



ESTRUTURA METODOLÓGICA PARA A HIERARQUIZAÇÃO DE LINKS COM BASE
EM SUA IMPORTÂNCIA PARA O DESEMPENHO DA REDE VIÁRIA

Eduardo Leal de Oliveira

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Transportes, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Engenharia de Transportes.

Orientador: Licínio da Silva Portugal

Rio de Janeiro
Dezembro de 2016

ESTRUTURA METODOLÓGICA PARA A HIERARQUIZAÇÃO DE LINKS COM BASE
EM SUA IMPORTÂNCIA PARA O DESEMPENHO DA REDE VIÁRIA

Eduardo Leal de Oliveira

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ COIMBRA
DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE) DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM CIÊNCIAS EM
ENGENHARIA DE TRANSPORTES.

Examinada por:

Prof. Licínio da Silva Portugal, D.Sc.

Prof. Carlos David Nassi, Dr. Ing.

Prof. Glaydston Mattos Ribeiro, D.Sc.

Prof. Alexandre Gonçalves Evsukoff, D.Sc.

Prof. José Eugênio Leal, Dr. Ing.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL
DEZEMBRO DE 2016

Oliveira, Eduardo Leal de

Estrutura Metodológica para a Hierarquização de Links com Base em sua Importância para o Desempenho da Rede Viária / Eduardo Leal de Oliveira. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2016.

XVII, 180 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Licínio da Silva Portugal

Tese (doutorado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia de Transportes, 2016.

Referências Bibliográficas: p. 168-180.

1. Desempenho de rede viária. 2. Indicadores de desempenho. I. Portugal, Licínio da Silva II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia de Transportes. III. Título.

À minha mulher Leticia, meus filhos
Priscilla, André, Pedro, Matheus e
Paulo; e, principalmente, às minhas
netas Júlia e Rosa.

AGRADECIMENTOS

Pelo incentivo constante, à minha mulher Letícia Reis Alves Junqueira e meu irmão Fabrício Leal de Oliveira.

Ao Professor Licínio da Silva Portugal que, além de orientador, foi um constante motivador, além de ótimo papo. Um verdadeiro amigo.

Ao Professor Walter Porto Junior, co-orientador no início da pesquisa, e que teve que se afastar do acompanhamento por motivos de saúde.

Ao meu filho mais novo Paulo, de quem roubei boa parte do tempo de convivência.

Aos professores Glaydston Mattos Ribeiro e José Eugênio Leal, pelas sugestões dadas à época do exame de Qualificação, além da participação na banca de defesa desta Tese de Doutorado.

Aos professores Carlos David Nassi e Alexandre Gonçalves Evsukoff pela participação na Banca de Doutorado.

A todos os professores e funcionários do PET com quem convivi ao longo desses anos, sempre disponíveis para dirimir uma dúvida ou mesmo para uma conversa sem maiores pretensões.

Ao colega Ricardo Luis Wyllie de Araújo, pela ajuda nas análises estatísticas.

Ao meu filho Matheus pela ajuda em diversas partes da pesquisa.

Aos amigos, responsáveis pela recarga de energia entre um dia e outro de trabalho.

Aos meus pais, Amarílio e Elda.

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Ciências (D.Sc.)

ESTRUTURA METODOLÓGICA PARA A HIERARQUIZAÇÃO DE LINKS COM BASE EM SUA IMPORTÂNCIA PARA O DESEMPENHO DA REDE VIÁRIA

Eduardo Leal de Oliveira

Dezembro/2016

Orientador: Licínio da Silva Portugal

Programa: Engenharia de Transportes

O desempenho da rede viária é uma preocupação de importância crescente nos grandes centros urbanos. O presente estudo identifica os principais atributos de desempenho, selecionando para uma análise mais detalhada aqueles que contrapõem demanda à oferta. São, assim, selecionados os atributos Congestionamento, Confiabilidade e Vulnerabilidade. São propostas conceituações para estes atributos, particularmente para Confiabilidade e Vulnerabilidade, frequentemente confundidos, e sem um consenso conceitual na bibliografia. O foco principal do estudo é a elaboração de uma estrutura metodológica que permita identificar links críticos para o desempenho de uma rede viária e produzir hierarquias com base em atributos. Essa estrutura é passível de ser aplicada em redes urbanas complexas, como a de regiões metropolitanas. A metodologia proposta é testada em aplicação sobre rede representativa da Região Metropolitana do Rio de Janeiro e analisados os resultados, a fim de verificar se os três atributos analisados são distintos e se produzem hierarquias diferenciadas. São apresentadas evidências científicas de que os resultados produzidos a partir de indicadores de vulnerabilidade têm pouca ou nenhuma correlação com aqueles produzidos a partir de indicadores de congestionamento e confiabilidade.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.)

METHODOLOGICAL FRAMEWORK FOR THE RANKING OF LINKS BASED ON
THEIR IMPORTANCE FOR THE PERFORMANCE OF ROAD NETWORKS

Eduardo Leal de Oliveira

December/2016

Advisor: Licínio da Silva Portugal

Department: Transportation Engineering

The performance of the road network is a concern of growing importance in large urban centers. This study identifies the key performance attributes, selecting those who oppose demand and supply for more detailed analysis. In this context, the attributes Congestion, Reliability and Vulnerability were selected. The study also proposes concepts for these attributes, particularly for Reliability and Vulnerability, often undistinguished, and without a conceptual consensus in the literature. The main focus of this study is the development of a methodological framework for identifying critical links to the performance of road networks producing hierarchies based on attributes. This framework can be applied to complex urban networks, such as metropolitan areas. The proposed framework is then tested on a road network representative of the Metropolitan Region of Rio de Janeiro and its results are analyzed in order to verify if the three attributes under analysis are distinct and produce differentiated hierarchies. Scientific evidences are presented showing that results based on vulnerability indicators are weakly or not related with those based on congestion and reliability indicators.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Considerações iniciais	1
1.2 Objetivos e hipóteses de trabalho	4
1.3 Justificativa	5
1.4 Originalidade e contribuições da pesquisa	6
1.5 Estrutura da Tese	8
2. ATRIBUTOS DE DESEMPENHO	10
2.1 Considerações iniciais	10
2.2 Congestionamento	15
2.2.1 Conceituação de congestionamento	15
2.2.2 Causas e efeitos do congestionamento	18
2.3 Confiabilidade	23
2.3.1 Conceituação de confiabilidade	23
2.3.2 Causas da não confiabilidade	26
2.3.3 Efeitos da não confiabilidade	28
2.4 Vulnerabilidade	31
2.4.1 Conceituação de vulnerabilidade	31
2.4.2 Efeitos da Vulnerabilidade	34
2.5 Síntese	36
3. INDICADORES DE DESEMPENHO	37
3.1 Considerações iniciais	37
3.2 Indicadores de congestionamento	38
3.2.1 Relação de indicadores de congestionamento	40
3.2.2 Aplicação dos indicadores de congestionamento	43
3.3 Indicadores de confiabilidade	48
3.3.1 Relação de indicadores de confiabilidade	50
3.3.2 Aplicação dos indicadores de confiabilidade	52
3.4 Indicadores de vulnerabilidade	53
3.4.1 Relação de indicadores de vulnerabilidade	54
3.4.2 Indicadores de vulnerabilidade voltados para regiões	57
3.4.3 Aplicação dos indicadores de vulnerabilidade	58
3.5 Síntese	58
4. ESTRUTURA METODOLÓGICA	60
4.1 Considerações iniciais	60

4.2 Etapa 1 – Procedimentos para cálculo dos indicadores selecionados para cada atributo e justificativas	62
4.2.1 Congestionamento	63
4.2.2 Confiabilidade	64
4.2.3 Vulnerabilidade	68
4.3 Etapa 2 – Determinação das hierarquias dos links por atributo e respectivos indicadores.....	74
4.3.1 Determinação das hierarquias derivadas dos atributos Congestionamento e Confiabilidade	75
4.3.2 Determinação de hierarquias baseadas nos indicadores de vulnerabilidade e procedimento de pré-seleção de links.....	76
4.3.3 Hierarquias por atributo, para links selecionados.....	80
4.4 Etapa 3 – Análise de resultados	82
4.4.1 Análises numéricas.....	83
4.4.2 Análises qualitativas	88
4.5 Síntese	89
5. APLICAÇÃO DA ESTRUTURA METODOLÓGICA	91
5.1 Considerações iniciais.....	91
5.2 A rede para a aplicação.....	92
5.3 A matriz de viagens considerada.....	97
5.4 O processo de alocação.....	97
5.5 Aplicação de procedimentos: Congestionamento e Confiabilidade.....	99
5.5.1 Congestionamento: cálculo dos indicadores e produção de hierarquias ...	100
5.5.2 Confiabilidade: cálculo dos indicadores e produção de hierarquias	106
5.6 Aplicação de procedimentos auxiliares: <i>Betweenness Centrality</i> e Carregamento	108
5.6.1 <i>Betweenness Centrality</i> : cálculo do indicador e produção de hierarquia ...	111
5.6.2 Carregamento: cálculo do indicador e produção de hierarquia.....	114
5.7 Pré-seleção de links	117
5.8 Aplicação de procedimentos: Vulnerabilidade	120
5.8.1 Vulnerabilidade: determinação do indicador NRI.....	121
5.8.2 Vulnerabilidade: determinação do indicador NRI-m	124
5.9 Resultados – Síntese	129
6. ANÁLISE DE RESULTADOS.....	133
6.1 Considerações iniciais.....	133
6.2 Análise comparativa: indicadores de congestionamento	136
6.3 Análise comparativa: indicadores de vulnerabilidade	139

6.3.1 Comparação entre NRI e NRI-m	140
6.3.2 Comparação entre BC e os indicadores NRI e NRI-m	141
6.3.3 Pertinência dos indicadores auxiliares BC e Carregamento na pré-seleção de links para a análise da vulnerabilidade.....	143
6.4 Análise comparativa: Congestionamento x Confiabilidade	144
6.5 Análise comparativa: Congestionamento x Vulnerabilidade	148
6.6 Análise comparativa: Confiabilidade x Vulnerabilidade.....	153
6.7 Análise de resultados: síntese.....	156
7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	161
7.1 Conclusões	161
7.2 Recomendações	166
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	168

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Divisão modal dos deslocamentos no Brasil, consideradas cidades com mais de 60.000 habitantes	11
Figura 2.2 – Classificação de atributos de desempenho	14
Figura 2.3 – Distribuição das causas de congestionamento nos EUA	19
Figura 2.4 – Consequências do Congestionamento	22
Figura 2.5 – Variação do tempo de viagem em função do fluxo (volume) de tráfego em um arco	27
Figura 2.6 – Variação do tempo de viagem em função do fluxo de tráfego (volume) e da variação da capacidade em um arco	27
Figura 2.7 – Média e variância do tempo de viagem em função do grau de saturação do tráfego (V/C)	28
Figura 2.8 – Mudança de rota de A para B em função da obstrução em X	34
Figura 4.1 – Estrutura metodológica	62
Figura 4.2 – Procedimento geral para a obtenção de indicadores de congestionamento	64
Figura 4.3 – Procedimento geral para a obtenção do Indicador de Confiabilidade de Eliasson (ICE)	68
Figura 4.4 – Procedimento geral para a obtenção de indicadores de vulnerabilidade .	73
Figura 4.5 – Etapa 2 - Procedimento para a obtenção de indicadores e respectivas hierarquias	81
Figura 5.1 – Estrutura metodológica – Etapa 2	92
Figura 5.2 – Posicionamento da sub-rede de estudo na rede da RMRJ	95
Figura 5.3 – Sub-rede de estudo e posicionamento dos centroides	95
Figura 5.4 – Representação esquemática (em cinza) do procedimento para obtenção de hierarquias referentes aos atributos Congestionamento e Confiabilidade	100
Figura 5.5 – Representação gráfica do congestionamento segundo o indicador V/C	105
Figura 5.6 – Representação gráfica do congestionamento segundo o indicador CI ...	106
Figura 5.7 – Representação gráfica da importância para a confiabilidade segundo o indicador ICE	110
Figura 5.8 – Representação esquemática (em cinza) do procedimento para obtenção de hierarquias referentes aos indicadores auxiliares BC e Carregamento	111
Figura 5.9 – Representação gráfica da centralidade segundo o indicador BC	114
Figura 5.10 – Representação gráfica do carregamento	115
Figura 5.11 – Representação esquemática (em cinza) da inserção do procedimento de pré-seleção de links na Etapa 2 da Estrutura Metodológica	117
Figura 5.12 – Representação georreferenciada dos links selecionados	120

