

## DETERMINANDO LINKS CRÍTICOS EM UMA REDE VIÁRIA: INDICADORES DE VULNERABILIDADE

**Eduardo Leal de Oliveira**

**Licínio da Silva Portugal**

**Walter Porto Jr.**

Programa de Engenharia de Transportes da COPPE  
Universidade Federal do Rio de Janeiro

### RESUMO

O presente artigo apresenta o conceito de vulnerabilidade como um dos atributos de desempenho de uma rede viária. São discutidas as semelhanças do conceito de vulnerabilidade com outros atributos de desempenho. É comentada a relação da vulnerabilidade com o congestionamento. São revisados os principais indicadores de vulnerabilidade encontrados na literatura e comentados os procedimentos para sua determinação. É verificado que o cerne das diferentes metodologias para a determinação da vulnerabilidade é o mesmo, tendo como diferença mais marcante o método de alocação de viagens.

### ABSTRACT

This paper presents the concept of vulnerability as one of the road network performance characteristics. Similarities between the concept of vulnerability and other performance characteristics are discussed. It is also discussed the relation between vulnerability and congestion. The main vulnerability indicators found in the literature are reviewed and the procedure for its determination is commented. It is observed that the different methodologies for the determination of the network vulnerability share a common core, the main difference being the trip allocation method used.

### 1. INTRODUÇÃO

O desempenho adequado de uma rede viária tem importância crescente na economia atual, podendo ser considerado como um dos fundamentos da sociedade moderna (Jenelius e Mattson, 2012). O sintoma mais visível do mau desempenho de uma rede é a presença de trechos congestionados, no entanto, o grau de congestionamento não é o único atributo pelo qual se pode medir o desempenho de uma rede viária. De fato, eventos de diversas naturezas podem provocar a degradação da rede viária. Esses eventos podem ser endógenos ao sistema, como colisões de veículos, falhas em semáforos ou obras de construção ou reparação de vias. Nesses casos, tipicamente, um link da rede é comprometido. Outros eventos podem comprometer vários links, como os derivados de fenômenos naturais (inundações, terremotos, etc.) ou mesmo antropogênicos, como atentados terroristas (Jenelius e Mattson, 2012; Knoop *et al.*, 2012). A vulnerabilidade de uma rede a eventos aleatórios como os citados é um atributo que deve ser investigado quando se deseja avaliar o seu desempenho.

Grant *et al.* (2011) abordam questões que devem ser consideradas para a determinação de objetivos para a gerência de congestionamentos. Nem sempre o trecho mais congestionado é o trecho mais crítico no que diz respeito ao desempenho da rede. Um desdobramento dessa abordagem seria determinar quais as medidas prioritárias para mitigar as eventuais consequências negativas e melhorar o desempenho da rede. Para tal, é necessário verificar, dentre os links que compõem a rede, quais os mais críticos para o desempenho global dessa

rede, ou seja, não o simples desempenho do link *de per si*, mas esse desempenho contextualizado no sistema viário.

Indicadores de congestionamento, tais como os apresentados nos relatórios do Texas Transportation Institute (Schrank *et al.*, 2011), no entanto, não contextualizam adequadamente um link na rede a qual pertence. Com essa mesma restrição, diversos trabalhos foram desenvolvidos apresentando indicadores de congestionamento como base para a avaliação ou monitoramento do desempenho de redes viárias, tais como os desenvolvidos por Elefteriadou *et al.* (2012), Grant *et al.* (2011), Austroads (2009) e OECD/ECMT (2007).

Faz-se necessária, assim, a análise de outros atributos de desempenho de rede, através de indicadores distintos, que permitam a contextualização desejada. De fato, segundo Oliveira (2012), para a hierarquização de projetos de investimentos, por exemplo, devem ser utilizados preferivelmente indicadores normalizados e que cubram os diferentes atributos de desempenho de rede, principalmente aqueles que contextualizem links na rede que os contem, que tendem a produzir ordenações mais confiáveis. Um dos atributos de desempenho cuja avaliação exige a contextualização é o denominado *Vulnerabilidade*, onde são analisadas as consequências para a rede viária da redução da capacidade de um de seus links. Esse atributo vem sendo tratado em estudos tais como os de Jenelius, Petersen e Mattsson (2006), Jenelius e Mattsson (2011, 2012), Knoop *et al.* (2012), Snelder *et al.* (2012), Nicholson (2003) e Berdica (2002).

