

Determinando links críticos em uma rede viária: indicadores de vulnerabilidade e congestionamento

Eduardo Leal de Oliveira

Doutorando, Programa de Engenharia de Transportes da COPPE UFRJ, Brasil

Licínio da Silva Portugal

Walter Porto Junior

Professor, Programa de Engenharia de Transportes da COPPE UFRJ, Brasil

RESUMO

O presente artigo coloca em foco os atributos de desempenho *congestionamento* e *vulnerabilidade*, propondo uma conceituação com base em pesquisa na literatura recente. É apresentado estudo de caso que permite a observação das diferenças obtidas na ordenação da importância dos links de uma rede viária de acordo com cada um dos dois atributos. As diferenças observadas sugerem que a utilização exclusiva de indicadores de congestionamento para a determinação de gargalos de desempenho pode ser uma solução enganosa.

1. INTRODUÇÃO

Diversos problemas podem levar à ineficiência de uma rede viária urbana, cujo sintoma mais visível é a ocorrência de congestionamentos. De fato, em especial nos grandes centros urbanos, o desempenho da rede viária é uma questão de importância crescente. Sendo assim, se a presença de trechos congestionados indica um problema, não é, no entanto, o único atributo pelo qual se pode medir o desempenho de uma rede viária. Nesse sentido, vários autores têm estudado o tema e proposto indicadores para a avaliação do desempenho de redes viárias e de seus componentes sob diferentes óticas. A necessidade de otimização do desempenho e a freqüente limitação de recursos orçamentários torna indispensável a utilização de ferramentas que permitam uma priorização de investimentos com base em critérios objetivos e consistentes. Portanto, julga-se importante a discussão dos principais atributos de desempenho buscando critérios para a determinação da importância relativa dos links componentes de uma rede, de forma a tornar possível uma ordenação de prioridades.

O presente artigo enfatiza os atributos de desempenho *congestionamento* e *vulnerabilidade*, propondo uma conceituação coerente com a bibliografia recente. Seu objetivo é investigar semelhanças e diferenças entre as hierarquias ou ordenações decorrentes da utilização de indicadores dos citados atributos.

Com essa finalidade, o artigo inicialmente conceitua *congestionamento* e *vulnerabilidade*, apresentando as proposições formuladas na literatura. É admitido um conceito independente para o atributo *vulnerabilidade*, embora reconhecendo sua relação com outros atributos, como *confiabilidade* e *risco*. São relacionados alguns dos principais indicadores dos atributos em foco e selecionados aqueles que farão parte do estudo de caso.

A seguir é apresentada a metodologia adotada no estudo de caso em uma rede complexa, representativa da Região Metropolitana do Rio de Janeiro, e computados valores para indicadores selecionados. Os resultados obtidos permitem então a comparação entre as hierarquias decorrentes de cada indicador considerado, observando-se similaridades e diferenças.

2. CONGESTIONAMENTO E VULNERABILIDADE: CONCEITOS E INDICADORES

Embora o congestionamento seja um dos atributos de desempenho mais encontrados na bibliografia consultada, outros aspectos podem ser valorizados para que se possam caracterizar, de forma adequada, quais links são os mais críticos na rede viária. De fato, podem-se identificar pelo menos seis atributos de desempenho na literatura, descritos sucintamente a seguir (Oliveira, 2012; Oliveira *et al.*, 2013):

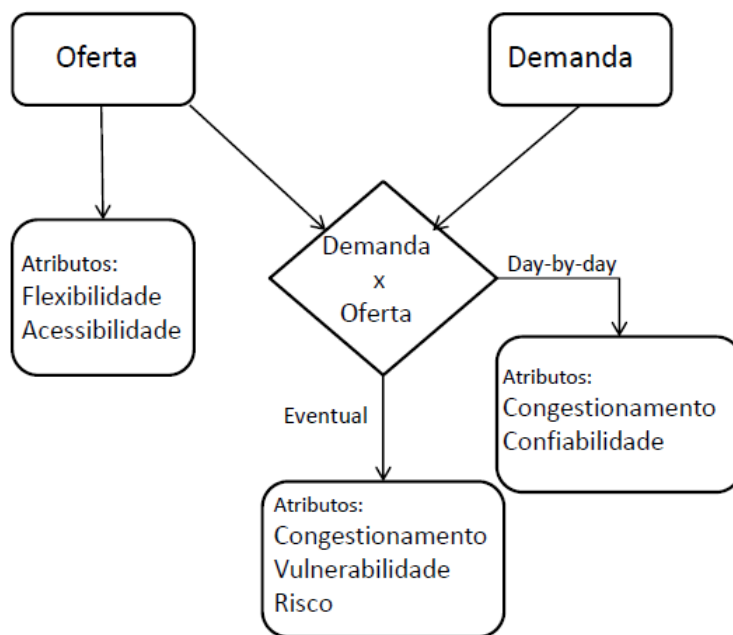
- Congestionamento – mede o nível de serviço, verificando o comprometimento da capacidade em cada link no atendimento das necessidades de fluidez do tráfego;
- Vulnerabilidade – mede à resiliência a eventos que possam afetar a um ou mais de seus links;
- Risco – relacionado à vulnerabilidade, considera ainda a probabilidade de ocorrência de eventos potencialmente impactantes no desempenho;
- Confiabilidade – mede a previsibilidade quanto a tempo e custo de viagem, em condições cotidianas;
- Flexibilidade – mede a disponibilidade de rotas alternativas entre pares de origem e destino;
- Acessibilidade – mede a facilidade de deslocamento entre zonas de uma região.