Figura 5.13 – Representação esquemática (em cinza) da inserção do procedimento de determinação dos indicadores de vulnerabilidade na Etapa 2 da Estrutura Metodológica	121
Figura 5.14 – Representação gráfica da vulnerabilidade segundo o indicador NRI ...	124
Figura 5.15 – Representação gráfica da vulnerabilidade segundo o indicador NRI ...	128
Figura 5.16 – Representação gráfica do congestionamento segundo os indicadores V/C (à esquerda) e CI (à direita), para toda a sub-rede de estudo.....	132
Figura 5.17 – Representação gráfica da importância para a confiabilidade segundo o indicador ICE, para toda a sub-rede de estudo.....	132
Figura 5.18 – Representação gráfica da vulnerabilidade segundo os indicadores NRI (à esquerda) e NRI-m (à direita), apenas para os links selecionados.....	132
Figura 6.1 – Gráfico de dispersão: CI em função de V/C	137
Figura 6.2 – Gráfico de dispersão: log CI em função de V/C	137
Figura 6.3 – Gráfico de dispersão: NRI-m em função de NRI	140
Figura 6.4 – Gráfico de dispersão: BC em função de NRI	141
Figura 6.5 – Gráfico de dispersão: BC em função de NRI-m	142
Figura 6.6 – Gráfico de dispersão: ICE em função de V/C	145
Figura 6.7 – Gráfico de dispersão: log ICE em função de V/C	146
Figura 6.8 – Gráfico de dispersão: log ICE em função de CI	146
Figura 6.9 – Representação gráfica da importância dos links selecionados segundo os indicadores CI (à esquerda) e ICE (à direita)	148
Figura 6.10 – Gráfico de dispersão: NRI em função de V/C	149
Figura 6.11 – Gráfico de dispersão: NRI em função de CI	149
Figura 6.12 – Gráfico de dispersão: NRI-m em função de V/C	151
Figura 6.13 – Gráfico de dispersão: NRI-m em função de CI	151
Figura 6.14 – Representação gráfica da importância dos links segundo os indicadores CI (à esquerda) e NRI (à direita)	153
Figura 6.15 – Gráfico de dispersão: NRI em função de ICE	154
Figura 6.16 – Gráfico de dispersão: NRI-m em função de ICE	154
Figura 6.17 – Representação gráfica da importância dos links segundo os indicadores ICE (à esquerda) e NRI (à direita)	156
Figura 6.18 – Representação gráfica dos links pertencentes ao quarto superior das hierarquias dos três atributos de desempenho analisados	158
Figura 6.19 – Representação gráfica dos links pertencentes aos dez primeiros postos das hierarquias dos três atributos de desempenho analisados	159
Figura 6.20 – Representação gráfica dos links pertencentes aos cinco primeiros postos das hierarquias dos três atributos de desempenho analisados	160

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1 – Reação do usuário ao congestionamento	23
Quadro 3.1 – Classificação quanto à aplicação de indicadores de congestionamento .	44
Quadro 4.1 – Resultados da regressão – parâmetros para o cálculo do indicador de confiabilidade de Eliasson	66
Quadro 4.2 – Parâmetros para o Indicador de Confiabilidade de Eliasson (ICE)	67
Quadro 4.3 – Variáveis Dummy para o Indicador de Confiabilidade de Eliasson (ICE) .	67
Quadro 4.4 – Redução de capacidade recomendada para determinação do NRI-m ...	72
Quadro 4.5 – Exemplo de resultados dispostos em uma tabela	82
Quadro 4.6 – Escala simplificada para interpretação dos coeficientes de correlação de Pearson e Spearman	88
Quadro 5.1 – Descrição dos campos de interesse da tabela representativa da rede do PDTU 2005	93
Quadro 5.2 – Capacidades e velocidades consideradas no PDTU 2005	93
Quadro 5.3 – Zonas de Tráfego na sub-rede de estudo	96
Quadro 5.4 – Descrição da tabela resultante do processo de alocação do TransCAD	99
Quadro 5.5 – Hierarquia de links de acordo com o indicador de congestionamento V/C (60 links mais críticos)	103
Quadro 5.6 Hierarquia de links de acordo com o indicador de congestionamento CI (60 links mais críticos)	104
Quadro 5.7 – Hierarquia de links de acordo com o indicador de confiabilidade ICE (60 links mais críticos)	109
Quadro 5.8 – Hierarquia de links de acordo com o indicador auxiliar BC (60 links mais críticos)	113
Quadro 5.9 – Hierarquia de links segundo o carregamento (60 links mais carregados)	116
Quadro 5.10 – Links selecionados para a análise detalhada	119
Quadro 5.11 – Hierarquia de links segundo o indicador de vulnerabilidade NRI	122
Quadro 5.12 – Índices Gama para o grafo representativo da rede de simulação	125
Quadro 5.13 – Hierarquia de links segundo o indicador de vulnerabilidade NRI-m	127
Quadro 5.14 – Posições hierárquicas segundo cada um dos indicadores testados ...	130
Quadro 6.1 – Resultados obtidos, por indicador	133
Quadro 6.2 – Agrupamentos de links com base em quartis	136
Quadro 6.3 – Características dos links analisados, quanto a V/C e CI	136
Quadro 6.4 – Análise de correlação entre V/C e CI	138
Quadro 6.5 – Características dos links analisados, quanto a NRI, NRI-m e BC	139
Quadro 6.6 – Análise de correlação entre NRI e NRI-m	140

Quadro 6.7 – Análise de correlação entre NRI e BC	142
Quadro 6.8 – Análise de correlação entre NRI-m e BC	142
Quadro 6.9 – Links críticos quanto à vulnerabilidade selecionados a partir de BC ou Carregamento	144
Quadro 6.10 – Características dos links analisados, quanto a ICE	145
Quadro 6.11 – Análise de correlação entre ICE e V/C	146
Quadro 6.12 – Análise de correlação entre ICE e CI	147
Quadro 6.13 – Análise de correlação entre NRI e V/C	149
Quadro 6.14 – Análise de correlação entre NRI e CI	150
Quadro 6.15 – Análise de correlação entre NRI-m e V/C	151
Quadro 6.16 – Análise de correlação entre NRI-m e CI	152
Quadro 6.17 – Análise de correlação entre NRI e ICE	154
Quadro 6.18 – Análise de correlação entre NRI-m e ICE	155
Quadro 6.19 – Análise de correlação entre indicadores de um mesmo atributo	156
Quadro 6.20 – Análise de correlação entre indicadores de diferentes atributos	157

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACCESS	Indicador de congestionamento baseado na relação entre volume de tráfego e capacidade viária
ANTP	Associação Nacional de Transportes Públicos
AON	All-Or-Nothing – Tudo-Ou-Nada – método de alocação de viagens em uma rede viária
BC	Betweenness Centrality – indicador de centralidade
BPR	Bureau of Public Roads
CA	Capacity Adequacy – Adequação da Capacidade – indicador de congestionamento
CC	Confiabilidade da Capacidade – indicador de vulnerabilidade
CV	Coeficiente de Variação
CI	Congestion Index – indicador de congestionamento
DOT	Desenvolvimento Orientado a Transporte Público
ECMT	European Conference of Ministers of Transport
EUA	Estados Unidos da América
FHWA	Federal Highway Administration
GIS	Geographic Information System – Sistema de Informações Geográficas
HCM	Highway Capacity Manual
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICMC	Índice de Custo Marginal de Congestionamento – indicador de vulnerabilidade
ICE	Indicador de Confiabilidade de Eliasson
IE	Índice de Exposição – indicador de vulnerabilidade
IF1	Índice de Filas 1 – indicador de vulnerabilidade
IF2	Índice de Filas 2 – indicador de vulnerabilidade
II	Índice de Importância – indicador de vulnerabilidade
IIT	Índice de Interrupção – indicador de vulnerabilidade
INCT	Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia
IPEA	Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada
IPT	Índice de Perda de Tempo – indicador de vulnerabilidade
IR	Índice de Resiliência – indicador de vulnerabilidade
IRA	Índice de Rotas Alternativas – indicador de vulnerabilidade
IRN	Índice de Risco de Nicholson
ITDP	Institute for Transportation and Development Policy

IV	Índice de Vulnerabilidade – indicador de vulnerabilidade
IVBC	Índice de Vulnerabilidade com Base em Célula – indicador de vulnerabilidade
IVD	Índice de Vulnerabilidade de Dehghnisaniy – indicador de vulnerabilidade
IVE	Índice de Vulnerabilidade de Erath – indicador de vulnerabilidade
K	Densidade média do fluxo de veículos
NRI	Network Robustness Index – Índice de Robustez da Rede – indicador de vulnerabilidade
NRI-m	Network Robustness Index, modified – Índice de Robustez da Rede modificado – indicador de vulnerabilidade
NTR	Network Trip Robustness – índice de vulnerabilidade
NS	Nível de Serviço
n.s.	Nível de significância estatística
OECD	Organization for the Economic Co-operation and Development
PDTU	Plano Diretor de Transporte Urbano
RG	Relative Gap – Intervalo Relativo – critério para convergência de processos iterativos de alocação de viagens em rede viária
RMRJ	Região Metropolitana do Rio de Janeiro
RSR	Relative Speed Reduction – Redução Relativa de Velocidade - indicador de congestionamento
SRCI	Speed Reduction Congestion Index – Índice de Redução da Velocidade por Congestionamento – indicador de congestionamento
TOD	Transit Oriented Development – Desenvolvimento Orientado a Transporte Público
TRB	Transportation Research Board
TTI	Texas Transportation Institute e índice de congestionamento relacionado
TTR	Taxa de tempo de viagem
UCP	Unidades de Carros de Passeio
UE	User Equilibrium – Equilíbrio do Usuário – método de alocação de viagens em uma rede viária
UI	Unreliability Index – índice de não confiabilidade
UK	Reino Unido (United Kingdom)
VOR	Valor para a confiabilidade do tempo de viagem
VOT	Valor do tempo de viagem

VTTS	Valor da economia do tempo de viagem
V/C	Relação entre volume de tráfego e capacidade viária
σ/t	Coeficiente de variação do tempo de viagem

1. INTRODUÇÃO

1.1 Considerações iniciais

Diversos problemas podem levar à ineficiência de uma rede viária urbana, cujo sintoma mais visível é a ocorrência de congestionamentos. Em especial nos grandes centros urbanos, o desempenho da rede viária é uma questão de importância crescente, já que a disputa por este espaço coletivo se torna cada vez mais intensa, acentuando as externalidades negativas (Oliveira *et al.*, 2014b; Oliveira *et al.*, 2016). De fato, Jenelius e Mattson (2012) consideram esse desempenho um dos fundamentos da sociedade moderna.

Essa preocupação não é só dos estudiosos do assunto, mas atinge a toda a população, que convive cotidianamente com os congestionamentos e acidentes de trânsito, bem como recorre cada vez mais a recursos disponibilizados pela tecnologia atual para minimizar os consequentes danos em seus deslocamentos. Assim, não é infrequente que um usuário, antes de realizar uma viagem, busque ferramentas para aconselhamento quanto à melhor rota, para a estimativa do tempo de viagem e para a verificação da existência ou não de congestionamentos na rota escolhida (Oliveira *et al.*, 2016). Nesse sentido, a maioria das ferramentas utilizadas busca informar quais os trechos da malha viária estão sob congestionamento. Essa preocupação específica com o congestionamento deriva do fato deste ser o principal e mais visível sintoma de mau desempenho, ou ineficiência, de uma rede viária urbana (Grant *et al.*, 2011).

O congestionamento surge quando a demanda veicular se aproxima ou excede a capacidade de escoamento viário (Stopher, 2004; Zhang e Lomax, 2007). A sua ocorrência depende da distribuição espacial dos fluxos veiculares pela rede, que é influenciada pela localização e interação das atividades socioeconômicas. Essa característica ressalta as limitações do congestionamento como atributo de desempenho da rede viária, já que ele pode não se manifestar em links¹ potencialmente críticos, mas que não são solicitados em função dos padrões de tráfego gerados pelo uso do solo investigado (Portugal e Araújo, 2008, Kuzmyak, 2012).

Naturalmente, um planejamento do uso do solo adequado pode minimizar a ocorrência de congestionamentos. No entanto, Bertolini *et al.* (2005) afirmam que embora esse

¹ Arco ou aresta do grafo representativo da rede viária.

planejamento seja visto como essencial para o desenvolvimento sustentável, é frequentemente negligenciado. De forma complementar, Higgins e Campanera (2011) mencionam que um sistema de transporte adequado é um dos principais atributos relacionados à qualidade de vida sustentável em cidades.

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 contexto, diferentes autores têm proposto diferentes abordagens para a avaliação da rede viária empregando indicadores sob óticas distintas, de acordo com o atributo de desempenho a ser estudado, como pode ser visto em Lomax *et al.* (2003), Elefteriadou *et al.* (2012), Knoop *et al.* (2012), Snelder *et al.* (2012). De fato, além do congestionamento, os atributos Confiabilidade e Vulnerabilidade, entre outros comentados no Capítulo 2, têm sido utilizados com seus respectivos indicadores, adicionando novas dimensões à análise. Dessa forma, seria possível identificar links críticos para o desempenho e que mereçam um tratamento prioritário no sentido de mitigar uma potencial ineficiência, eventualmente ainda não evidenciada por congestionamento. Assim, embora a existência de congestionamento possa eventualmente decorrer da vulnerabilidade da rede viária e que esse congestionamento possa implicar em uma queda da confiabilidade, a avaliação de cada atributo torna possível uma análise complementar e mais efetiva de seu desempenho.

É importante ressaltar que, mesmo em redes que não apresentem congestionamento, há fatores que podem comprometer seu desempenho. Eventos naturais ou antropogênicos podem levar à interdição total ou parcial de segmentos da 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. Naturalmente, algumas cidades, ou regiões metropolitanas, como o Rio de Janeiro, são particularmente sensíveis a bloqueios viários, tendo em vista suas características geográficas (Oliveira, 2012).

Desastres de origem natural ou provocados pelo homem podem ter grande impacto na fluidez do tráfego. Sua ocorrência, no entanto, pode ser eventualmente pouco frequente,

o que leva seu tratamento para o âmbito de medidas de emergência e análises de cenários de exceção. Já eventos cotidianos, de menor porte, comprometem cotidianamente a capacidade de links da rede viária, com impacto relevante no fluxo de tráfego, dada a sua recorrência. Não devem esses eventos diários, portanto, ser menosprezados (Sullivan *et al.*, 2010).

De fato, pesquisas recentes têm observado uma tendência dos usuários em preferir rotas com tempo mais previsível (maior confiabilidade) em detrimento de rotas eventualmente mais rápidas, mas com maior variabilidade no tempo de viagem (Van Lint *et al.*, 2008). Isso explica a preocupação de governos, como o dos Países Baixos e da Suécia (Börjesson *et al.*, 2012), em fixar objetivos de confiabilidade na formulação de políticas de transporte.