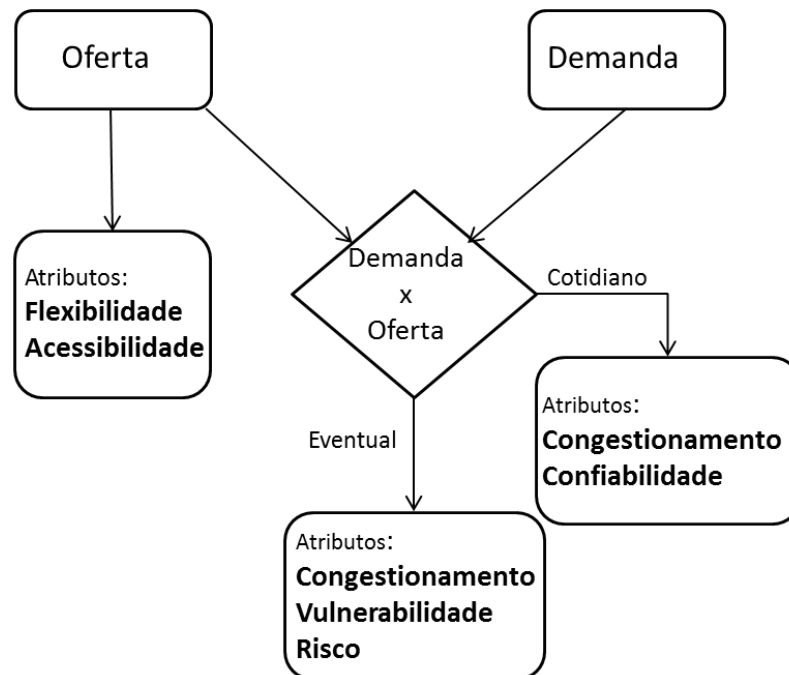
O presente artigo tem por meta caracterizar o referido atributo de desempenho e identificar na literatura indicadores que permitam avaliar a *Vulnerabilidade* em uma rede viária, de forma a que os links que a compõem possam ser hierarquizados com base em quão críticos são para o desempenho da rede como um todo.

## 2. CONCEITUAÇÃO DE VULNERABILIDADE

Oliveira (2012) propõe a avaliação do desempenho de uma rede a partir de atributos de desempenho, dentre os quais:

- a) Congestionamento – diz respeito à fluidez do tráfego e ao nível de serviço oferecido;
- b) Vulnerabilidade – refere-se à resiliência a eventos que possam afetar a um ou mais de seus links;
- c) Risco – associado à vulnerabilidade, está relacionado com a probabilidade da ocorrência de eventos que possam afetar o desempenho da rede;
- d) Confiabilidade – relaciona-se à previsibilidade quanto a tempo e custo de viagem, em condições cotidianas;
- e) Flexibilidade – refere-se à flexibilidade da oferta, ou seja, à existência de rotas alternativas entre pares de origem e destino;
- f) Acessibilidade – diz respeito à facilidade de se deslocar entre zonas de uma região no que diz respeito a tempo e custo de viagem.

A Figura 1 apresenta de forma esquemática os atributos citados e sua relação com a oferta e demanda.



**Figura 1:** Atributos de desempenho

Para cada atributo, há vários indicadores que vêm sendo devidamente estudados, o mesmo ocorrendo com a Vulnerabilidade, tema deste artigo.

Berdica (2002) define a vulnerabilidade de uma rede rodoviária como a suscetibilidade a incidentes que possam reduzir consideravelmente a capacidade de oferecer serviço dessa rede. Define a capacidade de oferecer serviço (*serviceability*) como a possibilidade de usar um determinado *link*, rota ou rede rodoviária durante determinado período de tempo. Jenelius, *et al.* (2006) e Jenelius e Mattsson (2011) apresentam conceito semelhante, quando falam da importância da determinação das ligações críticas, que tornariam uma rede mais vulnerável a incidentes. Um incidente seria um evento capaz de, direta ou indiretamente, interromper ou reduzir a capacidade de serviço de um determinado link, rota ou rede rodoviária. Husdal (2004) confirma esse entendimento, e classifica a vulnerabilidade em três categorias: vulnerabilidade estrutural, vulnerabilidade ligada a fenômenos naturais e vulnerabilidade relacionada ao tráfego. A vulnerabilidade estrutural seria derivada dos atributos da rede viária, não apenas quanto à sua topologia, mas também quanto às características físicas das vias, tais como geometria, largura e gradiente. A vulnerabilidade ligada a fenômenos naturais seria derivada de características do ambiente no qual a rede viária se insere, tais como a topografia e suscetibilidade a fenômenos tais como enchentes, avalanches, nevascas etc. Finalmente, a vulnerabilidade relacionada ao tráfego seria derivada de variações no seu fluxo, além de acidentes e obras de manutenção viária.

D'Este e Taylor (*apud* Nicholson, 2003) não diferem fundamentalmente dos conceitos apresentados, definindo vulnerabilidade como a probabilidade de severas condições adversas ocorrerem devido à degradação de um pequeno número de *links* da rede. Taylor *et al.* (2006), por sua vez, adotam como referência a acessibilidade para a definição da vulnerabilidade; assim, um nó de uma rede seria considerado vulnerável se a degradação substancial de um pequeno número de links reduzisse de forma significativa à acessibilidade desse nó, tal como medida por um índice padrão de acessibilidade. De forma recíproca, um link de uma rede

seria considerado crítico se a degradação de seu desempenho reduzisse de forma significativa à acessibilidade da rede ou de nós de uma rede.

