais já que grande parte das cidades possui pouca urbanização proporcionalmente à área municipal. Nesse caso, como esta análise está mais focada em regiões urbanizadas, foram considerados apenas os 100 km² mais centrais dos municípios (centralizados no centro de maior atividade econômica, não necessariamente o centro geométrico). Para tal, foram extraídas informações sobre as vias apenas do quadrado de 10 km de lado centrado no centro da cidade, o que é suficiente para englobar a maioria das regiões urbanizadas completamente e, mesmo em casos em que isso não acontece, o quadrado engloba a região mais economicamente importante da cidade. Para este trabalho, foram considerados os grafos não direcionados para as redes, simplificação que permite cálculo mais eficiente das métricas propostas, permitindo que o método fosse aplicado a todas as cidades do banco de dados. Como exemplo de grafos extraídos, a Figura 1 contém os grafos das cidades de São Carlos-SP e Florianópolis-SC.

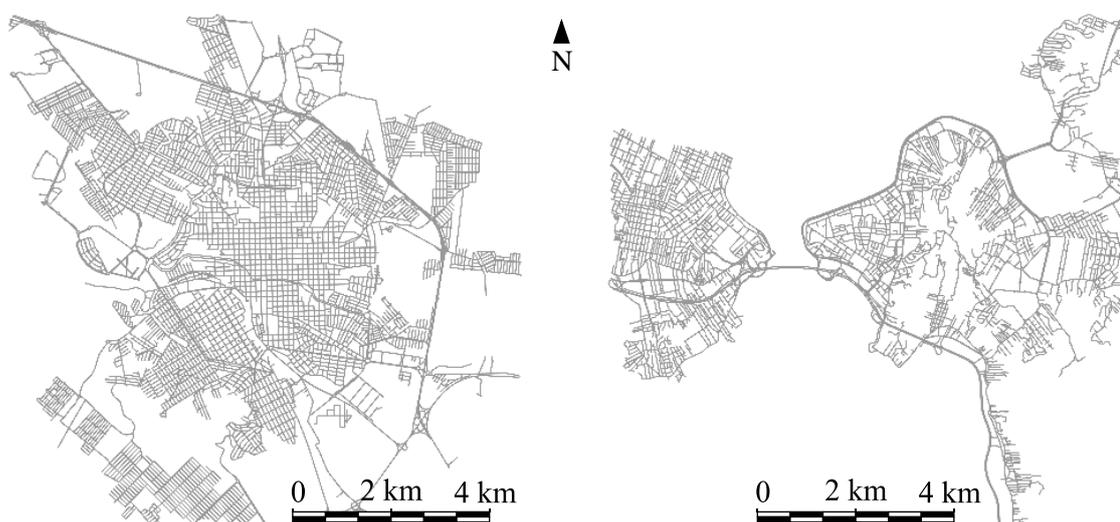


Figura 1: Grafos das cidades de São Carlos-SP (esquerda) e Florianópolis-SC (direita).

3.2. Cálculo de medidas de centralidade

Centralidades são métricas da teoria dos grafos que definem como um elemento do grafo (nó ou aresta) se relaciona com todos os demais elementos da rede. Essas métricas dependem apenas das características dos grafos e podem ser facilmente calculadas através da biblioteca para a linguagem Python de programação *NetworkX* (Hagberg, Schult e Swart, 2008). Foram calculados três tipos de centralidade para os grafos extraídos:

Centralidade de Proximidade: expressa a proximidade de um elemento a todos os outros. Elementos mais centrais na rede possuem menores distâncias médias a todos os outros elementos e por isso possuem maior **proximidade** no grafo. Esta centralidade é definida como o inverso da distância média de um nó a todos os outros do grafo, normalizada pelo número de nós em um grafo:

$$C_c(v) = \frac{N}{\sum_{t \in V} d(v, t)} \quad (1)$$

em que: N: número de nós pertencentes ao grafo;

v: nó de referência para o cálculo da centralidade;
t: nó pertencente ao grafo diferente de v;
d(v,t): distância do nó v ao nó t

Como neste trabalho são tomadas as arestas do grafo como referência, considera-se que a centralidade de proximidade de uma aresta ($C_c(a)$) pode ser definida como a média aritmética das centralidades de seus nós extremos.