A ampliação da infraestrutura viária nem sempre é a solução para o mau desempenho de redes viárias, como tem se tornado cada vez mais claro para os gestores de sistema de transportes. Na realidade, frequentemente, a consequência da ampliação da infraestrutura é o estímulo ao uso do automóvel particular, grande vilão dos congestionamentos, principalmente durante as viagens pendulares. Dessa forma, invariavelmente o volume de automóveis atraídos para a rede ampliada ultrapassa a capacidade e o congestionamento ressurgiu (Gonçalves *et al.*, 2009).

A complexidade do problema de otimização do desempenho e a frequente limitação de recursos orçamentários torna indispensável a utilização de ferramentas que permitam uma priorização de investimentos com base em critérios objetivos e consistentes. Daí a importância da discussão dos principais atributos de desempenho e a busca de indicadores e critérios para a determinação da importância relativa dos links componentes de uma rede, de forma a tornar possível uma ordenação de prioridades. Nesse sentido, vale destacar o papel do atributo Vulnerabilidade, cuja avaliação é fundamental para uma análise estratégica da importância de cada link na rede viária, de forma a que sejam identificados aqueles mais críticos, como discutido em Taylor *et al.* (2006), Murray *et al.* (2008), entre outros.

A identificação de links críticos para o desempenho e sua hierarquização permitiria o estudo de soluções alternativas, que não necessariamente passaria pela ampliação da capacidade da rede viária. De fato, políticas de valorização do transporte não motorizado e do transporte coletivo são opções que devem ser analisadas como soluções prioritárias, o que inclusive consta como diretriz do Ministério das Cidades do Brasil (Ministério das Cidades, 2015) para a elaboração de planos de mobilidade urbana.

1.2 Objetivos e hipóteses de trabalho

O objetivo proposto para a presente pesquisa admite que a necessidade de otimização do desempenho e a frequente limitação de recursos orçamentários torna indispensável a utilização de ferramentas que permitam uma priorização de investimentos com base em critérios objetivos e consistentes.

Nesse sentido, torna-se fundamental a identificação dos principais atributos de desempenho e de uma forma de monitorá-los por meio de indicadores.

O foco principal da presente pesquisa é a elaboração de uma estrutura metodológica que permita identificar links críticos para o desempenho de uma rede viária para alguns de seus principais atributos expressos por indicadores adequados.

Complementarmente, e de forma exploratória, decidiu-se analisar comparativamente os efeitos dos links críticos derivados dos diferentes atributos considerados. Para tal, é realizada uma aplicação em rede viária localizada na Região Metropolitana do Rio de Janeiro – RMRJ. Acredita-se que os resultados obtidos contribuem na concepção de uma abordagem que considere diferentes atributos e respectivos indicadores, bem como para que melhor seja entendida a relação entre eles.

Essa estrutura metodológica tem como produto final hierarquias de links por ordem de importância segundo um determinado atributo de desempenho. Vale ressaltar que essa estrutura é passível de ser aplicada, com baixos custos e prazos, a redes viárias complexas, tais como a representativa da RMRJ.

A multiplicidade de atributos associados ao desempenho da rede levou à necessidade de se delimitar um contorno para a pesquisa. Assim, decidiu-se focar a estrutura metodológica na análise de três atributos, dependentes da relação entre a oferta viária e demanda (tráfego veicular): Congestionamento, Confiabilidade e Vulnerabilidade. Esses três atributos têm sido bastante estudados recentemente, mas ainda carecem de uma conceituação mais adequada e precisa, notadamente Vulnerabilidade e Confiabilidade. Particularmente, foram encontradas apenas correlações limitadas entre atributos na bibliografia (normalmente menções quanto à congestionamento) e nenhuma menção à proposição de hierarquias de links críticos que envolvesse mais de um atributo.

O objetivo geral, portanto, da presente pesquisa, é contribuir para a redução dessa lacuna na literatura. De forma mais específica, os objetivos são:

- a) contribuir para uma melhor compreensão dos conceitos dos atributos selecionados para análise (Congestionamento, Confiabilidade e Vulnerabilidade);
- b) propor uma estrutura metodológica para a consideração de cada atributo de desempenho analisado na hierarquização de links em uma rede viária;
- c) testar, em uma rede viária complexa, a estrutura metodológica proposta com a aplicação de um indicador selecionado para cada um dos três atributos analisados;
- d) sugerir indicadores aderentes, passíveis de utilização de forma prática, com base em análise dos resultados dos testes realizados;
- e) estabelecer relações entre os indicadores, identificando e analisando semelhanças e diferenças entre as diferentes hierarquias resultantes da aplicação de cada um deles, a partir dos testes realizados.

Como base para o teste da estrutura metodológica desenvolvida, é utilizada a rede utilizada no Plano Diretor de Transporte Urbano da Região Metropolitana do Rio de Janeiro de 2005 (PDTU 2005 ou PDTU). Sobre a citada rede são realizadas simulações de forma a verificar as seguintes hipóteses:

- Congestionamento, Confiabilidade e Vulnerabilidade são atributos distintos; e
- A hierarquia de links na rede viária quanto à sua importância para o desempenho da rede viária é única para cada um dos atributos testados e não correlacionadas entre si.

1.3 Justificativa

Vários autores, como Litman e Doherty (2009), Schrank, Lomax e Eisele (2011) e Litman (2012a), têm, ao longo do tempo, proposto indicadores e índices que permitam avaliar o desempenho do tráfego veicular em uma rede ou em um trecho viário, uma boa parte deles ligada direta ou indiretamente ao nível de congestionamento observado.

Esforços têm sido empreendidos com a finalidade de inventariar e classificar os indicadores existentes, como, por exemplo, os realizados pelo Transportation Research Board dos EUA (TRB, 2006), Transportation Association of Canada (TAC, 2006), e pela Victoria Transport Policy Institute (Litman, 2009 e 2012a).

Outros autores têm se dedicado a analisar um grupo mais restrito de indicadores, como, por exemplo, Quiroga (2000) e Morán e Bang (2010). O *Texas Transportation Institute*

(Eisele *et al.*, 2011; Schrank *et al.*, 2011), por sua vez, produz periodicamente relatórios ordenando corredores e áreas nos EUA com base em diferentes indicadores de congestionamento.

Ainda nesse sentido, o *Federal Highway Administration* dos EUA concebeu um Processo de Gerência de Congestionamento onde um dos objetivos é uma mais efetiva alocação de recursos financeiros, com critérios de priorização baseados em indicadores (Grant *et al.*, 2011). Nesse estudo, Grant *et al.* (2011) abordam questões que devem ser consideradas para a determinação de objetivos para a gerência de congestionamentos. No entanto, 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 de um mau desempenho e melhorar esse desempenho da rede. Para tal, seria 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 se*, mas esse desempenho contextualizado no sistema viário.

Dessa forma, justifica-se o desenvolvimento de uma metodologia que permita uma análise que contemple outros atributos que não apenas o congestionamento, de forma a que seja produzida uma hierarquia de links que reflita a importância de cada um para o desempenho da rede, ou seja, que permita verificar o quão crítico cada link é para o desempenho. Essa hierarquia pode ser múltipla, com hierarquias associadas a cada um dos atributos considerados relevantes, de forma a permitir análises sob diferentes óticas.

1.4 Originalidade e contribuições da pesquisa

Embora a bibliografia apresente um amplo espectro de atributos de desempenho e indicadores, ainda não há um consenso em como utilizá-los de forma a produzir uma hierarquia que permita o conhecimento da importância de cada link para o desempenho da rede. De fato, não foi encontrado trabalho que proponha hierarquias derivadas de diferentes atributos de desempenho e que as analise de forma conjunta buscando semelhanças, diferenças e complementaridades. De uma forma geral, não foi encontrada proposição de estrutura metodológica para hierarquização de links sob a ótica de diferentes atributos, de forma sistemática, a partir de indicadores selecionados. Adicionalmente, observa-se que não há consenso quanto à conceituação de alguns

desses atributos mais relevantes. O conceito de confiabilidade, por exemplo, tem sido frequentemente tratado conjuntamente com o de vulnerabilidade (ou robustez, atributo recíproco), havendo na bibliografia pesquisada autores que tratam os dois atributos de forma indistinta (Chen *et al.* 2002; Lomax *et al.*, 2003) e outros que distinguem os dois conceitos (Taylor *et al.* 2006; Taylor e Susilawati, 2012).

Lomax *et al.* (2003), Elefteriadou *et al.* (2012), Knoop *et al.* (2012) e Snelder *et al.* (2012) são autores que elencaram indicadores de desempenho e comentaram sobre sua aplicabilidade à análise de redes viárias. O estudo desenvolvido por Elefteriadou *et al.* (2012) tem como objetivo recomendar mensurações ou índices que poderiam ser utilizadas para suportar a gerência do transporte multimodal, e, para tal, apresenta um elenco bem compreensivo de indicadores de desempenho. Knoop *et al.* (2012) elencam exclusivamente indicadores para a mensuração da vulnerabilidade, e que poderiam ser utilizados para a localização de links críticos em uma rede viária, analisando eventuais correlações existentes entre eles. Snelder *et al.* (2012) propõem uma metodologia para a avaliação da robustez de uma rede, uma conceituação mais precisa para a vulnerabilidade e robustez, mas não têm como objetivo o tratamento dos links mais críticos ou mais vulneráveis ou sua hierarquização. Lomax *et al.* (2003) preocupam-se com a confiabilidade da rede viária, mas não distinguem precisamente vulnerabilidade de confiabilidade.

Não se encontrou na bibliografia analisada preocupação em conceituar os principais atributos de desempenho de forma mais precisa, o que traz como consequência a dificuldade de se elencar esses atributos e suas definições, uma vez que há superposição de conceitos.

Adicionalmente, o estudo de indicadores tem sido predominantemente testado sobre redes mais simples como em Scott *et al.* (2006) e Sullivan *et al.* (2010), que utilizaram redes teóricas com cerca de 90 links. Como comparação, a presente pesquisa utiliza como base um modelo de rede viária com aproximadamente 60.000 links, da qual é extraída uma sub-rede de cerca de 1.200 links para análise mais detalhada. De fato, não foi encontrado qualquer estudo hierárquico de links com base em indicadores de desempenho tendo como suporte uma aplicação sobre rede que possa ser considerada como complexa, como uma região metropolitana.

Dessa forma, pode-se destacar como contribuições originais da presente pesquisa:

- A conceituação e distinção dos atributos de desempenho Congestionamento, Confiabilidade e Vulnerabilidade;

- A proposição de estrutura metodológica para a hierarquização de links críticos em uma rede viária, para cada um dos três atributos citados, com base em medidas de desempenho que sejam factíveis de serem calculadas ainda que com recursos limitados tanto financeiros como de tempo;
- A seleção de indicadores adequados, do ponto de vista de sua facilidade de adoção e aplicação, considerando-se uma rede viária complexa;
- A aplicação de estrutura metodológica para a obtenção de indicadores de Congestionamento, Confiabilidade e Vulnerabilidade, em uma rede complexa (Região Metropolitana do Rio de Janeiro), permitindo a mensuração dos indicadores para cada link, ou de um conjunto selecionado de links, resultando na hierarquização dos links por atributo segundo sua importância para o desempenho global da rede; e
- A verificação, a partir da aplicação da estrutura metodológica proposta, de correlação entre as hierarquias obtidas para os atributos Congestionamento e Confiabilidade e, por outro lado, a obtenção de evidências estatísticas de que o atributo Vulnerabilidade é distinto de Congestionamento e Confiabilidade e que as hierarquias produzidas a partir daquele atributo têm pouca ou nenhuma correlação com as derivadas dos demais.

1.5 Estrutura da Tese

A presente Tese está estruturada em sete Capítulos. O Capítulo 1 apresenta a introdução, onde é contextualizado o tema da Tese e são apresentados os objetivos, as hipóteses de trabalho, a justificativa, originalidade e contribuições da pesquisa. O Capítulo 2 apresenta uma revisão sobre atributos de desempenho tipicamente considerados em uma rede viária, com aprofundamento daqueles que são foco da presente pesquisa: Congestionamento, Confiabilidade e Vulnerabilidade. O Capítulo 3 conclui a parte conceitual da Tese com uma revisão sobre os principais indicadores de desempenho referentes aos atributos de interesse. Em seguida, o Capítulo 4 propõe uma estrutura metodológica para a hierarquização de links e para a análise de desempenho de redes complexas à luz dos três atributos enfocados pela pesquisa. Essa estrutura é composta por três níveis: a seleção e desenvolvimento de procedimentos para a obtenção de indicadores para a hierarquização de cada atributo; a realização de teste dos procedimentos sobre rede viária complexa; e análise dos resultados obtidos. Os Capítulos 5 e 6 testam então a estrutura metodológica proposta através de sua

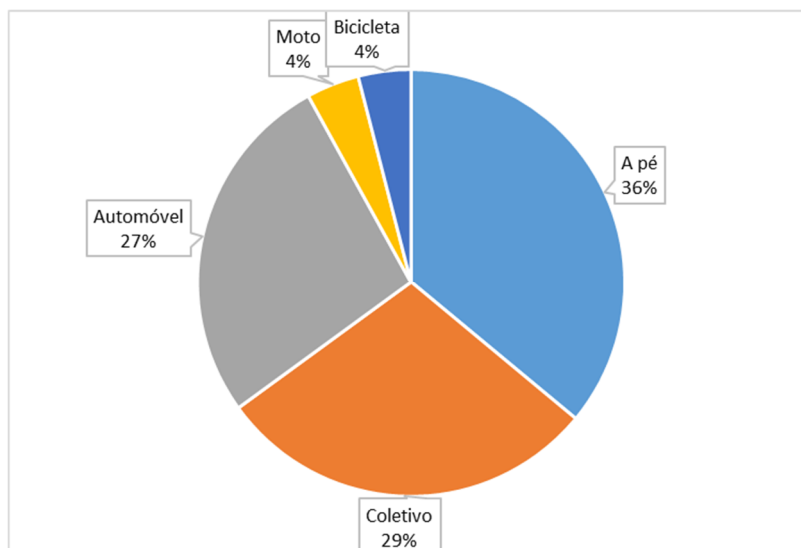
aplicação à uma rede viária representativa da Região Metropolitana do Rio Janeiro e de uma análise qualitativa e numérica. Finalmente, o Capítulo 7 apresenta as conclusões e recomendações finais da pesquisa realizada.