Nicholson e Du (*apud* Nicholson, 2003) consideram que a probabilidade de ocorrência de um evento deve ser incluída na determinação da vulnerabilidade, e não só a medição das consequências da degradação de uma ligação no desempenho da rede. Verifica-se, assim, a associação do risco à vulnerabilidade, cuja avaliação exigiria a estimativa da probabilidade de ocorrência de eventos e suas consequências prováveis, sendo, portanto, de mais difícil determinação. Berdica (2002) define risco como uma composição da probabilidade de um incidente ocorrer e as consequências desse incidente. Erath *et al.* (2010) complementam o conceito, acrescentando a probabilidade de ocorrência de falha na infraestrutura, o que, de certa forma, está implícito quando se fala de consequências, já que a falha na infraestrutura seria um dos desdobramentos possíveis de um evento. Não distinguem, no entanto, os conceitos de vulnerabilidade e risco.

Alguns autores preferem o termo *robustez* para o atributo da rede correspondente ao inverso da vulnerabilidade. Snelder *et al.* (2012) afirmam que quanto mais robusta (ou menos vulnerável) for a rede, menores serão as consequências negativas em seu desempenho em face de um evento que venha a comprometer um ou mais de seus *links*.

A vulnerabilidade é por vezes confundida com a confiabilidade. Li (2008) difere os dois conceitos apresentando a confiabilidade como a probabilidade de uma rede desempenhar em um nível de serviço adequado em determinado período de tempo enquanto que vulnerabilidade (no caso, o inverso de, ou robustez) seria a capacidade da rede de continuar a operar em nível de serviço adequado mesmo em presença de incidentes. Chen *et al.* (2002) tratam vulnerabilidade e confiabilidade de forma integrada, quando apresentam seu indicador de confiabilidade da capacidade viária.

Taylor *et al.* (2006) apresentam argumentos para que se trate a vulnerabilidade, a confiabilidade e o risco como atributos distintos, quando mostram que uma rede com alta confiabilidade e de baixo risco pode ser vulnerável, citando como exemplo a rede de rodovias da Austrália, em particular a Eyre Highway, que liga Perth a Adelaide. Essa rodovia opera normalmente em nível de serviço adequado, sem expectativas de interrupção por fenômenos naturais. No entanto, a ocorrência de uma enchente inesperada provocou um acréscimo de 5.000 km na rota mínima. Como a probabilidade da ocorrência de inundações no local era muito baixa, a queda de desempenho da rede não poderia ser prevista por análises dos atributos de confiabilidade e risco.

Assim, percebe-se que o atributo de desempenho vulnerabilidade, embora distinto, está comumente relacionado aos demais atributos de desempenho de uma rede viária, quais sejam a confiabilidade, a flexibilidade, a acessibilidade e o risco, além do congestionamento, tal como descritos em Oliveira (2012).

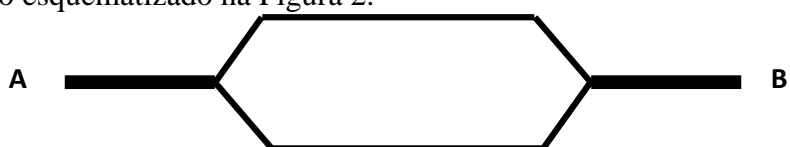
Como conceito, no presente artigo:

*Vulnerabilidade é o atributo de desempenho relacionado ao impacto de eventos aleatórios não recorrentes ou de baixa recorrência em uma rede viária, capazes de comprometer a capacidade de um link ou grupo de links.*

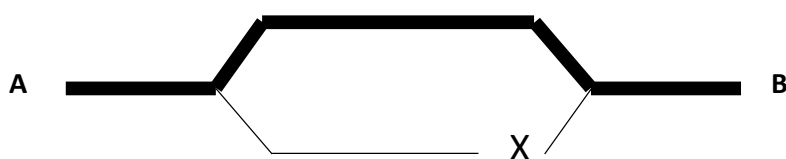
Uma das consequências possíveis desse comprometimento em uma rede vulnerável é o surgimento de congestionamentos, que, no entanto, nem sempre se restringem à vizinhança dos links impactados diretamente pelo incidente.

### 3. CONGESTIONAMENTO E VULNERABILIDADE

Sendo o congestionamento o principal sintoma de mau desempenho de uma rede, é natural que links congestionados sejam o principal foco de análise quando se procura solucionar o correspondente problema de desempenho. Se o congestionamento se dá em consequência de um evento aleatório não cotidiano, como um desastre natural (enchentes, terremotos etc.) ou mesmo eventos antropogênicos endógenos (acidentes de tráfego) ou não (ataques terroristas, manifestações etc.), esse será um indicativo de vulnerabilidade da rede. Em casos como esse, a rede se mostra vulnerável à obstrução ou redução da capacidade de um de seus links ou grupo de links, o que gera congestionamentos. É importante ressaltar que não necessariamente os links congestionados estarão nas proximidades dos links total ou parcialmente obstruídos, podendo o congestionamento ocorrer em rotas alternativas em decorrência da fuga da demanda, como esquematizado na Figura 2.