Centralidade de Intermediação: expressa quanto uma determinada aresta é importante como conector dentro de uma rede. Quanto maior o número de caminhos mínimos passando por uma aresta maior a sua centralidade de intermediação e, conseqüentemente, maior sua importância para as viagens em uma rede urbana. A centralidade de intermediação é definida por:

$$C_b(a) = \sum_{s \neq t \in V} \frac{\sigma_{st}(a)}{(N-1)(N-2) \cdot \sigma_{st}} \quad (2)$$

Em que: N: número de nós pertencentes ao grafo;
a: aresta de referência para o cálculo da centralidade;
v: nó do grafo;
t: nó pertencente ao grafo diferente de v;
 $\sigma_{st}(a)$: número de caminhos mínimos saindo de s que passam pela aresta a
 σ_{st} : número de caminhos mínimos saindo de s

Centralidade de Grau: centralidade de grau expressa a conectividade local de um nó. Quanto maior o número de arestas conectadas a um determinado nó, maior será sua centralidade de grau, de forma que a centralidade de grau pode ser definida, em sua forma normalizada, como:

$$C_g(v) = \frac{g(v)}{N} \quad (3)$$

Em que: N: número de nós pertencentes ao grafo;
g(v): grau do nó v.

Como neste trabalho são tomadas as arestas do grafo como referência, considera-se que a centralidade de grau de uma aresta ($C_g(a)$) pode ser definida como a média aritmética das centralidades de seus nós extremos.

3.3. Geração de cenários

Os cenários foram gerados a partir da remoção sistemática de arestas na rede de maneiras diferentes, levando em consideração as centralidades dos grafos. A remoção de arestas é análoga à inviabilização do tráfego através da via representada pela aresta e existem várias maneiras de alcançar isso em um grafo representativo da rede, a que podemos chamar estratégias de ataque ao sistema (Berche *et al.*, 2009). A estratégia de ataque mais simples é a remoção de arestas de forma aleatória em um grafo, contudo regras mais complexas podem ser utilizadas para maximizar ou reduzir o impacto de um ataque, como ataques utilizando a centralidade dos elementos do grafo. Neste trabalho, foram utilizadas sete heurísticas de remoção de arestas. Como grupo controle foi utilizada a remoção aleatória de arestas, enquanto as outras heurísticas removem as arestas em ordem de centralidade (as três centralidades sendo removidas de maneira ascendente e descendente, totalizando seis cenários).

Definidos os cenários, definiu-se a continuidade de rede como métrica a ser utilizada para os cenários. Uma rede começa a perder continuidade quando suas regiões internas são isoladas umas das outras devido a um choque. A Figura 2 ilustra dois caminhos em uma rede urbana com dois blocos separados por um rio. No evento de um problema com a única ponte que conecta as duas regiões, os dois blocos são desconectados, tornando a Rota A inválida, o que não aconteceria se houvesse redundância conectiva entre os dois lados do rio. Nesse caso, não apenas a Rota A, mas todas as rotas conectando um lado a outro do rio são inviabilizadas nesse evento, reduzindo pela metade o número de rotas válidas na rede. Assim, a medida de continuidade após um impacto na rede, depende diretamente do número de rotas válidas que restam após esse impacto.

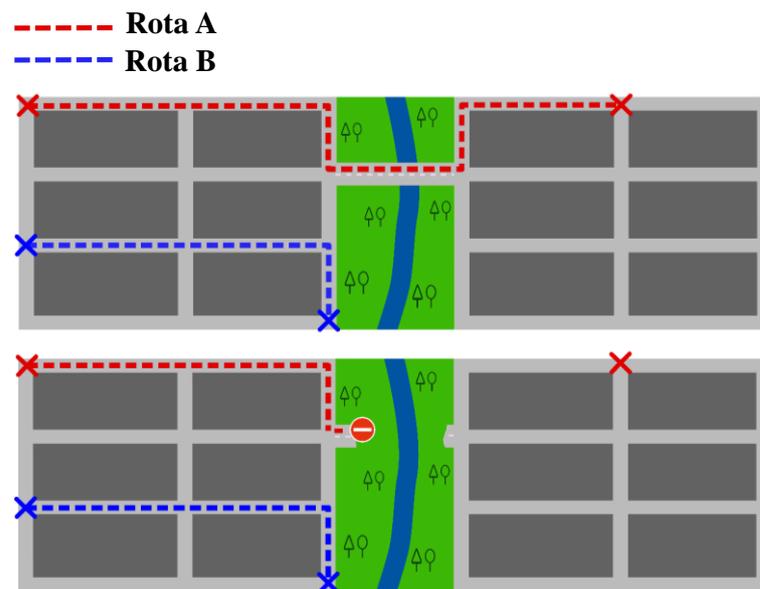


Figura 2: Exemplificação de um evento que causa a perda de rotas válidas em uma rede de transportes.