2. ATRIBUTOS DE DESEMPENHO

2.1 Considerações iniciais

A intensidade dos deslocamentos urbanos guarda uma relação positiva com a intensidade das atividades socioeconômicas e culturais. Dessa forma, com o desenvolvimento econômico, há um aumento na intensidade dos deslocamentos urbanos. O conseqüente aumento do valor e da densidade de uso do solo repercute ainda no crescimento da densidade e área de ocupação urbana, o que tende a provocar ou ampliar os congestionamentos de tráfego (Oliveira, 2012). Com isso, os custos de transporte têm crescido ao longo do tempo, e, na maioria das cidades, há uma percepção de queda no desempenho da rede viária. A resposta tradicional tem sido a ampliação da rede viária, o que, no entanto, não parece resolver o problema.

Há ainda uma percepção de que o modelo de planejamento do transporte urbano baseado no uso do transporte individual motorizado está esgotado. De fato, há um consenso de que as vias urbanas devem ser repensadas, transformando-se em espaços de convivência e multimodalidade, servindo não só aos modos de transporte motorizados, mas também aos modos não motorizados, como a viagem a pé e por bicicleta. Foi cunhado inclusive o termo “*Complete Streets*” ou “Ruas Completas” para designar um novo paradigma viário, onde há espaço para o tráfego seguro de bicicletas, a travessia de pedestres e os diversos modos motorizados de transporte, coletivos e individuais. (National Complete Streets Coalition, 2015). Segundo a ANTP (2014), 40% dos deslocamentos no Brasil, em 2012, eram realizados por modo de transporte não motorizado (36% a pé, 4% de bicicleta). O transporte individual motorizado responderia por 31% dos deslocamentos (27% automóveis, 4% motocicletas), ficando os transportes motorizados coletivos com cerca de 29% dos deslocamentos, considerando cidades com mais de 60.000 habitantes (Figura 2.1). Em cidades acima de 1 milhão de habitantes, a proporção do transporte não motorizado cairia para 35,6%, elevando-se o transporte motorizado para 64,4% das viagens, sendo 32,6% referente ao transporte individual e o restante ao transporte coletivo. Embora haja um aparente equilíbrio entre os três grupos modais citados (Não Motorizado, Motorizado Individual e Motorizado Coletivo), o impacto do automóvel (quase 90% das viagens por transporte individual motorizado) no tráfego é desproporcional. De fato, a baixa capacidade do automóvel (normalmente 4 ou 5 passageiros, mas com uma ocupação média normalmente inferior a 2) faz com que a presença desse veículo seja predominante no tráfego, e se torne o principal ator na formação de congestionamentos.



Fonte: ANTP (2014)

Figura 2.1 – Divisão modal dos deslocamentos no Brasil, consideradas cidades com mais de 60.000 habitantes.

Dessa forma, optou-se pelo enfoque, na presente pesquisa, do desempenho da rede viária sob o ponto de vista do transporte motorizado, particularmente automóveis, utilizando-se de indicadores com esta mesma finalidade. Isso não significa uma opção favorável ao deslocamento por automóvel, ou mesmo por transporte motorizado, mas sim o reconhecimento de que o automóvel constitui um grande problema para o desempenho da rede viária, que merece ser estudado. Os atributos de desempenho discutidos, no entanto, podem ser aplicados ao fluxo misto de veículos que trafega em uma rede viária. De fato, os ônibus podem exercer um papel importante no congestionamento, e a racionalização de sua operação, com frota e frequência adequadas, pode ser uma ferramenta para mitigação de congestionamentos.

Feitelson e Salomon (2000) já detectavam uma tendência de aumento de volume de tráfego na maioria das redes viárias. Atribuíam esse fato ao crescente número de usuários potenciais (derivado do crescimento econômico) e aos custos crescentes de expansão da rede, em função do aumento da competição pelo território e da crescente preocupação com a conservação do meio ambiente.

Naturalmente, a importância de se medir e monitorar o desempenho das redes viárias cresce à medida em que a percepção de queda desse desempenho também cresce.

Embora o congestionamento seja o principal sintoma do mau desempenho de uma rede, não é o único atributo de desempenho que deve ser considerado. Assim, inúmeros estudos têm sido realizados buscando identificar esses atributos e indicadores de forma a permitir uma medição de desempenho sob diferentes óticas. O TRB (2006), a

propósito, discute a importância de se estabelecer medidas que permitam uma forma mais efetiva de alocar recursos para a preservação, operação e melhoria na infraestrutura de transportes. Dessa forma, elenca premissas para uma seleção de indicadores, que deveriam ser úteis para:

- Analisar alternativas de investimento;
- Informar ao público as metas do gestor no que diz respeito ao desempenho;
- Tomar decisão em nível estratégico;
- Dar suporte à definição de metas e objetivos para o desempenho do sistema;
- Permitir análises e tomadas de decisão envolvendo múltiplos modos de transporte; e
- Medir impactos econômicos, sociais, ambientais e de segurança.

Para que os diversos aspectos que influenciam o desempenho de rede possam ser avaliados, é necessário elencar os principais atributos que deveriam ser mensurados.

Na bibliografia analisada encontra-se diversos estudos sobre diferentes atributos de desempenho, sem, no entanto, haver um consenso sobre uma relação exaustiva desses atributos e seus conceitos. De fato, há em vários casos definições contraditórias ou com conceitos superpostos.

McLeod e Morgan (2011) definem quatro dimensões que devem ser analisadas para avaliar a mobilidade em uma rede:

- Quantidade de viagens – mede a magnitude do uso dos serviços ou vias, com indicadores como veículos.km percorridos; pessoas.km; total de viagens por transporte público;
- Qualidade da viagem – satisfação do usuário quanto ao serviço oferecido;
- Acessibilidade – facilidade com que viajantes podem acessar as atividades desejadas; e
- Utilização da capacidade – indicadores de utilização da via em relação à capacidade, por exemplo: densidade de veículos nas vias; % da extensão congestionada. Indica a eficiência do uso de recursos que deve ser nem tão alto que comprometa a possibilidade de atender uma demanda um pouco maior, nem tão baixo que indique desperdício de recursos.

Afirmam ainda que, se apenas uma das dimensões for considerada, a análise da mobilidade é prejudicada e, conseqüentemente o desempenho do sistema.

Oliveira (2012), destaca as funções principais que uma rede deve exercer para que possa ser considerada com bom desempenho, e seus respectivos atributos:

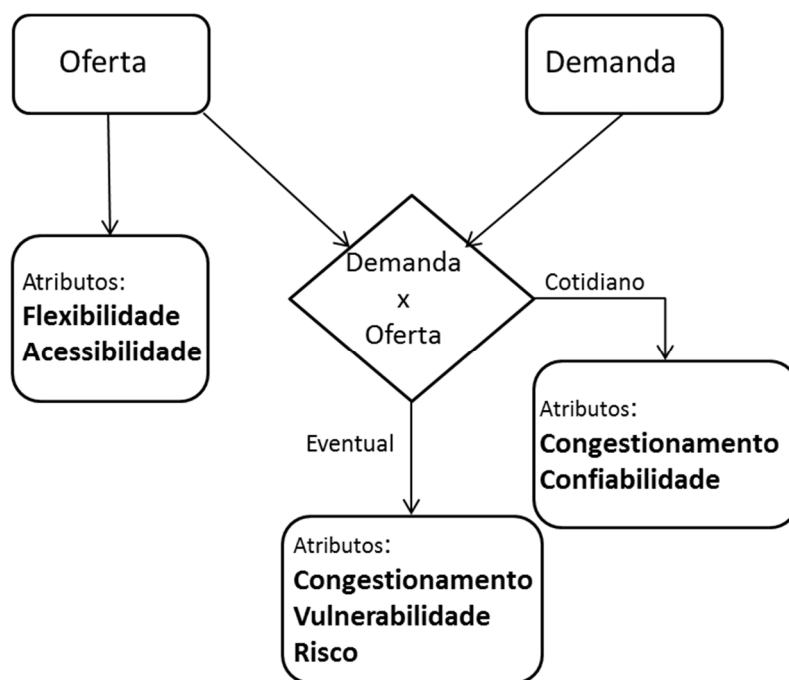
- Oferecer nível de serviço adequado, principalmente no que se refere à fluidez do tráfego, com vias des congestionadas – atributo Congestionamento;
- Proporcionar previsibilidade quanto a tempo e custo de viagem – atributo Confiabilidade;
- Minimizar vulnerabilidade, ou seja, ser resiliente a eventos que possam afetar um ou mais de seus links – atributo Vulnerabilidade;
- Minimizar a probabilidade de queda de desempenho decorrente do mau funcionamento de links críticos, inclusive quanto à segurança – atributo Risco;
- Ser flexível, oferecendo rotas alternativas entre pares de origem e destino – atributo Flexibilidade; e
- Proporcionar acessibilidade equivalente no que diz respeito a tempo e custo entre todas as zonas de uma região – atributo Acessibilidade.

Percebe-se que os atributos identificados acima atendem às premissas propostas por TRB (2006), na medida em que os indicadores derivados podem auxiliar a gestão da infraestrutura de transporte da forma como explicitada. Percebe-se ainda que há alguma superposição entre os atributos relacionados e as dimensões propostas por McLeod e Morgan (2011) para a monitoração da mobilidade, o que indica que os indicadores derivados dos atributos poderiam ser utilizados também na avaliação do desempenho da mobilidade.

Para cada atributo relacionado há vários indicadores que vêm sendo estudados, como pode ser observado (entre outros) em Boarnet *et al.* (1998), Liu e Frangopol (2006), TRB (2010), Elefteriadou, (2012), sobre Congestionamento; Bell (2000); Bates *et al.*, (2001); Eliasson (2006, 2007 e 2009), sobre Confiabilidade; Berdica (2002), Nicholson (2003), Jenelius *et al.* (2006), Jenelius e Mattson (2012), sobre Vulnerabilidade; Berdica (2002), Nicholson (2003), sobre Risco; Feitelson e Salomon (2000), sobre Flexibilidade; e Hansen (1959) sobre Acessibilidade.

Os atributos identificados podem ser classificados em dois grupos principais: aqueles cujos indicadores dependem da relação entre demanda e oferta e aqueles que dependem exclusivamente da oferta. São incluídos no primeiro grupo os atributos: Congestionamento, Confiabilidade, Vulnerabilidade e Risco. No segundo grupo ficam os atributos restantes: Flexibilidade e Acessibilidade. O primeiro grupo pode ainda ser

subdividido conforme a recorrência² ou não de queda de desempenho da rede. O Congestionamento aparece tanto no subgrupo Cotidiano (representando problemas recorrentes de desempenho) como no subgrupo Eventual (para problemas não recorrentes); a Confiabilidade é enquadrada no subgrupo Cotidiano enquanto que Vulnerabilidade e Risco no subgrupo Eventual. Esse agrupamento pode ser visualizado esquematicamente na Figura 2.2, apresentada a seguir.



Fonte: Oliveira *et al.* 2014^a

Figura 2.2 – Classificação de atributos de desempenho.

Como delimitação da presente pesquisa, optou-se pela análise dos atributos do primeiro grupo (demanda x oferta), e que contrapõem demanda à oferta. Tendo em vista a frequente indisponibilidade de dados e a dificuldade de obtenção das informações necessárias para a avaliação de risco, se torna difícil sua inclusão em uma estrutura metodológica que visa ser utilizada, de forma sistemática, em redes urbanas complexas. Adicionalmente, pretende-se testar a estrutura metodológica desenvolvida em rede representativa da Região Metropolitana do Rio de Janeiro, para as quais não se tem as informações necessárias para análises de risco. Dessa forma, optou-se pela exclusão do atributo Risco da análise realizada. Assim, o contorno da presente pesquisa foi delineado de forma a abranger os atributos Congestionamento, Confiabilidade e Vulnerabilidade.

² Repetição frequente; no caso, pretende-se distinguir os congestionamentos recorrentes, ou cotidianos, daqueles que ocorrem eventualmente, com baixa frequência.

2.2 Congestionamento

2.2.1 Conceituação de congestionamento

Meyer (1997) afirma que o congestionamento de tráfego surge quando a quantidade de pessoas ou veículos tentando usar um determinado recurso de transporte, em um período específico de tempo, é maior do que a sua capacidade de atendê-la, considerando-se determinado nível de conveniência ou serviço. Stopher (2004), por sua vez, propõe que o congestionamento surge quando o volume de entrada (demanda) supera a capacidade de saída (capacidade da via). Zhang e Lomax (2007) conceituam o fenômeno em função da densidade do tráfego, associando o congestionamento a uma densidade tal que os veículos estariam a uma distância mínima uns dos outros. Coelho (2009), particularizando, afirma que o congestionamento se forma pela incapacidade de absorção de veículos por parte do sistema viário existente.

Em síntese, pode-se afirmar que o congestionamento em um segmento de uma rede viária surge quando a demanda por fluxo de tráfego se aproxima ou excede a capacidade de escoamento estável da via.