A figura 1, extraída de Oliveira *et al.* (2013), apresenta de forma esquemática os atributos citados e sua relação com a oferta viária e a demanda de tráfego, considerando que o desempenho da rede resulta da interação entre esses dois elementos.

Dentre os atributos citados, a *acessibilidade*, por exemplo, pode ser avaliada sem considerar a demanda, como em Jiang *et al.* (1999). A *flexibilidade*, de forma análoga, também pode ser avaliada independentemente da demanda. Os demais atributos, no entanto, são mais fortemente dependentes da relação de equilíbrio entre oferta e demanda.

A *confiabilidade*, a *vulnerabilidade* e o *risco* são atributos inter-relacionados e por vezes confundidos, mas Taylor (2006) argumenta pela sua distinção, associando a vulnerabilidade a incidentes eventuais, ainda que possivelmente pouco prováveis. O presente artigo compara as hierarquias decorrentes da aplicação de indicadores de congestionamento (o fenômeno de maior visibilidade) e do atributo de *vulnerabilidade* que, além de ser ligado à relação entre oferta e demanda (como o *congestionamento*), tem informações disponíveis que permitem a realização de um estudo de caso baseado em uma rede urbana complexa real.

Fig. 1 – Atributos de desempenho e sua relação com a oferta e a demanda



2.1 Conceituação de congestionamento e vulnerabilidade

Embora o congestionamento seja um fenômeno intuitivamente conhecido, a literatura apresenta várias conceituações para congestionamento, mais complementares do que distintas. Stopher (2004), por exemplo, propõe que o congestionamento surge quando o volume de entrada (demanda) supera a capacidade de saída (oferta). Zhang e Lomax (2007), por sua vez, consideram que um trecho está congestionado quando a distância entre veículos é mínima, ou seja, a densidade do tráfego está em seu valor máximo. O HCM (TRB, 2010), apresenta uma metodologia para a determinação do nível de serviço de uma via ou conjunto de vias, onde um nível de serviço “F” e eventualmente em nível “E”, caracterizaria uma operação sob congestionamento. Em síntese, o congestionamento em um segmento de uma rede viária surge quando a demanda de tráfego se aproxima da ou excede a capacidade de escoamento da via de forma estável.

A vulnerabilidade de uma rede viária tem sido objeto de inúmeras pesquisas, principalmente na última década. Normalmente, o conceito de vulnerabilidade de uma rede

está ligado à habilidade de uma rede de manter seu nível de desempenho após um evento que comprometa um ou mais de seus links (Jenelius *et al.*, 2006; Jenelius e Mattsson; 2011). Scott *et al.* (2006) e Sullivan *et al.* (2010) preferem o termo *robustez* quando propõem seus indicadores. No entanto, a *robustez* é recíproca à *vulnerabilidade*, e, assim, um indicador de robustez o é também de vulnerabilidade.

O conceito de vulnerabilidade é, ainda, frequentemente confundido com o de confiabilidade. Chen *et al.* (2002), por exemplo, não fazem distinção entre os conceitos quando propõem seu índice de confiabilidade da capacidade. 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 robustez (inverso da vulnerabilidade) seria a habilidade da rede de continuar a operar em nível de serviço adequado mesmo em presença de incidentes. A confiabilidade seria, portanto, ligada a eventos cotidianos, enquanto que a vulnerabilidade se relacionaria a incidentes eventuais. Dehghanisani *et al.* (2013), incluem a probabilidade de ocorrência de eventos perturbadores na determinação de seu indicador de vulnerabilidade, associando o atributo *risco* à *vulnerabilidade*. Taylor *et al.* (2006) apresentam argumentos para distinção entre os atributos *vulnerabilidade*, *confiabilidade* e *risco*. Para o presente artigo, é considerado o conceito proposto por Oliveira *et al.* (2013), resultante de análise crítica dos estudos existentes na literatura: “*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.*”

2.2 Indicadores de congestionamento

Foi identificado na literatura um grande número de indicadores ligados ao atributo congestionamento. Analisando esses indicadores, percebe-se que há três grupos principais, em função das principais variáveis intervenientes na sua determinação:

- Equilíbrio entre oferta e demanda – indicadores que avaliam o congestionamento com base no comprometimento da capacidade de escoamento do link sob análise;
- Velocidade e tempo – indicadores que avaliam a fluidez da viagem em termos de velocidade média (ou sua variação) ou o tempo médio (ou sua variação);
- Outros – indicadores que não podem ser enquadrados nos dois grupos precedentes.

A tabela 1 apresenta exemplos de indicadores e suas respectivas referências bibliográficas, enquadrados em tais grupos.

Dentre os indicadores de congestionamento apresentados, adotaram-se para o estudo de caso os indicadores V/C, do grupo Oferta x Demanda, e o CI, do grupo Tempo/Velocidade. A escolha do V/C se deu por se tratar, junto com o nível de serviço, de um indicador mais difundido do que os demais do grupo, além de ter a seu favor a facilidade de obtenção. Dentre os indicadores do grupo Tempo/Velocidade, que tratam da diferença ou razão entre

tempos nas condições congestionadas e sem congestionamento, o TTI é talvez o mais difundido, mas é definido como a razão entre o tempo de viagem no período de pico e em condições de fluxo livre. O CI, por sua vez, é definido como a razão entre o tempo congestionado (seja ou não no horário de pico) e em condições de fluxo livre. Assim, optou-se pelo CI, uma variação mais genérica do índice mais difundido.