Em um grafo representativo da rede de transportes, considera-se rota válida qualquer rota possível que conecte dois vértices da malha. Essa simplificação assume que os destinos das viagens se encontram sempre nas interseções do sistema viário, o que não prejudica o modelo, dado o tamanho reduzido dos blocos em uma região urbana típica. Assim, para medir o número de rotas válidas na rede é necessário apenas determinar quais vértices no grafo estão conectados. Pode-se fazer isso através dos blocos completamente conectados do grafo já que, por definição, um bloco conectado em um grafo não direcionado é uma região em que todos os vértices são acessíveis a partir de qualquer outro vértice, de forma que se um bloco conectado possui N vértices, ele necessariamente possui $N(N-1)$ rotas válidas. Dessa forma, o número de rotas válidas nos grafos avaliados é dado pelo somatório das rotas de seus componentes completamente conectados:

$$\text{Caminhos Válidos} = \sum_{G' \in G} N_{G'}(N_{G'} - 1) \quad (4)$$

Em que: G : Grafo de referência;
 G' : Componente fortemente conectada de G ;
 $N_{G'}$: Número de nós na componente G'

A partir da Equação 4, o método proposto baseou sua análise na evolução do número de rotas

válidas a partir da remoção gradativa de arestas.

3.4. Determinação do parâmetro que melhor reflete a vulnerabilidade do sistema.

Para a determinação do parâmetro que melhor reflete a vulnerabilidade do sistema, foram analisados o comportamento da continuidade do sistema a partir da remoção sistemática de vias de acordo com um determinado parâmetro do sistema. Uma estratégia de ataque que resulte numa queda mais abrupta da continuidade do sistema é mais danosa a ele, o que significa que o parâmetro base para a estratégia tem maior significância na mensuração da vulnerabilidade de um sistema. Assim, o parâmetro cuja estratégia, em média, causa a maior perda de continuidade pode ser considerado o parâmetro crítico para a vulnerabilidade de rede.

4. RESULTADOS

Para cada um dos sete cenários criados, foram retiradas arestas seguindo a estratégia base em passos de 1% até que todas as arestas da rede fossem removidas. Para cada passo, o total de caminhos válidos na rede foram computados e divididos pelo total de caminhos válidos originalmente na rede (antes de um ataque). A estratégia de remoção aleatória de arestas foi conduzida com 10 sementes aleatórias diferentes e a curva plotada refere-se à média desses casos. Isso foi feito para capturar o comportamento médio de uma estratégia de natureza estocástica. Por outro lado, as outras seis estratégias são determinísticas, dependendo de um parâmetro intrínseco da rede e não requerendo repetição do processo. Os resultados para as cidades de São Carlos-SP e Florianópolis-SC podem ser verificados na Figura 3. Nota-se que nesses casos, a estratégia aleatória é a que menos prejudica o sistema inicialmente, enquanto as estratégias de remoção de centralidade de intermediação descendente (primeiro as maiores centralidades) e de grau ascendente (primeiro as arestas com menor grau). A estratégia de remoção de centralidades de intermediação descendente se mostrou mais robusta para impactos mais generalizados, sendo a que menos impacta o sistema em choques que inviabilizem mais de 50% das vias nessas cidades.