Deve-se ressaltar que tal demanda é influenciada pelo desenvolvimento econômico, cujo aumento nas atividades socioeconômicas e culturais implica em um provável aumento na intensidade dos deslocamentos urbanos. Esse fato repercute no crescimento da densidade e da área de ocupação urbana e, conseqüentemente, no aumento dos congestionamentos, induzindo o aumento dos custos de transporte e a ampliação da rede viária, principalmente quando a divisão modal é baseada no tráfego rodoviário. Feitelson e Salomon (2000) discutem o encadeamento dessas conseqüências no desenvolvimento da mobilidade urbana.

De fato, a ocorrência de congestionamento depende da distribuição espacial dos fluxos de veículos, que são influenciados, por sua vez, pela localização e interação das atividades socioeconômicas (Oliveira *et al.*, 2016). Essa característica reforça a importância da utilização de outros atributos, além do congestionamento, na análise do desempenho da rede viária, tendo em vista que links potencialmente críticos podem não estar sob congestionamento, dependendo dos padrões de tráfego gerados pelo uso do solo (Portugal e Araújo, 2008, Kuzmyak, 2012).

Portanto, em ambientes urbanos, o congestionamento é muitas vezes parte da rotina diária, resultado do tráfego crescente e da insuficiência de capacidade de escoamento em trechos viários. A sistemática do congestionamento em uma rede é, no entanto,

complexa, tendo em vista a dinâmica do fluxo de veículos e a interação entre os links, cujos carregamentos e possíveis congestionamentos afetam e são afetados pelos demais, o que dificulta a determinação da raiz do problema e as consequentes soluções. Assim, o congestionamento pode ser recorrente, nos horários de pico de viagens pendulares ou podem ser decorrentes de incidentes ocasionais como obras viárias, acidentes e outras obstruções (Litman e Doherty, 2009; Oliveira, 2012). Pode ainda ser sazonal ou ocorrer em fins-de-semana ou feriados (Cerwenka e Meyer-Ruhle, 2009).

Alguns autores procuraram classificar o nível de congestionamento, principalmente no que diz respeito à relação entre volume (demanda) e capacidade (V/C). Coelho (2009), por exemplo classifica as vias congestionadas como:

- 1) Via saturada – quando a relação estiver próxima de atingir a unidade: $V/C \sim 1$;
- 2) Via supersaturada – quando ultrapassar a unidade: $V/C > 1$.

Estudo realizado pelo IPEA e ANTP (1998) classifica o congestionamento em três níveis:

- 1) Congestionamento leve: $0,7 \leq V/C \leq 0,84$;
- 2) Congestionamento moderado: $0,85 \leq V/C \leq 0,99$;
- 3) Congestionamento severo: $V/C \geq 1$.

Litman e Doherty (2009), propõem a seguinte classificação:

- 1) Abaixo da capacidade: $V/C < 0,85$;
- 2) Próximo à capacidade: $0,85 \leq V/C \leq 0,95$;
- 3) Operação na capacidade: $0,95 < V/C \leq 1,00$;
- 4) Acima da capacidade: $V/C > 1$.

Percebe-se, pelas classificações apresentadas acima, que uma via pode ser considerada como congestionada quando o fluxo se aproxima da capacidade, e que alguns autores implicitamente admitem que esse fluxo pode até mesmo superar a capacidade viária estimada.

Bremmer (2004) discute a importância de se distinguir congestionamentos recorrentes dos não-recorrentes. Define como congestionamento recorrente aquele relativamente previsível e que ocorre de forma cotidiana em uma operação típica. Clark e Watling (2005), reforçam a importância de pequenos incidentes, que, embora menos severos, mas mais frequentes, podem impactar de forma relevante o desempenho de uma rede viária. Cita a flutuação na oferta, em função de falhas na sinalização, estacionamentos

em locais proibidos entre outros distúrbios como causas para o congestionamento recorrente. Cita ainda a flutuação da demanda, uma vez que a matriz de viagens é sujeita a variações cotidianas. O congestionamento não-recorrente, por sua vez, poderia ser definido como um congestionamento inesperado ou não usual provocado por causas não previsíveis ou eventos aleatórios, inclusive transitórios, como acidentes e obras viárias, entre outros (Bremmer, 2004).

Já no final da década de 1960, Vickrey (1969) se preocupava em classificar algumas das possíveis causas dos congestionamentos, aplicáveis principalmente a congestionamentos recorrentes:

- Interação simples: ocorre principalmente em congestionamento leve, quando dois veículos se aproximam suficientemente para que se preocupem com a possibilidade de uma colisão, provocando um atraso no fluxo;
- Interação múltipla: ocorre quando o volume se aproxima da capacidade, em densidades de tráfego elevadas. Nesse caso haveria um incremento marginal no atraso a cada novo veículo adicionado ao fluxo;
- Gargalo: ocorre quando ao longo da rota há um trecho onde a capacidade é mais reduzida, o que ocasionará um congestionamento sempre que a demanda entrante no trecho se aproximar ou superar a capacidade ofertada;
- Gatilho decorrente de gargalo (*triggerneck*): ocorre quando um gargalo provoca uma retenção à montante de tal magnitude que afeta mesmo o tráfego que não tem intenção de atravessar o trecho de gargalo. Essa situação, em seu extremo, pode provocar o colapso do tráfego, com uma parada total do fluxo;
- Controle de fluxo: ocorre em situações onde a presença de sinalização de controle é não ótima, provocando retardo no fluxo, como no caso de semáforos com tempos de fase programados para um período específico e aplicados em outros horários; e
- Aumento generalizado da densidade: ocorre quando há um aumento generalizado na demanda e, conseqüentemente, no fluxo, o que pode levar a uma aproximação da capacidade viária em uma região, independentemente da existência ou não de gargalos.

Já Bremmer *et al.* (2004) chamam atenção para congestionamentos não-recorrentes, decorrentes de acidentes, eventos climáticos naturais e obras viárias, que respondem por parcela significativa do total de trechos congestionados. De fato, Charles (2005) estima que 50% do congestionamento em grandes cidades da Austrália estão incluídos nesta categoria. A UK Highways Agency (2002) estima essa percentagem em 25% para

as vias troncais britânicas. Esse percentual elevado demonstra a importância não só da mensuração dos congestionamentos nessas circunstâncias, mas também de tratar de forma diferenciada os congestionamentos recorrentes e os não-recorrentes.

Como será discutido mais adiante no decorrer desta pesquisa, os congestionamentos recorrentes guardam uma relação estreita com o atributo Confiabilidade, enquanto que o atributo Vulnerabilidade é mais relacionado com congestionamentos não-recorrentes.

2.2.2 Causas e efeitos do congestionamento

Como efeito direto do congestionamento observa-se um aumento no tempo de viagem decorrente da redução da velocidade média, além de uma menor confiabilidade nesse tempo dada a instabilidade do regime de tráfego. De fato, Eliasson (2007, 2009) mostrou que a variabilidade do tempo cresce com o grau de congestionamento viário. Há ainda um aumento no custo operacional veicular, também decorrente da redução da velocidade e de possíveis aumentos do número e da extensão das paradas e consequentes atrasos.

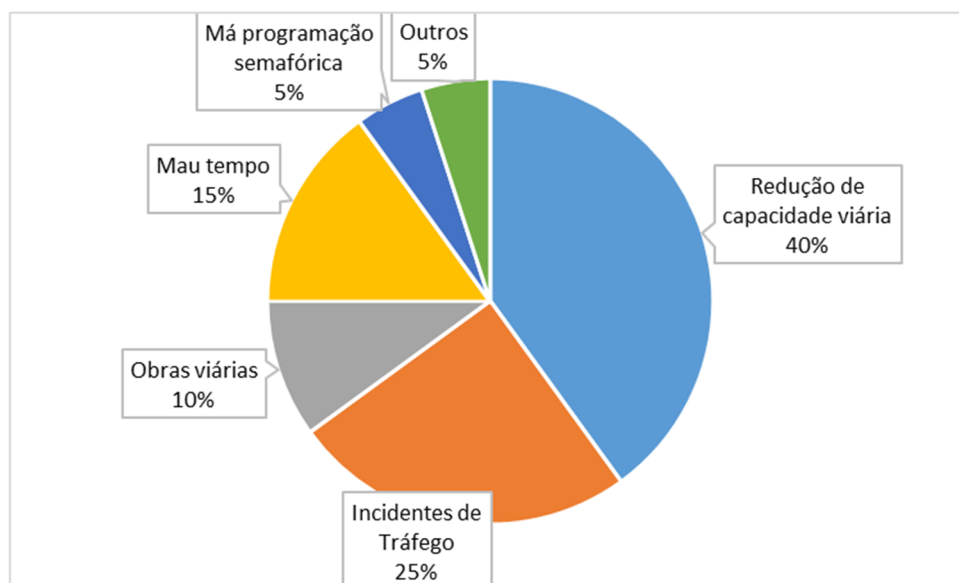
Além dos aumentos nos custos de tempo de viagem e de operação veicular (Erath *et al.*, 2010), estudos realizados por Salomon e Mokhtarian (1997), IPEA/ANTP (1998) e Stopher (2004) indicam o aumento nas emissões de poluentes e o custo ambiental daí derivado. A importância crescente dos custos ambientais tem levado a esforços de internalização desses custos na Europa, com a quantificação dos efeitos do tráfego sobre o clima (Comission Of The European Communities, 2008).

Adicionalmente, há impactos comportamentais que afetam o indivíduo e a sociedade, como por exemplo a modificação dos horários de deslocamento casa–trabalho e mesmo a opção por uma mudança de residência ou de emprego. Cambridge Systematics e Texas Transportation Institute (2005), por exemplo, apontam sete principais causas imediatas para o congestionamento:

- Restrições físicas – capacidade viária – quando o fluxo de veículos se aproxima da capacidade viária provocando queda no nível de serviço;
- Incidentes de tráfego – quando incidentes tais como colisões entre veículos e obstáculos na via geram uma impedância adicional no deslocamento, com consequente redução na capacidade;
- Obras viárias – que podem ter como consequência a redução no número de faixas de rolamento, na largura das faixas ou mesmo interdição total de vias, com consequente redução na capacidade;

- Condições climáticas – quando a variação no clima, como, por exemplo, na presença de chuva, provoca mudança no comportamento dos usuários, com consequências no fluxo de tráfego;
- Controle de tráfego – semáforos, entre outros – quando as interrupções periódicas do fluxo de tráfego eventualmente geram congestionamentos, principalmente se mal dimensionadas;
- Eventos especiais – quando eventos esportivos, espetáculos, geram mudanças no comportamento do fluxo de tráfego;
- Flutuações no tráfego normal – sendo a demanda por viagens de natureza estocástica, é normal sua variação no dia-a-dia, o que, combinado à uma capacidade viária fixa, pode levar a tempos de viagem não confiáveis e a congestionamentos.

A Figura 2.3 apresenta a distribuição das principais causas de congestionamento no EUA.



Fonte: Cambridge Systematics e Texas Transportation Institute (2005)

Figura 2.3 – Distribuição das causas de congestionamento nos EUA.

Salomon e Mokhtariam (1997) atribuem o congestionamento à dependência crescente do automóvel pelo usuário urbano, sem preocupação com externalidades decorrentes. De fato, a frota de veículos automotores no Brasil cresceu de 24,5 milhões de veículos em 2001, para 50,2 milhões ao final de 2012 (INCT, 2013), um crescimento de cerca de 105%, ou seja, a quantidade de automóveis mais do que dobrou no período. Isso significa um crescimento de cerca de 6,7% a.a., enquanto que a população, entre os censos de 2000 e 2010, cresceu 12,5% (IBGE, 2010), ou 1,2% a.a. Adicionalmente, a

frota de motocicletas cresceu de 4,5 milhões em 2001 para 19,9 milhões em 2012 (INCT, 2013). De fato, houve, intencionalmente ou não, uma política de incentivo ao transporte individual, principalmente a partir da segunda metade do século XX. Dessa forma, para solucionar os problemas de congestionamento, optou-se preferencialmente pela ampliação do sistema viário, seja com a implantação de vias adicionais seja com a ampliação da capacidade das vias existentes. Essa opção resultou em uma crise de mobilidade urbana, como a que enfrentam hoje as principais cidades brasileiras, e tal como descrito no relatório da ANTP (2013). O sistema de transporte coletivo foi se tornando gradativamente mais ineficiente, com os ônibus competindo com os automóveis pelo espaço viário. De fato, em cidades como Rio de Janeiro e São Paulo, o bonde foi praticamente erradicado como transporte público, sob o argumento de que “atrapalharia o trânsito” (ANTP, 2013). Assim, não seria um exagero afirmar que o automóvel seria o principal “vilão” do tráfego nas cidades, e o principal responsável pelos congestionamentos e pela queda no desempenho da rede viária.

Depuy (1999) discute esse tema da dependência do automóvel, e relaciona os principais fatores explicativos:

- Efeito clube – o proprietário de automóvel se sente pertencente a um clube exclusivo, com maior autonomia para suas viagens individuais;
- Efeito frota – quanto maior a frota de automóveis em circulação, maior a demanda por serviços de manutenção, com o conseqüente aumento da rede de atendimento, o que tem como resultado o aumento da sensação de segurança derivada da disponibilidade de serviços;
- Efeito da rede de transporte – o usuário de automóvel tem maior acessibilidade às opções de rota, em função de sua autonomia, apesar de eventualmente enfrentar congestionamentos;
- Combinação de efeitos – a combinação dos efeitos dá ao usuário de automóvel vantagem relativa em relação aos modos de transporte coletivo.