Tráfego distribuído pelas duas rotas alternativas – antes do incidente



Tráfego concentrado em uma das rotas, sujeito a congestionamento – após o incidente

**Figura 2:** Mudança de rota de A para B em função da obstrução em X

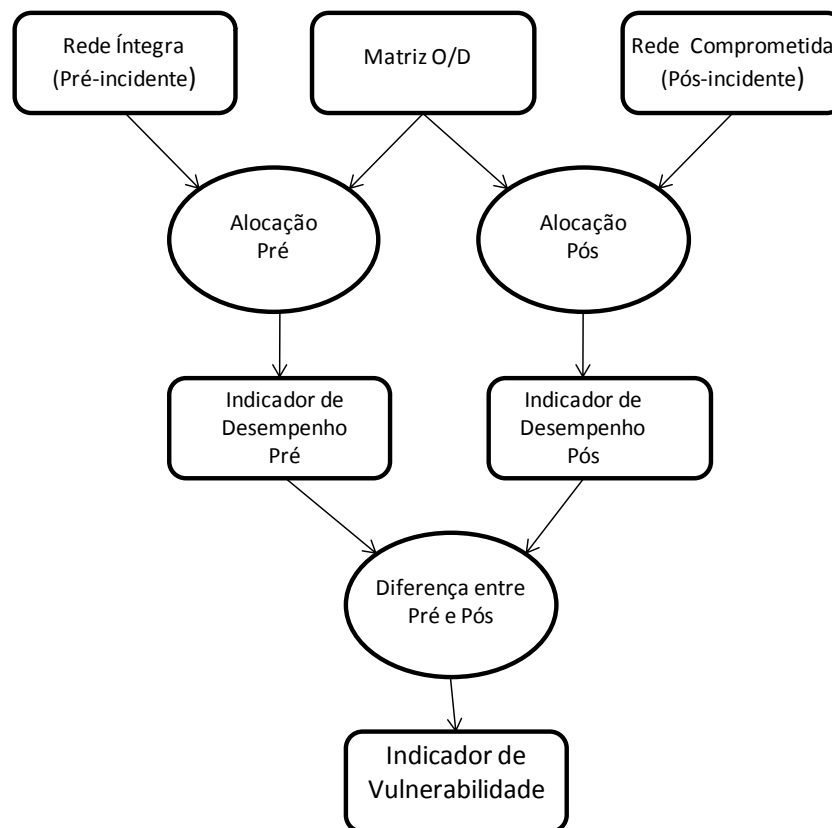
Sendo assim, é importante que, para a análise da vulnerabilidade de uma rede em relação a um determinado link, seja verificado o efeito da redução da capacidade desse link sobre todos os links que compõem a rede. Dessa forma, caso se deseje analisar cada link de uma rede quanto à sua importância no que diz respeito à vulnerabilidade, é necessário criar um modelo representativo da rede viária e realizar alocações de viagens a essa rede simulando a interrupção total ou parcial de cada um de seus links. Através de indicadores adequados, poderão ser identificados os links mais críticos quanto à vulnerabilidade e gerada uma lista ordenada. Quanto mais vulnerável for a rede, mais suscetível ela estará a congestionamentos decorrentes de eventos aleatórios perturbadores da capacidade de seus links.

O ideal seria a adoção de uma modelagem dinâmica (com carregamento ao longo do tempo), de forma a que se possa simular adequadamente o efeito à montante do incidente. Por outro lado, a modelagem com alocação estática, se realizada com métodos de alocação que simulem a dinâmica do tráfego, tais como a alocação por equilíbrio ou a alocação incremental, permitiria a avaliação da vulnerabilidade de forma razoável com uma redução considerável de recursos computacionais.

#### 4. INDICADORES DE VULNERABILIDADE

Um indicador é uma variável que representa um atributo ou qualidade de um sistema (Joumard e Gudmundsson, 2010). Segundo a OECD/ECMT (2007), os indicadores devem ser utilizados para medir o progresso em direção a um objetivo. Portanto, a função dos indicadores de vulnerabilidade é medir, de forma objetiva, o quão vulnerável é uma rede viária ou, então, medir a importância de seus componentes (links e nós) para a sua vulnerabilidade.

Diversos autores vêm estudando a vulnerabilidade de redes com o objetivo de determinar quais os links críticos quanto à vulnerabilidade, como será apresentado mais à frente. Conseqüentemente, vários métodos têm sido testados para a determinação desses links críticos e sua ordem de importância para a vulnerabilidade da rede. Um grupo de métodos envolve um procedimento em que cada um dos links da rede é eliminado ou tem sua capacidade reduzida em iterações sucessivas. Esse método consome muito tempo e recursos computacionais. Outros métodos buscam soluções que não envolvam tantas simulações, principalmente no caso de redes complexas. Quanto aos modelos de alocação de viagem também há diferentes abordagens: alguns autores utilizam a alocação dinâmica, outros a alocação estática; alguns simulam o efeito em links a montante decorrente de filas em links a jusante outros consideram as filas restritas aos links afetados. Há ainda casos em que são adotadas simulações dinâmicas mais sofisticadas, envolvendo a possibilidade de mudança de rota em meio à alocação, uma vez percebida a deterioração do desempenho na rota originalmente adotada. Todos os métodos analisados, no entanto, contrapõem a oferta à demanda, em procedimento semelhante ao apresentado na Figura 3, frequentemente aplicado iterativamente.