Grupo	Indicador
Oferta x Demanda	V/C – relação volume / capacidade (TRB, 2010)
	LOS – Nível de serviço (TRB, 2010)
	K – Densidade Média (Elefteriadou <i>et al.</i> , 2012)
	Capacidade de reserva (Chen <i>et al.</i> , 2002)
Tempo/Velocidade	CI – Índice de congestionamento (Zhang e Lomax, 2007)
	TTI – Índice de tempo de viagem (Schrank <i>et al.</i> , 2011)
	Atraso médio (Quiroga, 2000)
Outros	Extensão congestionada (Litman, 2012)
	Percentual de sub-rede local congestionada (Portugal e Araújo, 2008)
	Throughput (Morán, 2010)

Tabela 1 – Indicadores de Congestionamento

2.2.1 Determinação de V/C

A determinação da capacidade, denominador da relação V/C, se faz pela metodologia preconizada pelo Highway Capacity Manual – HCM (TRB, 2010). É a capacidade estimada para o nível de serviço E. O numerador, volume de tráfego, é obtido a partir de contagens diretas de tráfego ou a partir de simulações sobre modelo de sistema viário.

2.2.2 Determinação de CI – Índice de Congestionamento

O índice de congestionamento – CI (Zhang e Lomax, 2007) busca medir o nível de congestionamento em uma via a partir da relação entre o tempo na situação congestionada (t_c) e o tempo em condições de fluxo livre (t_f), como mostra a equação 1. Pode ser determinado de forma direta, em campo, ou a partir de simulações sobre modelo de sistema viário.

$$CI = \frac{t_c}{t_f} \quad (1)$$

2.3 Indicadores de vulnerabilidade

Para a determinação dos indicadores de vulnerabilidade, o desempenho da rede é medido em duas situações: a) com a rede íntegra, antes da ocorrência de incidente perturbador; b) com a rede com um ou mais de seus links interrompidos ou com a capacidade comprometida. A diferença entre os dois indicadores de desempenho (geralmente custo ou tempo total de viagem) é o valor para o índice de vulnerabilidade.

A principal diferença metodológica para a determinação dos diferentes indicadores de vulnerabilidade se refere às características do modelo de alocação utilizado, se *dinâmico* ou *estático* (Oliveira *et al.*, 2013).

A tabela 2 apresenta alguns dos indicadores encontrados na literatura e sua referência bibliográfica, indicando a abordagem quanto ao modelo de alocação, se estática, dinâmica ou mista.

Alocação	Indicador
Estática	Índice de vulnerabilidade e confiabilidade (Chen <i>et al.</i> , 2002)
	Índice de importância (Jenelius <i>et al.</i> , 2006)
	Índice de robustez da rede – NRI (Scott <i>et al.</i> , 2006)
	Índice de robustez da rede modificado – NRI-m (Sullivan <i>et al.</i> , 2010)
	Índice de vulnerabilidade (Dehghanisani <i>et al.</i> , 2013)
Dinâmica	Índices de vulnerabilidade (Knoop <i>et al.</i> , 2012)
	Índices de vulnerabilidade (Snelder <i>et al.</i> , 2012)
Mista	Índices de vulnerabilidade (Tampère <i>et al.</i> , 2007)

Tabela 2 – Indicadores de Vulnerabilidade

Tendo em vista que a rede calibrada disponível se trata de um modelo parametrizado para o TransCAD, de alocação estática, foram descartados os indicadores que exigem alocação dinâmica ou mista. Como se tem como objetivo comparar os resultados obtidos a partir da análise do *congestionamento* e da *vulnerabilidade*, buscou-se indicadores não impactados por outros atributos. Estão enquadrados nessa categoria o NRI-m, o NRI e o Índice de importância. De fato, o indicador proposto por Chen *et al.* (2002) é impactado também pelo atributo *confiabilidade* e o proposto por Dehghanisani *et al.* (2013) é impactado pelo *risco*. O NRI-m difere do NRI e do Índice de importância pela característica de tratamento da capacidade viária. Enquanto estes tratam do impacto da interrupção total de um link, aquele admite uma redução parcial na capacidade. De forma a considerar no estudo o impacto dos dois efeitos (interrupção e redução da capacidade), adotou-se um indicador de cada característica, NRI e NRI-m, para o estudo de caso.

2.3.1 Determinação de NRI

O NRI mede a importância de um link de uma rede viária a partir da simulação do efeito do bloqueio daquele link no desempenho da rede (Scott *et al.*, 2006). Para tal, são comparados os tempos ou custos de viagens totais da rede nas situações com e sem o link sob análise. O NRI representa a diferença em tempo (ou em custo) entre as duas situações, de acordo com formulação apresentada na equação 2.

$$NRI_k = \sum_i t'_i \times v'_i - \sum_i t_i \times v_i \quad (2)$$

Onde: NRI_k = Índice de robustez para o link k ; t'_i = tempo (ou custo) no link i na situação sem link k ; v'_i = volume de tráfego no link i na situação sem link k ; t_i = tempo (ou custo) no link i com a rede íntegra; v_i = volume de tráfego no link i com a rede íntegra.