A política de mobilidade brasileira (Ministério das Cidades, 2015), em teoria, tenta reverter esse quadro, invertendo, em suas recomendações, a prioridade dos modos de transporte, privilegiando os modos não motorizados em relação aos motorizados e os coletivos em relação aos individuais.

Um enfoque do ponto de vista econômico quanto à origem dos engarrafamentos foi abordado por outros autores. Para eles, a principal motivação de uma viagem, em um determinado momento, deriva da maior utilidade de se estar em um lugar de destino em

relação em se estar no local de origem (Engelson e Fosgerau, 2011). Stopher (2004), também com base na teoria econômica, buscou uma explicação através da relação preço e volume de viagens. Segundo ele, o aumento progressivo da renda por capita levaria a um aumento da demanda por viagens, com o agravamento progressivo dos congestionamentos. É fácil perceber que, com o incentivo ao uso de automóveis e sem uma política de incentivo ao transporte coletivo público, a tendência observada é acirrada, principalmente em áreas urbanas.

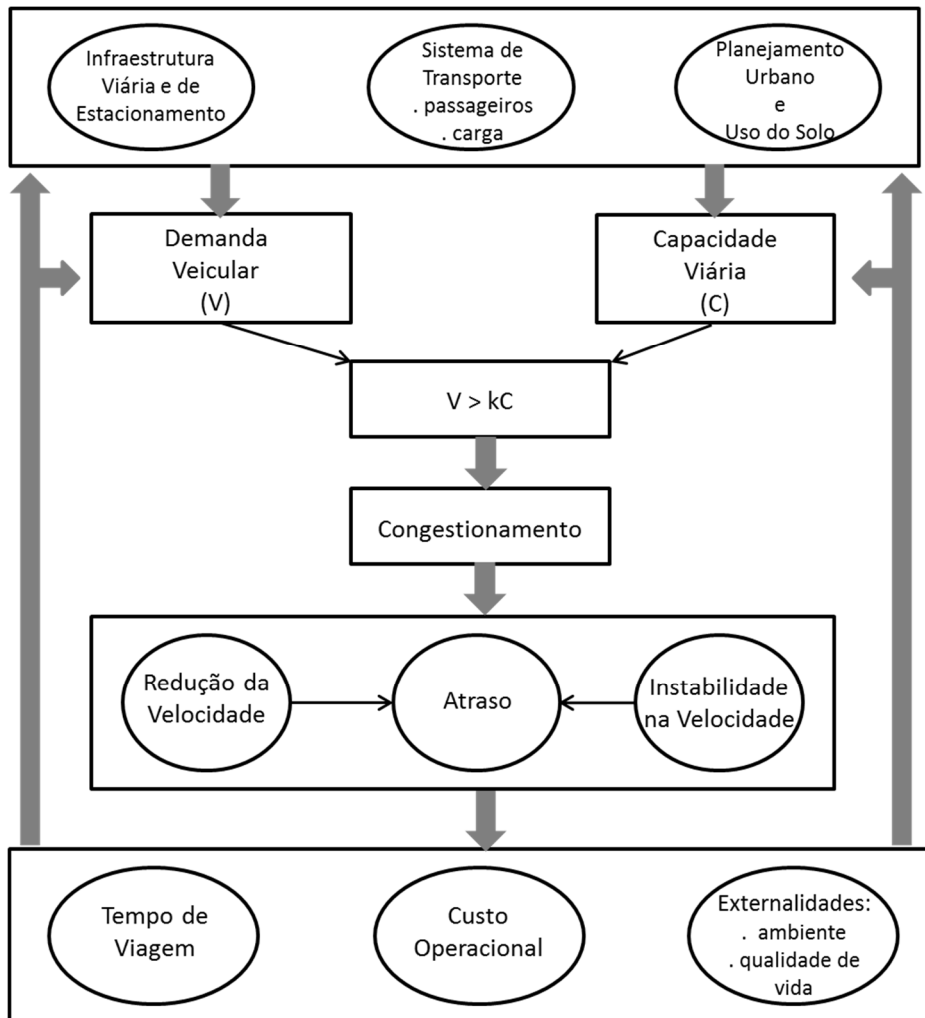
Naturalmente, uma das consequências do congestionamento é o aumento no custo de transporte. Safirova *et al.* (2007), de fato, chamam atenção para o fato de que os custos de congestionamento são geralmente subestimados, por serem calculados em nível de link desprezando as externalidades e o impacto na rede viária.

Com posição diversa, Taylor (2002) acredita que os custos de congestionamento são superestimados. Afirma que as transações econômicas e as interações sociais são mais intensas nas maiores cidades e que sofrem com congestionamentos, enquanto que cidades com menor atividade econômica tendem a ter um tráfego menor. Com isso, entende que o congestionamento é um efeito, embora indesejado, do alto desenvolvimento em espaço limitado, como os grandes centros. Aponta ainda para o fato de que os congestionamentos tendem a se concentrar nas vias expressas e que os congestionamentos em vias expressas não são a medida mais adequada para se medir o impacto na população. Há consenso, portanto, no fato de que o congestionamento gera um custo adicional ao transporte, embora não haja consenso quanto a mensuração desse custo. Pela própria argumentação de Taylor (2002), depreende-se que a relevância do congestionamento pode ser vista também em função do tipo de via afetada. Por esse ponto de vista, enquanto que congestionamentos em vias arteriais seriam, de certa forma, esperados, congestionamentos em vias locais seriam sinal mais forte de mau desempenho da rede. Ainda com relação à localização espacial do congestionamento, Zhang e Lomax (2007) consideram menos crítico o congestionamento restrito ao centro de uma cidade do que aquele observado em áreas mais periféricas.

Grandes cidades com transporte sobre trilhos integrado tendem a ter custos de congestionamento significativamente inferiores aos custos em cidades de porte semelhante com transporte exclusivamente rodoviário, essa redução podendo atingir 50% (Litman, 2012b). Além da disponibilização de modos de maior capacidade, outras medidas podem reduzir o congestionamento e seus custos. O planejamento urbano e do uso do solo podem incentivar deslocamentos menores e mais propensos ao uso do

transporte não motorizado (ITDP, 2014), tendo efeito, portanto, de potencialmente reduzir o congestionamento ou evita-lo.

Como visto na Figura 2.4, a infraestrutura viária, a caracterização do sistema de transporte e o planejamento urbano e do uso do solo condicionam a capacidade viária e a demanda veicular. Quando a relação entre a demanda e a capacidade se aproxima de 1, tem-se o congestionamento. Como resultado, há não só uma redução na velocidade, gerando atrasos, como esses atrasos não são facilmente previsíveis, dada a instabilidade na velocidade. Esses fatores impactam o tempo e o custo de viagem, com impactos diretos no meio ambiente e na qualidade de vida, que, por sua vez realimentam o ciclo.



k: fator que multiplica a capacidade viária, já que o congestionamento pode ocorrer mesmo com $V < C$ tal como em Lindley (1987), IPEA/ANTP (1998) e Litman e Doherty (2009)

Figura 2.4 – Conseqüências do Congestionamento.

Embora o congestionamento não recorrente, decorrente de acidentes e outros imprevistos possa ter um impacto significativo no tempo de viagem, seu impacto é limitado no tempo. O congestionamento recorrente, por outro lado, pode provocar mudanças importantes no comportamento dos usuários. De fato, há dois comportamentos possíveis para o usuário: a aceitação (com adaptação às novas condições) ou a mudança de hábitos (Oliveira, 2012). O quadro 2.1 sumariza esses comportamentos.

Quadro 2.1 – Reação do usuário ao congestionamento.

ACEITAÇÃO		MUDANÇA	
VIAGEM	TRABALHO	VIAGEM	TRABALHO
Aceitação dos novos tempos e custos de viagem	Adoção de Horário Flexível	Mudança de Rota	Mudança de trabalho
Conforto a bordo: Som, ar condicionado, GPS, etc.	Tecnologia: <i>Smartphones,</i> <i>Tablets,</i> <i>Notebooks</i>	Sair mais cedo	Mudança de residência
			Parar de trabalhar

Fonte: Oliveira (2012)

As consequências do congestionamento e seu impacto em decisões que envolvem o planejamento urbano e todo o sistema de transporte justificam o estudo de indicadores que permitam seu adequado diagnóstico e monitoramento além de análises comparativas que permitam estabelecer uma hierarquização para subsidiar prioridades.

2.3 Confiabilidade

2.3.1 Conceituação de confiabilidade

Uma das consequências derivadas de uma rede viária congestionada é a dificuldade de se prever o tempo de viagem e, conseqüentemente, seu custo. Bell (2000) considera como uma rede confiável aquela na qual os custos de viagem são aceitáveis mesmo quando os usuários estão extremamente pessimistas quanto ao estado dessa rede. Essa definição pode ser considerada excessivamente genérica, uma vez que inclui aspectos que podem ser mais bem associados ao atributo Vulnerabilidade. De fato, é crescente o entendimento de que a confiabilidade deve ser associada a eventos recorrentes. Li *et al.* (2010), por exemplo, afirmam que o conceito de confiabilidade traz em si a ideia de repetição, devendo a confiabilidade do tempo de viagem, por exemplo, ser apurada com base em múltiplas viagens sobre a mesma rota. Eventos não

recorrentes, como acidentes, obras viárias e outros, não deveriam ser considerados quando se busca conhecer a confiabilidade de uma rede viária.

Mais comumente a confiabilidade é associada à variabilidade do tempo de viagem, o que pode ocorrer por diversos fatores, que provocam flutuações na oferta e na demanda ao longo do tempo. Quanto menor for essa variabilidade, mais confiável é a rede ou o modo de transporte analisado e, conseqüentemente, mais confiável é a estimativa do tempo de viagem. Vários autores propõem como indicadores para essa variabilidade a variância ou o desvio padrão do tempo de viagem, como Fosgerau e Karlstrom (2010). Sendo o tempo disponível escasso e os custos alocados a transporte significativos, é fácil perceber a importância em conhecer não só a magnitude do tempo dispendido em uma viagem, mas também a sua variabilidade. Há, portanto, custos associados à essa variabilidade e à necessidade de usuários saírem mais cedo para diminuir o risco de chegarem atrasados a seus destinos (Jenelius *et al.*, 2011). De fato, Fosgerau e Karlstrom (2010) estimam em 15% a parcela referente à incerteza em relação ao total dos custos de tempo de viagem em uma via urbana típica.

Segundo Li *et al.* (2010), a maioria dos estudos ligados à confiabilidade investigam as variações cotidianas no tempo de viagem e tendem a definir a confiabilidade do tempo de viagem como uma variação aleatória no tempo de viagem (por exemplo, Bates *et al.*, 2001).

Chen *et al.* (2002) consideram uma dimensão adicional, que chamam de confiabilidade da capacidade e que trataria do potencial de absorção de demanda por uma determinada rede. Entende-se, no entanto, que essa dimensão foge do conceito aqui considerado para confiabilidade, uma vez que, de fato, trata-se da discussão da capacidade viária em nível de rede, e não da incerteza em relação a tempos de viagem ou mesmo a custos. Naturalmente, uma rede próxima da sua capacidade tende a ser pouco confiável, mas essa confiabilidade (ou não confiabilidade) seria um atributo distinto.

Pesquisas recentes têm mostrado uma tendência de usuários optarem por rotas de tempo mais previsíveis, ou mais confiáveis, ainda que o tempo esperado possa ser maior (Van Lint *et al.*, 2008, Li *et al.*, 2010). Esse fato tem impactado a gestão do setor de transportes, com governos como o dos Países Baixos e da Suécia fixando objetivos de confiabilidade na formulação de política de transportes (Börjesson *et al.*, 2012). Adicionalmente, já se percebe uma tendência no sentido de que a variabilidade do

tempo de viagem seja incorporada aos modelos de simulação de desempenho de redes de transporte (Engelson e Fosgerau, 2011).

Chen *et al.* (2002) chamam a atenção de que a confiabilidade do tempo de viagem não se refere apenas a flutuações do tempo de viagem em condições cotidianas, mas também a eventos significativos como acidentes ou obras viárias e que tem impacto no tempo de viagem. Dessa forma, aliam-se a Bell (2000), incluindo eventos não recorrentes na definição de confiabilidade. Chen e Zhou (2010) atribuem as flutuações recorrentes no tempo de viagem à natureza estocástica da demanda, que podem impactar a velocidade do fluxo de tráfego. Ainda segundo Chen e Zhou (2010), variações significativas no lado da oferta, por outro lado, seriam normalmente não recorrentes e derivadas de eventos menos frequentes. Taylor *et al.* (2006) argumentam mesmo que as variações no tempo derivadas de bloqueios totais ou parciais da rede viária devem ter tratamento diferenciado pelo seu forte impacto no tempo e custo da viagem, e não confundidas com a natureza estocástica do tempo de viagem. De fato, é compreensível que o tempo de viagem sofra uma forte variação em presença de eventos maiores (e menos frequentes) mas deseja-se que em condições cotidianas o tempo de viagem seja previsível, com pequena variação.

Admitindo-se que a confiabilidade seja o atributo de desempenho relacionado às flutuações estocásticas da demanda e da oferta (mais comumente da demanda) em condições cotidianas, percebe-se que a incerteza, ou não confiabilidade, ocorre principalmente quando há um desequilíbrio entre a demanda e oferta, ou seja, a capacidade de escoamento de tráfego está comprometida, como em situações de congestionamento ou de limiar de congestionamento. É interessante observar que alguns autores, ao estudar a confiabilidade a partir da dinâmica do congestionamento, como Van Lint e Van Zuylen (2005) e Eliasson (2007, 2009), encontraram diferentes distribuições dos tempos de viagem para as condições de fluxo livre, formação do congestionamento, congestionamento e dissolução do congestionamento.