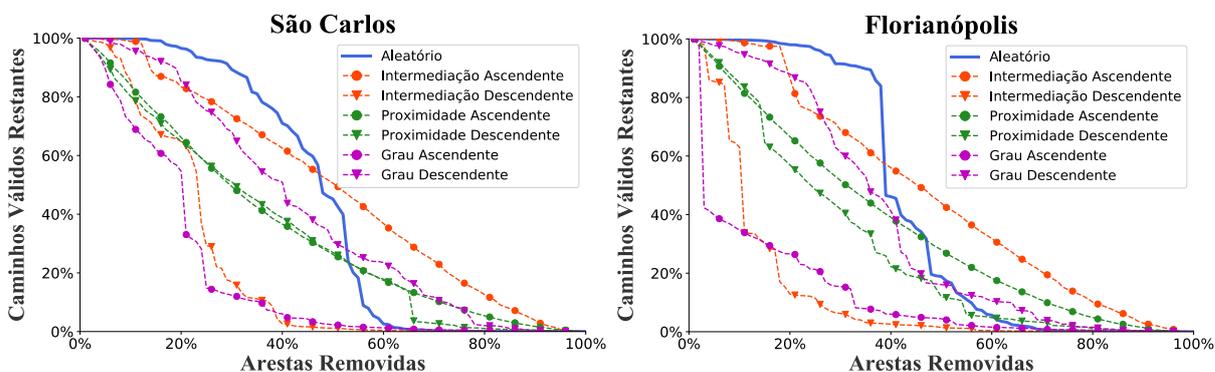


Figura 3: Gráficos de decaimento de caminhos válidos nas redes de São Carlos-SP (esquerda) e Florianópolis-SC (direita).

Nota-se também que a rede de Florianópolis-SC tem decaimento muito rápido no início com a estratégia de centralidade de intermediação descendente ou grau descendente, o que ocorre devido à dependência das pontes que conectam a ilha ao continente para a integração do município. Quando a ponte é removida do sistema, as duas regiões ficam isoladas entre si, causando uma grande perda de continuidade.

A Figura 4 contém o gráfico do comportamento médio das estratégias em cidades brasileiras. Pode-se notar que o comportamento verificado nas cidades anteriores é de certa forma refletido

nesse resultado, a estratégia aleatória sendo menos prejudicial em impactos menores e a centralidade de intermediação descendente e a de grau ascendente sendo as mais prejudiciais como um todo. A centralidade de proximidade se configura como um meio termo, não refletindo bem a resiliência ou a vulnerabilidade do sistema. Isso acontece pelo fato de a estratégia de remoção centralidade de proximidade corroer a rede a partir de seu centro, não necessariamente dividindo a rede, já que as ligações da periferia continuam intactas (ou, no caso ascendente, de fora para dentro deixando o centro intacto).

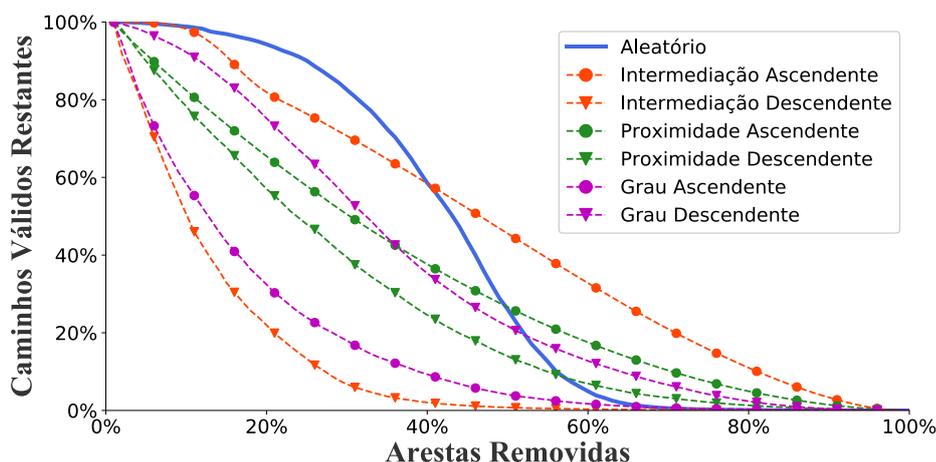


Figura 4: Comportamento médio nas 309 maiores cidades brasileiras.

Os resultados apresentam forte indicativo de que as vias de maior centralidade de intermediação se colocam como regiões de vulnerabilidade no sistema, apresentando o maior impacto na conectividade de sistemas urbanos brasileiros. Para uma avaliação numérica, a Tabela 1 possui a área sob as curvas da Figura 4. Nota-se que a Centralidade de Intermediação possui o menor resultado (maior vulnerabilidade) apresentando uma área sob a curva 68% menor que no caso aleatório para a estratégia ascendente e o menor resultado (menor vulnerabilidade) para sua estratégia descendente, inclusive superando o modelo aleatório, com uma área sob a curva 12% maior. Contudo, como notado anteriormente, a centralidade de intermediação descendente tende a ter um resultado pior que o aleatório para choques brandos que atinjam menos de 40% da malha urbana.