2.3.2 Determinação de NRI-m

O NRI-m (Sullivan et al., 2010) é semelhante ao NRI, diferindo deste no sentido em que, em lugar da eliminação completa do link sob análise, é simulado o desempenho da rede com a capacidade reduzida. Assim, podem ser determinados índices NRI-m para diversos níveis de redução de capacidade. No presente estudo, a redução considerada foi de 77,5%, ponto médio da faixa de redução que produziu resultados mais estáveis nos experimentos realizados por Sullivan *et al.* no Condado de Chittenden, Vermont, EUA (2010). A formulação matemática é idêntica à do NRI, com t' e v' (equação 2) representando a situação para o link k com capacidade reduzida.

3. ESTUDO DE CASO: METODOLOGIA ADOTADA

A base para o estudo de caso foi a rede viária representativa da Região Metropolitana do Rio de Janeiro (RMRJ), elaborada para o Plano Diretor de Transporte Urbano (PDTU, 2005). Trata-se de uma rede complexa, com cerca de 22.000 nós e 60.000 links. O software de características GIS adotado para as necessárias simulações foi o TransCAD, da *Caliper Corporation*, o mesmo utilizado durante a elaboração do PDTU.

Para a alocação de viagens, adotou-se o método de alocação por equilíbrio (*User's Equilibrium* - UE) disponível no TransCAD e baseado no método de Frank-Wolfe (Frank e Wolf, 1956, *apud* Caliper Corporation, 1996) (o mesmo modelo utilizado durante o PDTU).

Por ser um método iterativo, há a necessidade de se considerar um critério para parar o processamento. Rose *et al.* (1988) discutem esses critérios, o que é sumarizado por Slavin *et al.* (2006), onde são comparados diferentes métodos de alocação de viagens por UE. Slavin *et al.* (2006) recomendam a utilização do *relative gap*, que pode ser definido como a razão entre a diferença entre o custo total (ou tempo) por UE e pelo método “*All or Nothing* - AON” e o custo total por UE, tal como na equação 3. Para o presente caso, considerou-se como limite para o teste de convergência do processo iterativo o *relative gap* de 0,005 considerado adequado para os objetivos do estudo. De fato, a utilização de *relative gaps* menores não apresentou ganhos consideráveis de precisão enquanto que os custos de processamento aumentaram expressivamente. A título de exemplo, quando simulada a rede íntegra, a diferença entre os resultados obtidos a partir de *relative gaps* de 0,005 e 0,0001 foi de cerca de 0,38%, para um tempo de processamento cerca de 25 vezes maior.

$$\frac{\sum x_{UE} \times c(x_{UE}) - x_{AON} \times c(x_{UE})}{\sum x_{UE} \times c(x_{UE})} \quad (3)$$

Onde: x_{UE} = fluxo em cada link como resultado de uma solução UE; x_{AON} = fluxo em cada link como um resultado de uma solução AON; $c(x_{UE})$ = volume função atraso/volume – custo ou tempo em cada link.

A matriz de viagens considerada foi a de automóveis de 2003, para a hora de pico, obtida a partir de transformação das matrizes de viagens do PDTU (ver Oliveira, 2012, para detalhamento do processo). Admitiu-se que as rotas de transporte coletivo (ônibus) seriam fixas e que, portanto, não seriam alteradas. O tráfego de veículos de carga é pouco representativo no pico e, sendo assim, pôde-se considerar que apenas os veículos de transporte individual teriam liberdade de escolha de rota tal como pressuposto no método de alocação por equilíbrio.

A determinação dos indicadores de congestionamento V/C e CI é direta, após o processo de alocação. Por outro lado, a determinação dos indicadores NRI e NRI-m exige a modificação individualizada de cada link da rede viária, em um processo que envolve muitos recursos computacionais quando se trata de uma rede urbana complexa, como a presentemente considerada. Sendo assim, foram selecionados para determinação de indicadores de vulnerabilidade e posterior análise comparativa, um grupo de links, pertencentes a uma sub-rede pré-definida, composta de 1.266 links. Essa sub-rede foi selecionada de forma a permitir a análise da ligação de uma das regiões mais valorizadas da RMRJ (Copacabana, Ipanema, Leblon, Gávea e Jardim Botânico) com as demais áreas da cidade. Essa região caracteriza-se pelas suas características geográficas peculiares, condicionantes da topologia da rede viária, apresentando um relevo acidentado, o litoral oceânico e uma lagoa. Para a seleção dos links para análise foram tomadas duas relações principais como referência: a) a relação ordenada dos links da sub-rede em função dos indicadores de congestionamento; e b) a relação ordenada dos links da sub-rede em função da quantidade de rotas entre centróides a que servem. É importante ressaltar que, embora a análise tenha sido concentrada em uma sub-rede, os indicadores foram calculados com base em toda a rede da RMRJ.