Percebe-se, portanto, a necessidade de uma conceituação mais precisa de confiabilidade. A presente Tese propõe a seguinte definição, resultante de análise crítica dos estudos existentes na literatura, e já apresentada em Oliveira *et al.* (2016):

- ***Confiabilidade é o atributo de desempenho que representa a incerteza relacionada à flutuação estocástica na demanda e oferta sob condições cotidianas normais.***

2.3.2 Causas da não confiabilidade

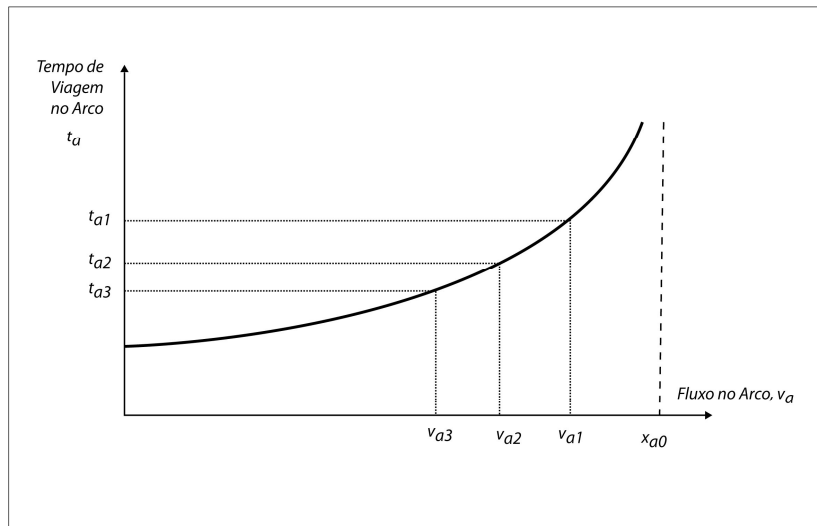
Segundo Chen e Zhou (2010), a incerteza nos tempos de viagem em uma rede pode ser originada tanto no lado da oferta quanto no da demanda. De fato, no lado da oferta, pode haver uma flutuação em função de condições variáveis da via, tais como presença de estacionamentos e outros. Do lado da demanda, é sabido que a demanda não se replica fielmente no dia-a-dia e mesmo de momento a momento. Embora haja padrões normalmente estabelecidos de sazonalidade e períodos de pico, ainda assim essa demanda admite variações.

As mais significativas variações na oferta devem-se a obras viárias, acidentes ou outros eventos aleatórios que levam a interdições totais ou parciais de faixas de rolamento. Essas variações não devem ser consideradas na avaliação da confiabilidade, tendo em vista sua natureza não recorrente. Já as variações na demanda tendem a ocorrer no dia-a-dia, e, estando a via no limiar da capacidade, esse efeito pode ser significativo. Naturalmente, podem ocorrer simultaneamente variações na oferta e na demanda, como no caso de mau tempo, onde a redução na capacidade viária pode ser acompanhada de uma mudança de comportamento dos usuários, que podem modificar seus horários de deslocamento, escolher diferentes rotas ou mesmo modos de transporte.

Nicholson (2003) analisou a variação do tempo de viagem em função do fluxo, volume de tráfego e a capacidade viária. Na Figura 2.5 um link, ou arco, tem capacidade x_{a0} , tempo de viagem t_{ai} e fluxo v_{ai} . Com a capacidade constante, o tempo de viagem é crescente com o fluxo. Já a Figura 2.6 apresenta três curvas de tempo de viagem, uma para cada capacidade x_{ai} . Percebe-se, assim, que para um mesmo fluxo v_{a^*} , o tempo de viagem cresce à medida em que a capacidade viária é reduzida.

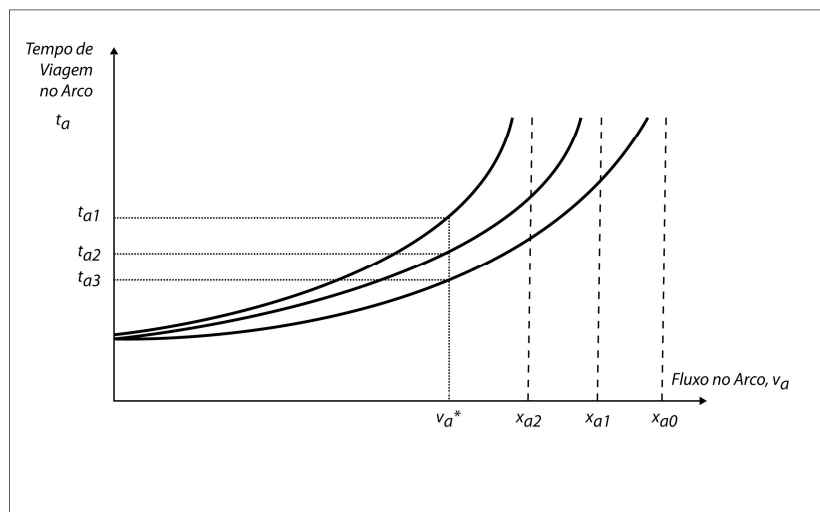
Segundo Nicholson (2003), a Figura 2.7 apresentaria graficamente a evolução da variância do tempo em comparação com o tempo médio em função da relação volume de tráfego sobre a capacidade (V/C). Se tomarmos a variância do tempo de viagem como medida de confiabilidade, percebe-se que a variância é uma função da saturação do tráfego. De fato, o gráfico mostra que o tempo médio de viagem cresce de forma acentuada quando V/C excede 0,8, e que a variância, por sua vez, cresce mais intensamente a partir de 0,6. Nicholson (2003) afirma que essa seria a causa de, usualmente, se estimar a capacidade prática de um sistema como 80% de sua capacidade teórica. Se, no dimensionamento da capacidade viária fosse adotada uma medida de 60%, possivelmente haveria também uma garantia de maior confiabilidade.

No entanto, a maior velocidade poderia atrair uma demanda maior e, possivelmente o investimento extra teria sido inócuo (Fernald, 1999; Nicholson, 2003; Stopher, 2004). Eliasson (2006, 2007, 2009) realizou experiências correlacionando a variabilidade do tempo de viagem com o grau de saturação, chegando também a uma correlação positiva, porém não replicando a mesma curva obtida por Nicholson (2003).



Fonte: Nicholson (2003)

Figura 2.5 – Variação do tempo de viagem em função do fluxo (volume) de tráfego em um arco.

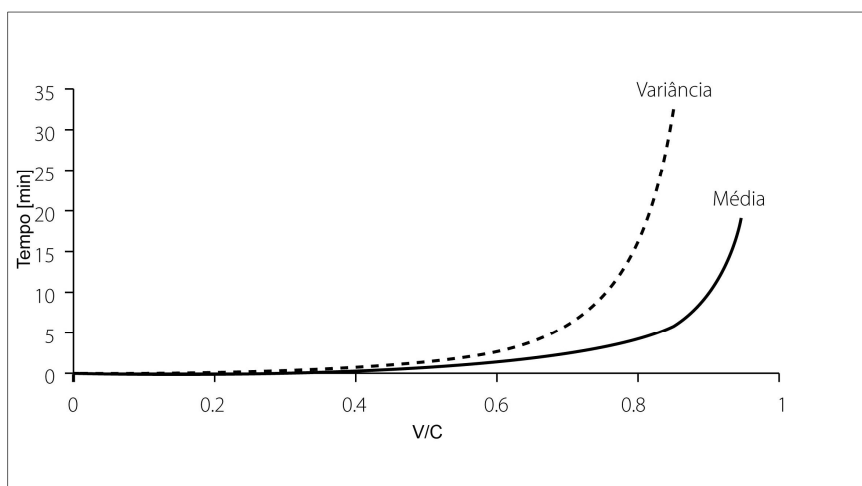


Fonte: Nicholson (2003)

Figura 2.6 – Variação do tempo de viagem em função do fluxo de tráfego (volume) e da variação da capacidade em um arco.

Atualmente, a diretriz da política de mobilidade no Brasil é a de se desestimular o uso de transporte motorizado individual (Ministério das Cidades, 2015), o que faz com que políticas de aumento da capacidade viária como solução generalizada para problemas de congestionamento não devam mais ser consideradas, tendo em vista os maus resultados obtidos ao longo do tempo de sua aplicação. Hoje vem sendo considerado

como mais indicado o investimento na melhoria do sistema transporte coletivo, e o estímulo ao uso de transportes não motorizados, com a melhoria de calçadas e a implantação de ciclovias. Têm-se observado ainda experiências internacionais onde é aplicado o chamado pedágio urbano como forma de dissuasão de uso do automóvel em determinadas regiões, normalmente circunscrevendo o centro de cidades de maior porte. Com essas medidas pretende-se melhorar o nível de serviço e a mobilidade como um todo, evitando-se a simples ampliação da rede viária.



Fonte: Nicholson (2003)

Figura 2.7 – Média e variância do tempo de viagem em função do grau de saturação do tráfego (V/C).

2.3.3 Efeitos da não confiabilidade

Como já discutido anteriormente, diversos autores, tais como Van Lint *et al.* (2008) e Li *et al.*, (2010), percebem a tendência de os usuários do sistema de transporte optarem por rotas com tempo de viagem mais previsíveis (ou seja, mais confiáveis) ainda que estejam disponíveis alternativas com tempo médio de viagem menores. Isso evidencia uma percepção pelo usuário de um valor para a confiabilidade (VOR), independentemente do valor percebido para o tempo de viagem (VOT). Dessa forma, segundo Nicholson (2003), a não confiabilidade pode interferir no comportamento do usuário:

- Na geração de viagens, uma vez que viagens podem ser canceladas;
- Na distribuição temporal de viagens, uma vez que viagens podem ser adiadas ou antecipadas para um horário mais propício;
- Na distribuição espacial de viagens, uma vez que viagens podem ter seu destino alterado;
- Na repartição modal, uma vez que o modo de transporte pode ser alterado;

- Na alocação de viagens à rede, uma vez que rotas podem ser alteradas.

Carrion e Levinson (2012) acrescentam que muito tem sido discutido sobre o valor do tempo de viagem, mas que a preocupação com o valor da confiabilidade do tempo de viagem é relativamente recente. Enquanto que o VOT busca colocar em termos monetários o valor percebido para o tempo de viagem, o VOR busca colocar em termos monetários o valor percebido pelos usuários na aprimoração da previsibilidade de seu tempo de viagem. A abordagem mais comum para se estimar o VOR seria a baseada em métodos de dispersão-centralidade, ainda segundo Carrion e Levinson (2012). O princípio básico é que o usuário buscaria minimizar a desutilidade referente não apenas ao tempo de viagem, mas também a desutilidade referente à variabilidade do tempo de viagem, como se segue:

$$U = \gamma_1 \mu_t + \gamma_2 \sigma_t \quad (2.1)$$

Onde:

U = desutilidade;

μ_t = tempo esperado de viagem (centralidade);

σ_t = variabilidade do tempo de viagem (medida de dispersão);

γ_1 e γ_2 = coeficientes.

As metodologias predominantes para a determinação dos coeficientes e, conseqüentemente, do valor a ser atribuído à confiabilidade são aquelas apoiadas em pesquisas de preferência declarada (Li *et al.*, 2010).

Os métodos de dispersão-centralidade têm contra si o fato de que as medidas de dispersão utilizadas são tipicamente simétricas como, por exemplo, o desvio padrão. No entanto, espera-se que o valor da variabilidade do tempo seja assimétrico, uma vez que a desutilidade de uma chegada com atraso é provavelmente diferente daquela referente à chegada antecipada. Dessa forma são utilizados também métodos baseados na programação de horários para a viagem (como em Fosgerau e Engelson, 2011) podendo ser associadas restrições de tempo, como, por exemplo, o horário de entrada no trabalho, os custos envolvidos com a chegada atrasada ou antecipada (Carrion e Levinson, 2012). A utilidade do tempo de viagem seria, nesse caso, estimada da seguinte forma (Carrion e Levinson, 2012, sobre trabalho de Small, 1982, citado também em Li *et al.*, 2010, e Fosgerau e Engelson, 2011):

$$U(t_d, PAT) = \gamma_1 t + \gamma_2 SDE + \gamma_3 SDL + \gamma_4 DL \quad (2.2)$$

Onde:

$U(t_d, PAT)$ = utilidade indireta em função dos horários pretendidos para partida e chegada

t_d = horário de partida;

PAT = horário preferido para a chegada;

t = tempo de viagem;

SDE = chegada antecipada;

SDL = chegada atrasada;

DL = termo binário indicado se a chegada é atrasada ($SDL > 0$);

$SDE = \text{Max}(0; PAT - (t + t_d))$;

$SDL = \text{Max}(0; (t + t_d) - PAT)$;

$\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \gamma_4$ = coeficientes.

O princípio envolvido é que o usuário buscaria minimizar a desutilidade representada em (2.2). É uma abordagem de modelagem mais complexa do que a baseada em centralidade-dispersão, e, talvez por isso, menos utilizada.

Na bibliografia analisada, Devarasetty *et al.* (2012) chegaram, em um estudo de caso, a valores estimados para o VOR de 82% do valor médio da hora trabalhada. O estudo de Devarasetty *et al.* (2012) conclui ainda que, frequentemente, os valores obtidos em pesquisa de preferência declarada para a verificação da disposição de pagar pela redução do tempo de viagem incluem implicitamente o desejo de redução da incerteza de tempo, pela redução do congestionamento. Isso faz com que, nesses casos, o valor da economia do tempo (VTTS) apurado seja na realidade referente à soma VOR+VTTS. No caso especificamente estudado por Devarasetty *et al.* (2012), discriminando-se VOR e VTTS, chegou-se a um valor para o VTTS de 63% da hora trabalhada, quando o esperado a partir de informações existentes seria de 150%. No entanto, observa-se que a soma dos valores apurados para VOR e VTTS daria 82% + 63% = 145%, valor muito próximo ao esperado, o que sugere que conclusão do estudo procede. Os resultados obtidos confirmam ainda Fosgerau e Engelson (2011), que sugerem que o VOR e o

VTTS devem ter magnitudes semelhantes em presença de congestionamento. A razão VOR/VTTS tem valores semelhantes e em torno de 1,3 tanto nos estudos realizados por Devarasetty *et al.* (2012) quanto nos realizados por Li *et al.* (2010), o que confirma a relevância do valor da confiabilidade, como já afirmado por Small *et al.* (2005).