**Figura 3:** Procedimento básico para a determinação dos indicadores de vulnerabilidade

Com relação às variáveis quantificadas, as principais consideradas são o *tempo* e o *custo* de viagem, aumentados quando da interrupção total ou parcial de um link. É difícil, no entanto, captar a perda de oportunidades decorrente da interrupção de um link, quando usuários em vez de alterar sua rota optam por não realizar a viagem. Esse efeito pode ser significativo. Xhu et al. (2010) falam da experiência advinda da análise das consequências do colapso da ponte I-35W sobre o rio Mississippi, quando os danos observados no tráfego em geral foram inferiores ao previsto, em decorrência da adaptação dos usuários e à não quantificação do custo de oportunidade.

A seguir são apresentadas as abordagens dos diversos autores analisados para a determinação de indicadores de vulnerabilidade, discriminados pela abrangência da sua aplicação se para links ou regiões da rede viária.

#### **4.1 Indicadores para a verificação da vulnerabilidade de links**

Esses indicadores buscam quantificar a importância relativa de cada link para o desempenho da rede que o contem. Basicamente a metodologia consiste em analisar o comportamento da rede após a remoção ou redução da capacidade de cada um de seus links. Os indicadores assim determinados permitem a ordenação dos links componentes da rede em função de sua importância para o desempenho sob a óptica da vulnerabilidade. Os principais autores que propuseram índices ou procedimentos para a sua determinação são os que se seguem, discriminando-se segundo a modelagem de alocação de viagens utilizada.

##### ***Alocação estática***

A alocação estática de viagens é um modelo que exige menor esforço computacional e que simplifica o carregamento ao longo do tempo. O modelo geralmente utilizado é o baseado no equilíbrio do usuário, ou *user equilibrium*. A seguir são apresentados os autores que adotaram esse procedimento para a determinação de indicadores de vulnerabilidade.

- Chen *et al.* (2002) – combinam a avaliação da confiabilidade com a vulnerabilidade, buscando avaliar o impacto do aumento da demanda sobre links de capacidade sujeita a variações aleatórias;
- Nicholson (2003) – propõe um índice de risco relacionado à vulnerabilidade, determinando diferenças entre desempenho antes e depois de interrupção de um link da rede viária, incorporando ainda a probabilidade de ocorrência do evento em questão;
- Murray-Tuite e Mahmassani (2004) – propõem o Índice de Interrupção, que primeiramente determina índices por par de origem e destino de viagens (O/D) para em seguida consolidá-los. Baseia-se na verificação da capacidade ociosa em rotas alternativas e na diferença do tempo de viagem;
- Jenelius, *et al.* (2006) – propõem o Índice de Importância, que mede a variação do custo global para a rede de transporte derivado da interrupção de um link (ou grupo de links); propõem ainda o Índice de Exposição, que difere do Índice de Importância por avaliar um grupo de nós, ou uma região, quanto à sua vulnerabilidade a um evento capaz de interromper o fluxo em determinado link;
- Scott *et al.* (2006) – propõem o Índice de Robustez da Rede (NRI), que mede a deseconomia em termos de tempo de viagem resultante da interrupção total de um link da rede viária;

- Taylor, *et al.* (2006) – determinam a vulnerabilidade a partir do aumento no custo generalizado de transporte após a interrupção de um link da rede viária. O custo é computado ao longo das novas rotas entre cada par de origem e destino e ponderado pela demanda;
- Sullivan *et al.* (2010) – propõem o Índice de Robustez da Rede Modificado (NRI-m), baseado no índice NRI proposto por Scott *et al.* (2006). Utiliza o mesmo procedimento do NRI, mas considera a possibilidade de redução de capacidade dos links, ao invés de uma interrupção total;
- Erath (2010) – propõe metodologia alternativa para a determinação de um índice de vulnerabilidade, baseado na variação dos custos generalizados de transporte em uma rede derivado da interrupção de um de seus links;
- Chen e Miller-Hooks (2012) – propõem o Índice de Resiliência, que relaciona a demanda atendida pós-evento disruptivo da rede com a demanda atendida pré-evento;
- Snelder *et al.* (2012) – partem da verificação da capacidade ociosa em rotas alternativas para em seguida aplicar a matriz de origem e destino e obter um índice de rotas alternativas, que corresponde a um índice de vulnerabilidade;
- Dehghanisani *et al.* (2013) – em lugar da variação do tempo de viagem, utilizam a variação de veículos.kilômetros (ou milhas) percorridos em determinado espaço de tempo para a determinação da vulnerabilidade;

### **Alocação Dinâmica**

Vários autores estudaram a vulnerabilidade de redes viárias apoiados por *softwares* de simulação dinâmica. Ou seja, o modelo de alocação de viagens utilizado busca reproduzir o mais fielmente possível a dinâmica temporal. Isso permite verificar impactos a montante de links obstruídos, bem como a dinâmica do comprometimento da rede. Desse modo é possível analisar também o retorno progressivo à normalidade após o desimpedimento dos links envolvidos no incidente. É um procedimento que busca reproduzir mais fielmente a realidade, mas que exige mais recursos computacionais. É o recomendado por diversos autores, entre os quais os apresentados a seguir.