O critério final de seleção dos links para a análise comparativa foi:

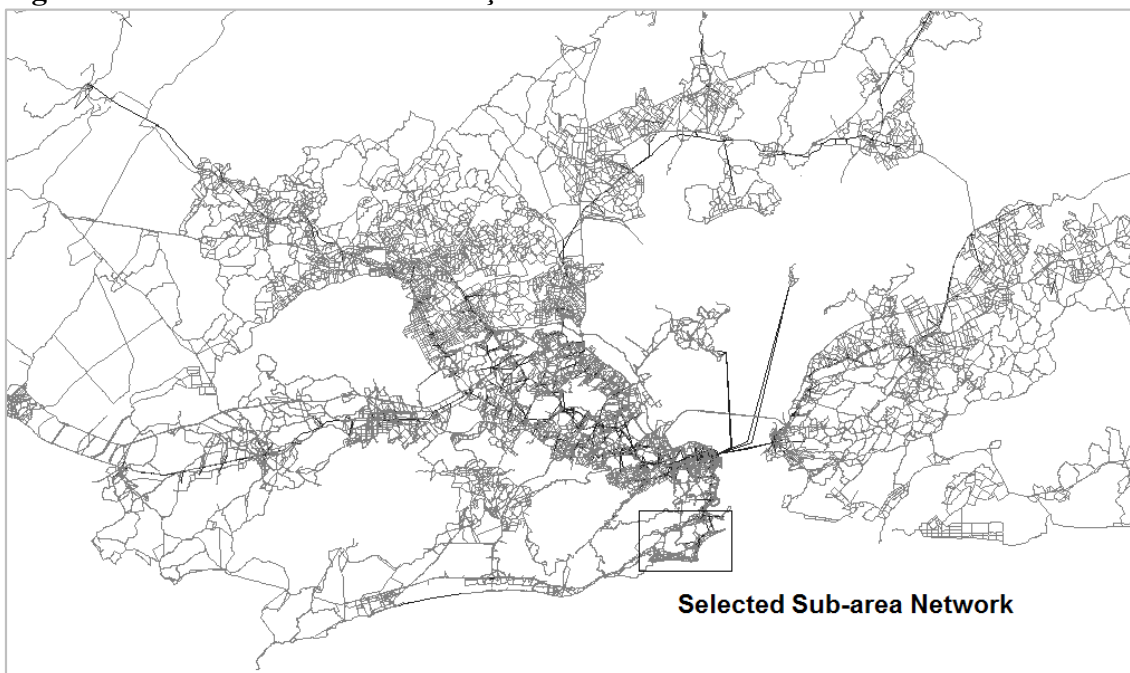
- Cada link deveria estar entre os 50 primeiros de cada uma das relações – ou seja, ser um dos 50 mais congestionados segundo os indicadores V/C ou CI ou um dos 50 links que servissem ao maior número de rotas mínimas entre centróides de toda a rede representativa da RMRJ (e não apenas a sub-rede delimitada);
- Em um mesmo corredor só haveria mais de um link caso houvesse interseções com vias não estritamente locais.

Com esse procedimento, foram selecionados 24 links, destacados graficamente na figura 2, que apresenta a sub-rede de estudo. A figura 3 apresenta a rede da RMRJ, com a sub-rede demarcada em área retangular.

Fig. 2 – Links selecionados para o estudo comparativo



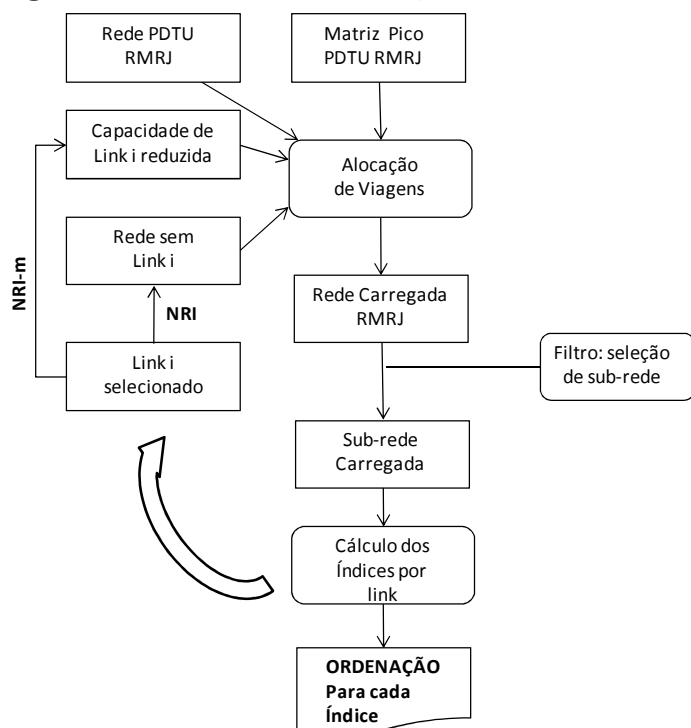
Fig. 3 – Rede do RMRJ com marcação da sub-rede de estudo



O NRI e o NRI-m foram então determinados para cada um dos links selecionados através de um procedimento iterativo, onde são realizadas tantas alocações quanto os links a analisar, 24 no presente caso.

A figura 4 apresenta, de forma esquemática, o procedimento de determinação dos indicadores NRI e NRI-m.

Fig. 4 – Processo de determinação de NRI e NRI-m



4. ESTUDO DE CASO: RESULTADOS

Os valores encontrados para os indicadores de congestionamento e vulnerabilidade para os links selecionados, bem como sua posição na hierarquia, são apresentados na tabela 3. Além do valor absoluto dos indicadores, são apresentados também os valores normalizados, em escala de 0 a 1, de forma a facilitar a comparação. Admitindo-se um peso igual para os atributos e respectivos indicadores, é apresentada uma hierarquia derivada da média entre esses indicadores, que ordena a tabela. A coluna com as médias é por sua vez novamente normalizada, também em escala de 0 a 1.

A comparação entre os valores de V/C e CI são apresentados no gráfico da figura 5 e pode-se verificar que há uma forte correlação entre os índices dos dois indicadores, quando considerada uma função exponencial. Da mesma forma, percebe-se uma correlação entre os índices dos indicadores NRI e NRI-m, com uma relação aproximadamente linear, embora com menor coeficiente de determinação, como pode ser visualizado na figura 6.