Tabela 1: Área sob as curvas da Figura 4.

Estratégia	Área Sob a Curva	
	Ascendente	Descendente
Centr. Intermediação	0,46	0,13
Centr. Proximidade	0,34	0,27
Centr. Grau	0,17	0,35
Aleatório = 0,41		

Para avaliar a dispersão dos resultados, a Figura 5 contém os gráficos do comportamento médio dos resultados no banco de dados com uma envoltória representando um desvio padrão para cima e um para baixo a partir da média para os parâmetros de resultados mais expressivos. Nota-se que existe uma grande região de interseção entre as estratégias que tornam o sistema mais vulnerável (intermediação descendente e grau ascendente). Contudo, a estratégia de intermediação ainda se mostra claramente mais indicativa da vulnerabilidade do sistema. No outro espectro, a estratégia de remover arestas pela intermediação de forma ascendente se

mostra uma estratégia muito consistente, apresentando uma curva de média alta e desvio reduzido em todos os pontos.

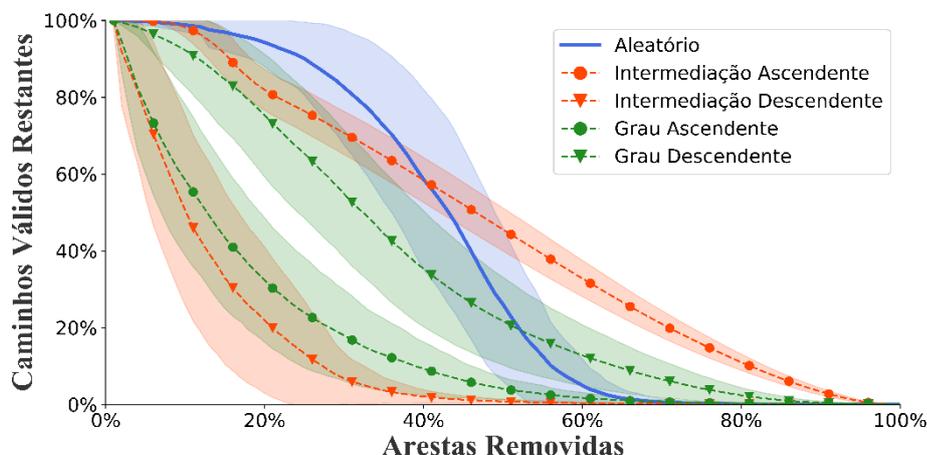


Figura 5: Comportamento médio das curvas com envoltória representando um desvio padrão para cima e um para baixo.

A partir desses comportamentos, constata-se que a centralidade de intermediação se configura como o melhor parâmetro para identificar vulnerabilidades no sistema, pois se notou que remover sistematicamente as vias de maior intermediação causa danos em média mais expressivos que qualquer outra estratégia. Nesse caso, pode-se gerar mapas de fragilidade do sistema viário a partir da ordenação das vias pela sua centralidade de intermediação e constatar as regiões de uma cidade que são mais vulneráveis a possíveis falhas do sistema. O mapa de vulnerabilidade da região urbana de São Carlos é mostrado na Figura 6.