- Knoop *et al.* (2008) – afirmam que para a análise de efeitos decorrentes de interrupção de links em uma rede viária é indispensável a utilização de alocação dinâmica de viagens, com simulador que permita avaliar o reflexo à montante do link comprometido;
- Courthout *et al.* (2009) – desenvolveram algoritmo para a avaliação da vulnerabilidade que leva em conta o reflexo à montante do link comprometido;
- Knoop *et al.* (2012) – testam diversos indicadores utilizando alocação dinâmica, entre eles:
  - ✓ Extensão das filas formadas a montante do link comprometido;
  - ✓ Tempo em que a fila formada atinge uma interseção a montante;
  - ✓ Relação do fluxo com a capacidade sobressalente;
  - ✓ Efeito de bloqueio de interseções a montante do link comprometido.
- Snelder *et al.* (2012) – citam diversos indicadores que podem ser computados com auxílio da alocação dinâmica, entre eles:
  - ✓ Extensão total de vias sensivelmente afetadas pelo evento;
  - ✓ Quantidade de veículos nas vias sensivelmente afetadas pelo evento;
  - ✓ Distância total percorrida por todos os veículos sobre todo o período sob efeito do evento, comparado ao cenário sem o evento perturbador;



- ✓ Quantidade de veículos no período sob efeito do evento, comparado ao cenário sem o evento perturbador;
- ✓ Tempo de viagem adicional causado pelo incidente, sobre todas as viagens na rede;
- ✓ Velocidade média medida período sob efeito do evento, comparado ao cenário sem o evento perturbador.

### ***Abordagem mista***

Tampère *et al.* (2007), buscaram um procedimento que simplificasse a abordagem baseada em alocação dinâmica de viagens. Em sua metodologia proposta, é realizada uma simulação dinâmica inicial e, a partir dos resultados obtidos é obtida uma *lista longa* de links com potencial de vulnerabilidade. Em seguida a relação é reduzida para uma *lista curta* com base na probabilidade de ocorrência de incidentes, localização e outros indicadores. Sobre a lista curta final são finalmente realizadas simulações dinâmicas individualizadas e derivados indicadores de vulnerabilidade para cada um dos links selecionados.

### **4.2 Indicadores para a verificação da vulnerabilidade de grupos de links**

Esses indicadores têm como objetivo quantificar o impacto no desempenho da rede com a interrupção não de apenas um link, mas de um conjunto de links, geralmente próximos. Essa situação pode ocorrer em decorrência de fenômenos naturais ou mesmo em caso de bombardeios ou atentados terroristas, quando por vezes uma região da rede fica intransitável.

Na literatura que aborda esse tema foram identificados os seguintes autores:

- Sullivan *et al.* (2010) – propuseram o Índice de Robustez de Viagens em Rede (NTR), que permitiria a comparação entre redes ou sub-redes quanto à sua vulnerabilidade a eventos com potencial de interromper o funcionamento de um ou mais de seus links
- Jenelius e Mattsson (2011) – propuseram o Índice de Vulnerabilidade com Base em Célula, que avalia a vulnerabilidade com base na obstrução de todos os links em uma região, ou célula;

### **4.3 Síntese**

Como comentado anteriormente, o conceito de vulnerabilidade é algumas vezes tratado em conjunto com outros atributos de desempenho, produzindo índices que, na realidade, refletem não apenas o que aqui é conceituado como vulnerabilidade, mas um conjunto de atributos. Assim, quando Husdal (2004) classifica a vulnerabilidade em estrutural, ligada a fenômenos naturais ou a tráfego, leva em consideração a interveniência de atributos como a flexibilidade (estrutural), risco (fenômenos naturais), congestionamento (tráfego) e confiabilidade (tráfego). A classificação proposta por D'Este e Taylor (*apud* Nicholson, 2003) apresenta uma vulnerabilidade de acesso, que é estreitamente ligada à acessibilidade e flexibilidade, enquanto que a vulnerabilidade de conexão retrata mais diretamente o conceito de vulnerabilidade considerado no presente artigo. Nicholson e Du (*apud* Nicholson, 2003), entretanto, incorporam o atributo risco em sua classificação de vulnerabilidade.

Sendo assim, acredita-se ser mais apropriado classificar os indicadores de vulnerabilidade com base em sua inter-relação com os demais atributos de desempenho. Pelas suas características, o atributo *vulnerabilidade* é sempre, ao menos indiretamente, relacionado aos atributos *congestionamento*, *flexibilidade* e *acessibilidade*. A Tabela 1 apresenta as metodologias analisadas e sua relação com os atributos *risco* e *confiabilidade*. Além disso,

salienta o procedimento de alocação recomendado em cada metodologia e indica se o foco é a determinação de um índice de vulnerabilidade por link ou para uma região (área) da rede viária.