Link	Congestionamento						Vulnerabilidade						Cong.+Vuln.			Grupo	
	V/C			CI			NRI			NRI-m			Normalizado				
	Abs.	Norm.	Hier.	Abs.	Norm.	Hier.	Abs.	Norm.	Hier.	Abs.	Norm.	Hier.	Méd.	Norm.	Hier.		
2	1,59	0,90	2	18,11	0,58	4	339417	0,69	4	323332	1,00	1	0,79	1,00	1	I	
8	1,33	0,70	8	9,53	0,29	9	413836	0,85	2	191339	0,59	3	0,61	0,76	2		
21	0,89	0,37	21	1,94	0,03	22	488660	1,00	1	227783	0,70	2	0,53	0,65	3	II	
1	1,73	1,00	1	30,33	1,00	1	9831	0,02	19	1845	0,01	22	0,51	0,62	4		
4	1,51	0,83	4	18,19	0,59	2	188260	0,39	5	43346	0,13	10	0,48	0,59	5		
3	1,54	0,86	3	18,14	0,58	3	96160	0,20	8	56985	0,18	8	0,45	0,55	6		
9	1,31	0,69	9	10,14	0,31	8	168357	0,34	6	63826	0,20	6	0,39	0,46	7	III	
20	0,93	0,40	20	2,15	0,04	21	369505	0,76	3	92917	0,29	4	0,37	0,45	8		
10	1,28	0,67	10	8,59	0,26	11	139207	0,28	7	80482	0,25	5	0,36	0,44	9		
5	1,44	0,79	5	15,12	0,48	5	534	0,00	23	1916	0,01	21	0,32	0,38	10		
6	1,37	0,73	6	10,58	0,33	7	51751	0,11	14	21879	0,07	11	0,31	0,36	11		
7	1,35	0,71	7	9,46	0,29	10	54062	0,11	13	16436	0,05	13	0,29	0,34	12		
16	1,16	0,57	16	6,38	0,18	17	88034	0,18	9	58286	0,18	7	0,28	0,32	13		
15	1,18	0,59	15	6,81	0,20	16	84566	0,17	10	46398	0,14	9	0,28	0,32	14		
13	1,23	0,62	13	13,03	0,41	6	2071	0,00	21	10540	0,03	15	0,27	0,31	15		
12	1,26	0,65	12	8,27	0,25	12	20908	0,04	18	4985	0,02	18	0,24	0,27	16		
11	1,26	0,65	11	7,01	0,20	15	31751	0,07	16	6348	0,02	17	0,23	0,27	17		
14	1,20	0,60	14	7,19	0,21	14	23030	0,05	17	10229	0,03	16	0,22	0,25	18		
19	1,13	0,55	19	6,02	0,17	18	40023	0,08	15	14237	0,04	14	0,21	0,24	19		IV
17	1,14	0,56	17	7,92	0,23	13	-50	0,00	24	237	0,00	23	0,20	0,22	20		
18	1,13	0,55	18	4,53	0,12	19	6173	0,01	20	2930	0,01	20	0,17	0,19	21		
24	0,84	0,34	22	2,57	0,05	20	57061	0,12	11	16863	0,05	12	0,14	0,14	22		
23	0,62	0,17	23	1,49	0,02	23	1881	0,00	22	-200	0,00	24	0,05	0,02	23		
22	0,39	0,00	24	1,05	0,00	24	56401	0,12	12	3195	0,01	19	0,03	0,00	24		

V/C e CI [adimensionais]; NRI e NRI-m [minutos]. Colunas: Abs. (valores absolutos); Norm. (valores normalizados); Hier. (hierarquia); Méd. (media dos valores normalizados).

Tabela 3 – Valores dos indicadores por link

Comparando-se os indicadores NRI e NRI-m com um cada um dos indicadores de congestionamento, não pôde ser observada qualquer correlação (R^2 inferior a 0,05 para as curvas testadas), como pode ser visualizado nas figuras 7 e 8, que exemplificam com a comparação com o V/C. Portanto, como se esperava, observou-se correlação entre indicadores de um mesmo atributo, o que não foi verificado entre indicadores de diferentes atributos.

A análise direta dos resultados apresentados na tabela 3 mostra visível semelhança da ordenação decorrente dos indicadores associados ao mesmo atributo de desempenho. É também visível a diferença entre as hierarquias obtidas a partir de um e outro atributo, acentuada quando comparados índices de diferentes atributos.

Dos cinco links mais congestionados (coincidentes de acordo com V/C e CI), 1 (segundo o NRI) ou 2 (segundo o NRI-m) estão entre os cinco menos críticos quanto a vulnerabilidade. Considerando-se os 10 links mais críticos segundo cada um dos indicadores, apenas 5 são coincidentes. O link 1, por exemplo, é o primeiro na hierarquia V/C e CI (congestionamento), e tem pouca relevância para a vulnerabilidade: 19º na hierarquia NRI e 22º na hierarquia NRI-m. Isso reforça a convicção de que um link, embora fortemente congestionado, possa ser pouco relevante para a vulnerabilidade da

rede. Em outras palavras, há links sobrecarregados que, no entanto, poderiam ser retirados da rede viária sem consequências significativas, provavelmente devido à existência de rotas alternativas de tempo ou custo pouco superiores.