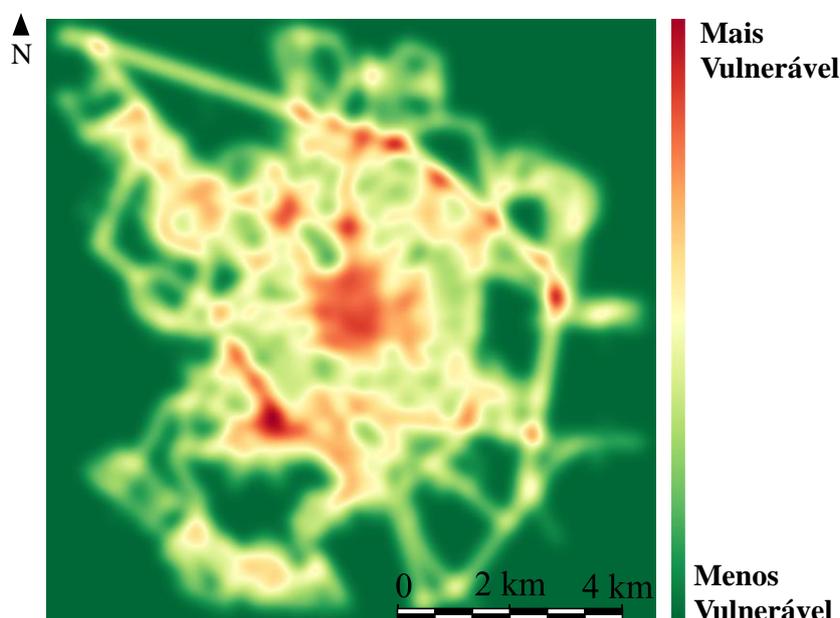


Figura 6: Mapa de vulnerabilidade da cidade de São Carlos-SP

O mapa da Figura 6 foi gerado a partir da rasterização dos elementos do grafo de acordo com o rank de sua centralidade de intermediação, com posterior suavização do resultado da imagem através de um desfoque gaussiano de desvio padrão de 20 pixels, sendo cada pixel

representativo de 5 m na escala da imagem. Na imagem, quanto mais vermelha a região, maior o impacto de um evento que venha a inutilizar a rede de transportes como, por exemplo, um alagamento. Espera-se também que ineficiências no sistema de transportes que venham a gerar congestionamentos sistemáticos nas regiões mais vulneráveis sejam mais impactantes para o sistema, já que essas são as regiões mais importantes para promover a conectividade no sistema como um todo.

5. CONCLUSÕES

O trabalho apresentado teve como objetivo a determinação do parâmetro da teoria dos grafos que melhor representa a vulnerabilidade das redes de transporte terrestre nas cidades brasileiras. A metodologia utilizada no estudo foi a degradação sistemática da rede com acompanhamento do decaimento da continuidade do sistema, a partir da determinação da proporção de caminhos válidos que ainda restam na rede após a remoção de um determinado número de vias. Essa é uma nova maneira de se analisar resiliência do ponto de vista estrutural na rede, que consiste em uma contribuição deste trabalho à literatura científica e embasa um esforço para entender de maneira mais abrangente a maneira como a morfologia de uma rede pode influenciar em sua resiliência/vulnerabilidade.

Foi constatado que a centralidade de intermediação é o parâmetro que melhor reflete a vulnerabilidade do sistema, com uma redução de 68% da área sob a curva de continuidade se comparado ao caso aleatório, enquanto o parâmetro centralidade de proximidade apresentou o menor desempenho. A remoção sistemática de maneira aleatória apresentou um impacto brando no sistema se comparado às outras estratégias, principalmente quando se trata de remoções de menor escala (menos que 40% da rede removida). Esse é um indício de que estratégias que impactam o sistema de maneira determinística reduzem mais a continuidade do sistema o que ocorre, possivelmente, porque os parâmetros avaliados tendem a possuir uma variação suave na rede, com elementos de alta centralidade ficando, em média, próximos de outros elementos de alta centralidade o que significa, efetivamente, que porções de arestas relativamente próximas são removidas (possuindo maior tendência a desconectar o sistema) em métodos determinísticos, enquanto o método aleatório tende a distribuir o impacto pela rede. Contudo, métodos de remoção determinísticos tendem a representar de maneira mais realista os impactos na rede. Fenômenos naturais, por exemplo, tendem a atingir uma região ampla no espaço e não seções aleatórias da cidade.

Com a criação do mapa de vulnerabilidade de um sistema a partir do parâmetro mais importante (centralidade de intermediação), foi possível verificar regiões críticas do sistema de transporte terrestre, evidenciando a utilidade da ferramenta para auxiliar na verificação de potenciais impactos. Um mapa de riscos de impactos por fenômenos naturais (como alagamentos) pode, por exemplo, ser sobreposto ao mapa de vulnerabilidade de rede para auxiliar na decisão de prioridades de atendimento a problemas no sistema e expansão de infraestrutura de contenção, o que pode ser objeto de trabalhos futuros.