**Tabela 1:** Metodologias de determinação da vulnerabilidade

Metodologia (Referência)	Risco	Confiabilidade	Link ou Região	Método de alocação
Chen <i>et al.</i> (2002)	Indireto	Direto	Link	Estático
Nicholson (2003)	Direto	-	Link	Estático
Murray-Tuite e Mahmassani (2004)	-	-	Link	Estático
Jenelius, Petersen e Mattsson (2006)	-	-	Link	Estático
Scott <i>et al.</i> (2006)	-	-	Link	Estático
Taylor, Sekhar e D'Este (2006)	-	-	Link	Estático
Tampère, Stada e Immers (2007)	Direto	-	Link	Dinâmico/Estático
Knoop, Van Zuylen e Hoogendoorn (2008)	-	-	Link/Região	Dinâmico
Courthout, Tampère e Immers (2009)	-	-	Link	Dinâmico
Sullivan <i>et al.</i> (2010)	-	-	(1)	Estático
Erath (2010)	-	-	Link	Estático
Jenelius e Mattsson (2011)	-	-	Região	Estático
Chen e Miller-Hooks (2012)	-	-	Link	Estático
Knoop <i>et al.</i> (2012)	-	-	Link	Dinâmico
Snelder, Van Zuylen e Immers (2012)	-	-	(1)	(2)
Dehghanisani, Flintsch e McNeil (2013)	-	-	Link	Estático

(1) diferentes índices para link e região

(2) diferentes índices com alocação dinâmica ou estática

## 5. CONCLUSÕES

No decorrer da análise da literatura observou-se que o conceito de vulnerabilidade é por vezes confundido com o de confiabilidade, e mesmo de flexibilidade. No entanto, percebe-se uma tendência para consolidar o conceito de que a análise da vulnerabilidade deve sempre contrapor a oferta à demanda. Os parâmetros utilizados para a avaliação da vulnerabilidade são sempre ligados à variação da impedância entre pares de origem e destino, após a ocorrência de um evento que compromete total ou parcialmente um link ou grupo de links. Os principais parâmetros de impedância adotados são o custo generalizado de transporte, o tempo de viagem e a distância percorrida, sempre ponderados pela demanda.

Em síntese, pode-se afirmar que o atributo Vulnerabilidade:

- Mede o impacto no desempenho de uma rede viária após a obstrução total ou parcial de um ou mais de seus links em face de um evento aleatório;
- Envolve a avaliação do equilíbrio entre oferta e demanda;
- Relaciona-se a eventos não recorrentes, ou seja, não cotidianos.

Observou-se ainda, na literatura, uma grande preocupação com o consumo de recursos de tempo e computacionais, o que torna a determinação da vulnerabilidade de links em uma rede complexa um processo dispendioso. Em consequência, Knoop *et al.* (2012) investigaram sem sucesso a utilização de indicadores que dispensavam alocações específicas para cada link pois os resultados obtidos diferiam significativamente dos obtidos através do processo que envolve a computação link a link, e que são considerados mais representativos.

O presente artigo mostrou, a partir da discussão dos principais indicadores identificados na literatura que a metodologia adotada para sua determinação é basicamente a esquematizada na Figura 3. A divergência principal consiste no processo de alocação de viagens à rede que alguns admitem poder ser estática enquanto que outros consideram necessária a alocação dinâmica.

Em resumo, apesar das diferenças metodológicas, quaisquer dos indicadores analisados permitem a ordenação de links ou grupos de links em função de sua importância para o desempenho da rede. Essa informação é essencial para a adequada priorização de investimentos que visem aumentar a resiliência da rede viária, ou seja, sua habilidade de manter desempenho adequado em face de eventos aleatórios que comprometam a capacidade de um (ou alguns) de seus links.

A determinação de indicadores de vulnerabilidade, no entanto, ainda é uma tarefa trabalhosa, principalmente em redes complexas, como em grandes cidades. Apesar de Tampère *et al.* (2007), terem desenvolvido um procedimento buscando reduzir a demanda por recursos de tempo e computacionais, o esforço ainda é elevado. A pouca praticidade e alto custo envolvido na determinação sistemática de indicadores de vulnerabilidade torna recomendável pesquisas adicionais com o objetivo de se desenvolver um processo de determinação da vulnerabilidade que envolva menos recursos, sem que haja perda expressiva de precisão dos resultados obtidos.

#### Agradecimentos

Ao CNPq e à Rede Ibero-Americana de Estudo em Polos Geradores de Viagens (<http://redpgv.coppe.ufrj.br>).