Fig. 5 – Correlação CI x V/C

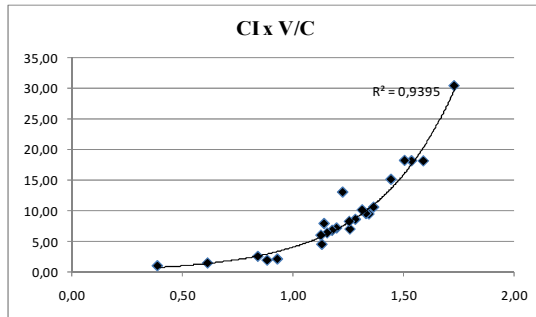


Fig. 6 – Correlação NRI-m x NRI

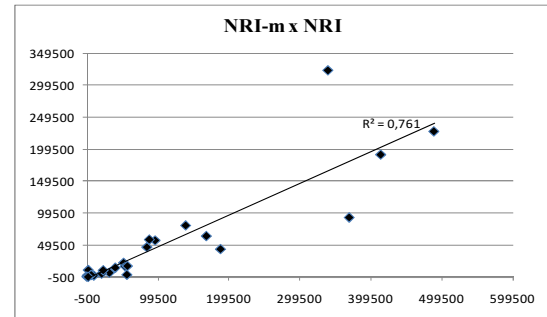


Fig. 7 – Comparação NRI x V/C

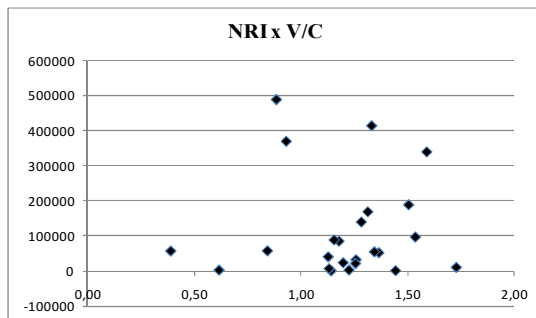
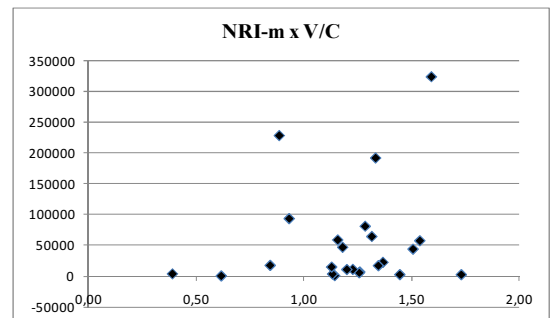


Fig. 8 – Comparação NRI-m x V/C



Outro ponto digno de nota é o comportamento dos links 20 e 21, selecionados por pertencerem a rotas mínimas entre um elevado número de pares de origem e destino. Esses links estão entre os quatro mais significativos quando considerados os indicadores de vulnerabilidade, e tem pouca relevância quando considerado o congestionamento, quando se situam entre os cinco últimos da hierarquia. Aparentemente, gargalos anteriores funcionam como reguladores de fluxo, impedindo seu congestionamento, mascarando sua importância. Nesse caso, os links 20 e 21 são críticos para o desempenho da rede viária, embora não se destaquem quanto ao nível de congestionamento observado.

Finalmente, a normalização das médias obtidas dos diferentes indicadores permite que se distribuam os links em quatro grupos com amplitude 0,25, onde os mais críticos quanto a congestionamento e vulnerabilidade seriam os pertencentes ao grupo I, com média normalizada superior a 0,75. De fato, observa-se que os links do grupo I estão entre os 5 mais críticos quanto à vulnerabilidade (hierarquias de NRI e NRI-m) e entre os 10 mais críticos quanto ao congestionamento (hierarquias de V/C e CI). Por outro lado, os 6 links do grupo IV (média normalizada menor ou igual a 0,25) estão entre sempre na metade inferior da hierarquia de todos os indicadores, à exceção do link 24, que aparece em 11º na hierarquia derivada de NRI e em 12º na derivada de NRI-m.

5. CONCLUSÃO

Entende-se que o conceito de desempenho de uma rede abrange múltiplos ângulos, função dos atributos considerados. O congestionamento, por exemplo, é o principal sintoma do mau desempenho de uma rede viária. Sendo assim, a importância dos indicadores de congestionamento, entre os quais o V/C e o CI, não pode ser menosprezada, apesar de suas limitações quanto à detecção de links críticos, que não necessariamente se tornam visíveis para uma dada distribuição espacial do tráfego. De fato, esses indicadores funcionam como “termômetros” do desempenho, evidenciando problemas locais e permitindo uma hierarquia de acordo com a maior gravidade desse congestionamento. Os indicadores de vulnerabilidade tendem a melhor detectar links críticos levando em conta a configuração da estrutura da rede e, complementarmente, parecem indicados para a priorização de investimentos. Além disso, os indicadores de vulnerabilidade são principalmente adequados para a hierarquização de links em regiões sujeitas a eventos climáticos extremos como nevascas, inundações, entre outros, com vista à mitigação de seus efeitos no tráfego. Em regiões urbanas, eventos antropogênicos não devem ser desconsiderados, tais como manifestações populares ou mesmo ataques terroristas.

Os resultados obtidos no estudo de caso sugerem que hierarquias decorrentes de indicadores baseados no mesmo atributo de desempenho são mais semelhantes do que hierarquias decorrentes de indicadores baseadas em diferentes atributos de desempenho. Isso sugere que a decisão de qual indicador usar deve ser precedida de uma decisão sobre qual a ótica de desempenho adotar, que determinará o(s) atributo(s) a ser(em) enfatizado(s).