Neste trabalho foi considerada apenas a continuidade do sistema, não sendo analisada a distância efetiva que os caminhos válidos possuem. Em trabalhos futuros, é possível que conclusões interessantes sejam tiradas da evolução do comprimento médio dos caminhos mínimos de acordo com a estratégia de ataque na rede. Além disso, remenda-se que trabalhos futuros considerem também grafos direcionados, o que pode gerar resultados ligeiramente diferentes, apesar de requer um tempo de processamento significativamente maior.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Appert, M. e Chapelon, L. (2007) “Measuring urban road network vulnerability using graph theory: The case of Montpellier’s road network”, *La mise en carte des risques naturels*.
- Berche, B. et al. (2009) “Resilience of public transport networks against attacks”, *European Physical Journal B*. doi: 10.1140/epjb/e2009-00291-3.
- Boeing, G. (2017) “OSMnx: New methods for acquiring, constructing, analyzing, and visualizing complex street networks”, *Computers, Environment and Urban Systems*. doi: 10.1016/j.compenvurbsys.2017.05.004.
- Cox, A., Prager, F. e Rose, A. (2011) “Transportation security and the role of resilience: A foundation for operational metrics”, *Transport Policy*. doi: 10.1016/j.tranpol.2010.09.004.
- Folke, C. et al. (2010) “Resilience thinking: Integrating resilience, adaptability and transformability”, *Ecology and Society*. doi: 10.5751/ES-03610-150420.
- Hagberg, A. A., Schult, D. A. e Swart, P. J. (2008) “Exploring network structure, dynamics, and function using NetworkX”, in *Proceedings of the 7th Python in Science Conference (SciPy)*.
- IBGE (2018) *IBGE / Portal do IBGE*. Available at: <https://www.ibge.gov.br/> (Acessado: 23 de março de 2019).
- Ip, W. H. e Wang, D. (2011) “Resilience and friability of transportation networks: Evaluation, analysis and optimization”, *IEEE Systems Journal*. doi: 10.1109/JSYST.2010.2096670.
- Leu, G., Abbass, H. e Curtis, N. (2010) “Resilience of ground transportation networks: a case study on Melbourne”, *33rd Australian Transport Research Forum Conference*.
- Litman, T. (2005) “Lessons From Katrina and Rita: What Major Disasters Can Teach Transportation Planners”, *Journal of Transportation Engineering*. doi: 10.1061/(asce)0733-947x(2006)132:1(11).
- Lu, Q.-C., Peng, Z.-R. e Zhang, J. (2014) “Identification and Prioritization of Critical Transportation Infrastructure: Case Study of Coastal Flooding”, *Journal of Transportation Engineering*. doi: 10.1061/(asce)te.1943-5436.0000743.
- Martins, M. C. da M., Rodrigues da Silva, A. N. e Pinto, N. (2019) “An indicator-based methodology for assessing resilience in urban mobility”, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. doi: 10.1016/j.trd.2019.01.004.
- Morelli, A. B. e Cunha, A. L. (2019) “Uma estratégia para avaliação do impacto de alagamentos em sistemas urbanos de transportes”, in *Artigo Submetido ao 33º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte*.
- Newman, P., Beatley, T. e Boyer, H. (2009) “Resilient cities: Responding to peak oil and climate change”, *Australian Planner*. doi: 10.1080/07293682.2009.9995295.
- OpenStreetMap* (2019). Available at: www.openstreetmap.org.
- OpenStreetMap Nominatim: Search* (sem data). Available at: <https://nominatim.openstreetmap.org/> (Acessado: 24 de março de 2019).
- Rodríguez-Núñez, E. e García-Palomares, J. C. (2014) “Measuring the vulnerability of public transport networks”, *Journal of Transport Geography*. doi: 10.1016/j.jtrangeo.2014.01.008.
- Wang, Y. et al. (2015) “Day-to-day congestion pricing and network resilience”, *Transportmetrica A: Transport Science*. doi: 10.1080/23249935.2015.1087234.
- Westrum, R. (2006) “A typology of resilience situations”, in *Resilience engineering: Concepts and percepts*.
- Zhang, X., Miller-Hooks, E. e Denny, K. (2015) “Assessing the role of network topology in transportation network resilience”, *Journal of Transport Geography*. doi: 10.1016/j.jtrangeo.2015.05.006.

André Borgato Morelli (andre.morelli@usp.br)

André Luiz Cunha (alcunha@usp.br)

Departamento de Transportes, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo
Av. Dr. Carlos Botelho, 1465 – São Carlos, SP, Brasil