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Austroroads (2009) *Estimating Road Network Congestion and Associated Costs*, Austroroads, Sidney, Australia.
- Berdica, K. (2002) An introduction to road vulnerability: what has been done, is done and should be done. *Transport Policy*, v. 9, n. 2, p. 117-127.
- Chen, A., Yang, H., Lo, H. K. e Tang, W. H. (2002) Capacity Reliability of a Road Network: an Assessment Methodology and Numerical Results. *Transportation Research Part B*, v. 36, n. 3, p. 225-252.
- Chen, L., Miller-Hooks, E. (2012) Resilience: an indicator of recovery capability in intermodal freight transport., *Transportation Science*, v. 46, n. 1, p. 109-123.
- Courthout, R., Tampère, C. M. J., Immers, L. H. (2009) Marginal incident computation: an efficient algorithm to determine congestion spillback due to incidents, *disponível em* <https://www.mech.kuleuven.be/cib/verkeer/dwn/pub/PJ2009B.pdf>.
- Dehghanisanij, M., Flintsch, G. W., McNeil, S. (2013) Vulnerability analysis of degrading roadway networks, *TRB 2013 Annual Meeting*, Transportation Research Board.
- Elefteriadou, L., Srinivasan, S., Steiner, R., Tice, P. C. e Lim, K. (2012) *Expanded transportation performance measures to supplement level of service (los) for growth management and transportation impact analysis*, Transportation Research Center, University of Florida, Gainesville, FL, USA.
- Erath, A., Birdsall, J., Auxhausen, K. W. e Rajdin, R. (2010) Vulnerability assessment of the swiss road network. *Transportation Research Record*, v. 2137, p. 118-126.
- Grant, M., Bowen, B., Day, M. *et al* (2011) *Congestion management process: a guidebook*, Federal Highway Administration, Washington, DC, USA.
- Husdal (2004) Reliability, vulnerability, costs and benefits. *Disponível em* [www.husdal.com/2004/08/25/reliability-and-vulnerability-versus-costs-and-benefits](http://www.husdal.com/2004/08/25/reliability-and-vulnerability-versus-costs-and-benefits).
- Jenelius, E. e Mattsson, L. (2011) Road network vulnerability analysis of area-covering disruptions: a grid-based approach with case study. *Paper para Department of Transport Science, Royal Institute of Technology, Estocolmo, Suécia*.
- Jenelius, E., Mattsson, L. (2012) Road network vulnerability analysis of area-covering disruptions: A grid-based approach with case study, *Transportation Research Part A*, v. 46, n. 5, p. 746-760.

- Jenelius, E., Petersen T., Mattsson, L. (2006) Importance and exposure in road network vulnerability analysis, *Transportation Research Part A*, v. 40, n. 7, p 537-560.
- Joumard, R. e Gudmundsson, H. (2010) Indicators of environmental sustainability in transport. *Institute national de recherché sur le transports et leurs sécurité- INRETS*.
- Knoop, V., Van Zuylen, H. e Hoogendoorn, S. (2008) The influence of spillback modeling when assessing consequences of blockings in a road, *European Journal of Transport and Infrastructure Research*, v. 8, n. 4, p. 287-300.
- Knoop, V. L., Snelder, M., Van Zuylen, H. J. e Hoogendoorn, S. P. (2012) Link-level vulnerability indicators for real world networks, *Transportation Research Part A*, v. 46, n. 5, p. 843-854.
- Li, M. (2008) Robustness for road networks – a framework with combined DTA models. *Tese (Ph.D.), Delft University of Technology, Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Transport and Planning Section, Delft, Países Baixos*.
- Murray-Tuite, P. e Mahmassani, H. S. (2004) Methodology for determining vulnerable links in a transportation network, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, n. 1882, p. 88-96.
- Nicholson, A. (2003) Transport network reliability measurement and analysis, *Revista Transportes*, v. 11, p. 49-62.
- OECD/ECMT (2007) *Managing urban traffic congestion*, Organization for Economic Co-operation and Development, European Conference of Ministers of Transport, OECD, Paris, França.
- Oliveira, E. L. (2012) Indicadores para hierarquização de ligações em rede viária urbana com base em desempenho. *Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes), Programa de Engenharia de Transportes, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil*.
- Schrank, D., Lomax, T., Eisele, B. (2011) *2011 Urban Mobility Report*, Texas Transportation Institute, TX, USA.
- Scott, D. M., Novak, D.C., Aultman-Hall, L., Guo, F. (2006) Network Robustness Index: A new method for identifying critical links and evaluating the performance of transportation networks, *Journal of Transport Geography*, v. 14, n. 3, p. 215-227
- Snelder, M., Van Zuylen, H. J., Immers, L. H. (2012) A framework for robustness analysis of road network for short term variations in supply, *Transportation Research Part A*, v. 46, n. 5, p. 828-842.
- Sullivan, J. L., Novak, D. C., Aultman-Hall, L., Scott, D. M. (2010) Identifying critical road segments and measuring system-wide robustness in transportation networks with isolating links: A link-based capacity-reduction approach, *Transportation Research Part A*, v. 44, n. 5, p. 323-336.
- Tampère, C. M. J., Stada, J., Immers, B. (2007) Methodology for identifying vulnerable sections in a national road network, *disponível em [www.mech.kuleuven.be/cib/verkeer/dwn/pub/P2007C.pdf](http://www.mech.kuleuven.be/cib/verkeer/dwn/pub/P2007C.pdf)*.
- Taylor, M. A. P., Sekhar, S. V. C. e D'Este, G. M. (2006) Application of accessibility based methods for vulnerability analysis of strategic road networks. *Network and Spatial Economics*, v. 6, n. 3-4, p. 267-291.
- Zhu. S., Levinson, D., Liu, H. X., Harder, K. (2010) The traffic and behavioral effects of the I-35W Mississippi River bridge collapse, *Transportation Research Part A*, v. 44, n. 10, p. 771-784.

---

Eduardo Leal de Oliveira (eduardo.dau@gmail.com)  
Licínio da Silva Portugal (licinio@pet.coppe.ufrj.br)  
Walter Porto Jr. (walter@pet.coppe.ufrj.br)  
Rua Souza Lima, 138 / 601 – Rio de Janeiro, RJ, Brasil