Uma solução possível é a análise combinada de vários atributos e respectivos indicadores, sendo que a normalização, ao produzir uma escala comum, facilita as abordagens comparativas para fins de ordenação. No estudo de caso apresentado, foram adotados pesos idênticos para os indicadores testados, mas a utilização criteriosa de pesos diferenciados pode ser utilizada para a resolução de problemas específicos de desempenho. Naturalmente, um estudo mais aprofundado é necessário para a identificação do melhor procedimento e dos pesos a serem utilizados. Dessa forma, seria possível obterem-se hierarquias multicriteriais que seriam indicadas para planejamento e análise de prioridade de investimentos. Tomando como exemplo o estudo de caso realizado, os links do grupo I deveriam ser candidatos prioritários para a obtenção de recursos se for desejada a melhoria do desempenho sob a ótica de redução do congestionamento e da vulnerabilidade.

Como limitação do presente estudo, o critério de pré-selecionar um grupo de links mais congestionados ou mais presentes em rotas mínimas adicionou um viés que não permite, por exemplo, garantir que os links mais significativos quanto à vulnerabilidade estejam todos presentes na análise. No entanto, a elevada exigência de recursos computacionais e de tempo para a determinação de indicadores de vulnerabilidade em uma rede complexa

levou a circunscrever o presente estudo a um grupo de links selecionados. O objetivo principal do presente artigo, que é apresentar as diferentes hierarquias derivadas dos dois atributos analisados, foi, no entanto, atingido, independente do eventual viés.

Apesar do desenvolvimento da tecnologia de computação, a análise de redes complexas como as de uma grande metrópole ainda é desafiadora. O diferente nível de exigência de recursos pode levar a uma maior utilização de indicadores de mais simples obtenção, como os de congestionamento, levando, por vezes, a resultados enganosos. De fato, observa-se que a priorização de investimento em redes viárias com base em indicadores de vulnerabilidade ainda é uma abordagem pouco explorada. A combinação de indicadores em etapas sucessivas, tal como a apresentada no presente artigo de forma simplificada, pode ser uma alternativa para uma metodologia mais eficaz para a hierarquização de links críticos com base em múltiplos critérios.

AGRADECIMENTOS

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

REFERÊNCIAS

CALIPER CORPORATION (1996). *Travel Demand Modeling with TransCAD 3.0*. Caliper Corporation, Newton, MA, USA.

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.

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., 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.

JENELIUS, 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.

JENELIUS, E., PETERSEN T., MATTSSON, L. (2006). Importance and exposure in road network vulnerability analysis, *Transportation Research Part A*, vol. 40, n. 7, pp 537-560.

JIANG, B., CLARAMUNT, C., BATTY, M. (1999). Geometric accessibility and geographic information: extending desktop GIS to space syntax, *Computers, Environment and Urban Systems*, vol. 23, pp. 127-146.

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, pp. 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.*

LITMAN, T. (2012). Smart congestion relief – comprehensive analysis of traffic congestion costs and congestion reduction benefits. *Victoria Transport Policy Institute.*

MORÁN, C. (2010) Relevance and reliability of area-wide congestion performance measures in road networks. *Tese (Doutorado), Royal Institute of Technology, Estocolomo.*

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.*

OLIVEIRA, E. L., PORTUGAL, L. S., PORTO JUNIOR, W. (2013). Determinando links críticos em uma rede viária: indicadores de vulnerabilidade. *XXVII ANPET – Congresso Nacional de Pesquisa e Ensino e Transporte, 4-8 November 2013.* ANPET, Belem do Pará, Brazil.

PDTU (2005). *Plano Diretor de Transporte Urbano da Região Metropolitana do Rio de Janeiro*, Governo do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ.

PORTUGAL, L. S., ARAÚJO, L. A. (2008). Procedure to analyze the performance of urban networks in brazilian cities. *Journal of Urban Planning and Development*, vol. 134, n. 3, pp. 119-128.

QUIROGA, C. A. (2000). Performance Measures and data requirement for congestion management studies. *Transportation Research Part C*, vol. 8, n. 1-6, pp. 287-306.

ROSE, G., DASKIN, M. S., KOPPELMAN, F. S. (1988). An examination of convergence error in equilibrium traffic assignment models, *Transportation Research Part B*, v. 22B, n. 4, pp. 261-274.

SCHRANK, D., LOMAX, T., EISELE, B. (2011). TTI's urban mobility report. *Texas Transportation Institute*.

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.

SLAVIN, H., BRANDON, J., RABINOWITCZ, A. (2006). An empirical comparison of alternative user equilibrium traffic assignment methods, *European Transport Conference*, disponível em www.abstracts.aetransport.org.

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.

STOPHER, P. R. (2004) Reducing Road Congestion: a Reality Check. *Transport Policy*, n. 11, pp. 117-131.

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.

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.

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*.

TRANSPORTATION RESEARCH BOARD – TRB (2010) *Highway Capacity Manual 2010*. EUA: Transportation Research Board.

ZHANG, M., LOMAX, T. (2007) Estimating Congestion Index at the Link Level with TransCAD GIS. *Plan, Build, and Manage Transportation Infrastructure in China 2008*, Seventh International Conference of Chinese Transportation Professionals Congress (ICCTP).