Em síntese, a não confiabilidade tem um custo intrínseco percebido pelo usuário que pode ser avaliado e incluído em estudos de viabilidade. Além disso, traz como efeito colateral a possível opção de usuários por caminhos não ótimos quanto ao tempo de viagem, o que pode resultar em aumento do custo generalizado de viagem.

2.4 Vulnerabilidade

2.4.1 Conceituação de vulnerabilidade

A vulnerabilidade de uma rede viária tem sido objeto de inúmeras pesquisas, principalmente na última década, como nos trabalhos de Jenelius *et al.* (2006), Jenelius e Mattsson (2012), Mattsson e Jenelius (2015), Scott *et al.* (2006) e Sullivan *et al.* (2010).

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 (Chen e Miller-Hooks, 2012; Jenelius *et al.*, 2006; Jenelius e Mattsson; 2012). 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 ainda 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 (2012) 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 nó³ de uma rede seria considerado vulnerável se a perda ou degradação substancial de um pequeno número de links reduzisse de forma significativa a acessibilidade desse nó. Por sua vez, um link de uma rede seria considerado crítico se a sua interdição ou degradação substancial reduzisse de forma significativa a acessibilidade da 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. Jenelius (2010) também associa o risco à vulnerabilidade, e explicitamente distingue vulnerabilidade da confiabilidade.

Alguns autores preferem o termo robustez para o atributo da rede correspondente ao inverso da vulnerabilidade, como Scott *et al.* (2006) e Sullivan *et al.* (2010). No entanto, a robustez é recíproca à vulnerabilidade, e, assim, um indicador de robustez o é também de 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. Chen e Miller-Hooks (2012) seguem o mesmo princípio, embora prefiram o termo resiliência a robustez.

³ Vértices do grafo representativo de uma rede viária.

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. Clark e Watling (2005), em sua classificação da confiabilidade propõem, entre outras, duas dimensões para a confiabilidade, a *confiabilidade da conectividade* e a *confiabilidade potencial*, que seriam ligadas à capacidade da rede em desempenhar de forma satisfatória quando um ou mais de seus links falham, conceituação normalmente associada à vulnerabilidade da rede. Li (2008), no entanto, 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. Chen e Miller-Hooks (2012) também ressaltam essa indefinição de conceitos na literatura, acrescentando a flexibilidade como um dos atributos frequentemente associados à análise de vulnerabilidade.

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.

À semelhança do que foi observado com referência ao atributo Confiabilidade, percebe-se a necessidade de uma conceituação mais precisa de Vulnerabilidade. A presente Tese propõe a seguinte definição, resultante de análise crítica dos estudos existentes na literatura, e já apresentada em Oliveira *et al.* (2013)

- ***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.***

2.4.2 Efeitos da 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 2.8.

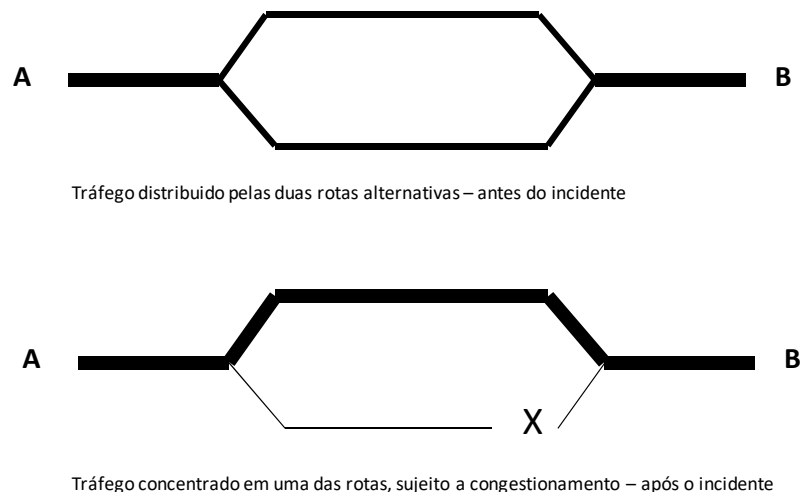


Figura 2.8 – Mudança de rota de A para B em função da obstrução em X.

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. Em casos extremos, com a interrupção total

de um ou mais links, poderá haver a desconexão de parte da rede viária. Em consequência, tais interrupções podem ameaçar serviços cotidianos ou essenciais como a frequência ao trabalho, a frequência à escola, o atendimento médico e a cadeia de suprimentos, entre outros.

É fácil perceber que, em determinados casos, as consequências podem ser dramáticas, como no caso de desastres naturais com vítimas. Nesses casos, a vulnerabilidade pode levar ao isolamento da parte afetada dificultando o acesso de serviços públicos potencialmente vitais como o atendimento médico de urgência, o acesso a bombeiros, entre outros. Ainda que não haja um isolamento total, a interrupção de links pode gerar o atraso na cadeia de suprimento, a perda de clientes e de mão-de-obra e ainda gerar um aumento nos custos de transporte (Jenelius e Mattson, 2012). Bono e Gutierrez (2011) propõem, inclusive, um método para avaliar uma região afetada por um desastre, redefinindo sua acessibilidade, levando em consideração o impacto decorrente da alteração na configuração da rede viária pós-impacto.

Alguns tipos de estrutura, partes integrantes de redes viárias, são particularmente relevantes para a avaliação da vulnerabilidade da rede viária, como pontes, viadutos e túneis. Estas são estruturas que, tipicamente, fazem parte de rotas em regiões acidentadas e com um menor número de alternativas, cujas alternativas apresentam um custo de transporte ou tempo de viagem frequentemente muito mais elevado. Bocchini e Frangopol (2011) e Liu e Frangopol (2006), por exemplo, se detiveram na análise da importância da resistência de pontes e seu impacto no desempenho da rede viária em presença de eventos extremos como, por exemplo, terremotos, implicitamente admitindo a importância da análise de links críticos para a vulnerabilidade da rede e da necessidade de medidas para sua mitigação.

A avaliação da vulnerabilidade de redes viárias é tipicamente realizada através de modelos de simulação, com cenários de interrupção de um ou mais links. Podem ser utilizados modelos de modelagem dinâmica, mais detalhados e consumidores de recursos, que permitem a simulação do efeito à montante do link interrompido. Por outro lado, a modelagem com alocação estática⁴, se realizada com métodos de alocação que simulem a dinâmica do tráfego, tais como a alocação por equilíbrio ou a alocação incremental, permite a avaliação da vulnerabilidade de forma um pouco mais simplificada, mas ainda adequada, com uma redução considerável de recursos

⁴ Na alocação estática a demanda é fixa e o tempo é percebido de forma idêntica pelos usuários. Não há uma dimensão de tempo, e a alocação é assumida como simultânea em todas as rotas entre pares de origem e destino (Kumar e Peeta, 2014).

computacionais. Dessa forma, a magnitude da rede a analisar e a disponibilidade de recursos financeiros e de tempo podem ser condicionadores da metodologia a utilizar.

2.5 Síntese

A revisão bibliográfica realizada mostra que o desempenho da rede viária tem sido objeto de pesquisas, particularmente na última década. A análise mostra ainda que não há um consenso sobre quais seriam os principais atributos de desempenho, com a maioria dos autores se dedicando a focar em suas publicações um único atributo, frequentemente discutindo possíveis indicadores e métricas. Adicionalmente, a falta de consenso sobre os principais atributos leva a que diferentes autores proponham definições por vezes conflitantes para o mesmo atributo. Percebe-se, portanto, que há lacunas a serem preenchidas nesse tema.

A presente Tese, como já discutido anteriormente, enfoca a análise de três dentre os principais atributos de desempenho identificados, quais sejam o Congestionamento, a Confiabilidade e a Vulnerabilidade. Dentre esses atributos, o Congestionamento é o mais consolidado na literatura, por se tratar, em termos práticos, do indicador mais visível do mau desempenho da rede viária.

O presente capítulo faz uma revisão do estado da arte a respeito dos três atributos objeto do estudo e propõe uma conceituação objetiva. Dessa forma é sanada a indefinição observada na literatura, principalmente no que toca aos conceitos de confiabilidade e vulnerabilidade, constantemente confundidos. Essa conceituação é fundamental para uma melhor compreensão de cada um dos atributos. Dessa forma torna-se possível a seleção de indicadores de avaliação de desempenho, em particular aqueles apresentados no Capítulo 3.

O estudo realizado reforça ainda a convicção de que os três atributos analisados, embora conceitualmente distintos, guardam uma relação de complementaridade. Uma rede vulnerável é potencialmente mais sujeita a congestionamentos o que, por sua vez a torna menos confiável, na medida em que os tempos de viagem tem maior variabilidade.

A presente Tese busca ainda demonstrar evidências de que, de fato, os atributos analisados são distintos e que seus indicadores levam a diferentes hierarquias de links quanto à sua importância para o desempenho da rede viária. A estrutura metodológica apresentada no Capítulo 4 foi elaborada de forma a cumprir essa finalidade.

3. INDICADORES DE DESEMPENHO

3.1 Considerações iniciais

Um indicador é uma variável que representa um atributo ou qualidade de um sistema (Joumard e Gudmundsson, 2010). A OECD/ECMT (2007) considera indicador como uma variável selecionada e definida para medir o progresso em direção a um objetivo. Índice, por sua vez, é um valor representativo de um indicador ou grupo de indicadores agregados. A função dos indicadores, portanto, é medir, de forma objetiva, atributos que se deseja monitorar ou comparar, o que pode ser feito de forma qualitativa ou através de índices.

Em uma rede urbana, particularmente nas grandes cidades, é típica a existência de múltiplas rotas para a satisfação de um movimento entre origem e destino. É típica ainda a convivência dos usuários com cenários de congestionamento durante determinados períodos do dia em uma parcela da rede viária. Com isso, as ligações mais congestionadas são normalmente as mais visadas quando se deseja melhorar o desempenho da rede. Portanto, os indicadores de desempenho regra geral são associados ao grau de comprometimento da capacidade de cada ligação isoladamente ou no contexto da rede a que pertencem. No entanto, o congestionamento, como já discutido anteriormente, não é o único atributo que deve ser analisado para que se possa avaliar o desempenho de uma rede viária.

Tendo em vista a importância da utilização de indicadores para o planejamento, o TRB (2000) elaborou uma lista para auxiliar a seleção de medidas de desempenho, definindo as características que devem ser consideradas, tais como:

- Mensurabilidade 1 – deve ser possível medir os índices com recursos disponíveis e dentro de custos adequados. Devem ainda ser verificados os dados necessários, se são acurados e se as fontes são confiáveis;
- Mensurabilidade 2 – deve ser verificado se os dados serão coletados através de pesquisas específicas, se através de monitoramento e se serão tratáveis por modelos de previsão;
- Utilidade – deve ser possível utilizar os índices produzidos para a análise de projetos alternativos ou para outras finalidades específicas;

- Clareza – os indicadores devem indicar com clareza que aspecto do desempenho estão medindo, não apenas para os profissionais da área, mas também para o público em geral;
- Aspectos temporais – há indicadores que permitem sua comparação ao longo do tempo, que podem ser específicos para determinados períodos (pico, fora do pico) entre outros aspectos temporais. Deve haver clareza quanto à aplicação dos indicadores nestes aspectos;
- Escala geográfica – aplicação dos indicadores a diferentes escalas geográficas. Deve haver clareza quanto à aplicabilidade dos indicadores às diferentes escalas: local, regional, etc.;
- Controle – aplicabilidade dos indicadores como ferramenta para auxiliar medidas corretivas específicas;
- Relevância – aplicabilidade dos indicadores para o processo de planejamento e orçamentação; e
- Diagnóstico – aplicabilidade dos indicadores para realizar um diagnóstico do desempenho, para análises do tipo causa e efeito, e seu nível de detalhamento/agregação.

Naturalmente, nem todos os indicadores possuem todas as características elencadas acima.

No presente capítulo são apresentados os principais indicadores de desempenho encontrados na bibliografia analisada para os atributos de desempenho Congestionamento, Confiabilidade e Vulnerabilidade, objetos da presente Tese.

3.2 Indicadores de congestionamento

Foram identificados inúmeros indicadores na literatura ligados a congestionamento. Em sua maioria, são indicadores desenvolvidos com o objetivo de monitorar links específicos ou toda a rede viária, principalmente no que diz respeito a congestionamentos recorrentes, derivados de viagens pendulares, normalmente nos horários de pico.

O *Highway Capacity Manual* - HCM (TRB, 2010) é a referência mais tradicional no que tange a estudos de tráfego no Brasil e em diversos países, e apresenta várias medidas de desempenho para rodovias, dentre elas a velocidade de percurso, a densidade do fluxo e o atraso. A densidade é definida como o número de veículos ocupando uma extensão de via ou faixa de tráfego em determinado instante e o atraso é aquele que se

refere ao tempo perdido, principalmente em função do controle de tráfego em interseções. O HCM apresenta ainda o conceito de capacidade de uma via como sendo a taxa horária máxima na qual se espera, de forma razoável, que pessoas ou veículos possam atravessar um ponto ou uma seção uniforme de uma faixa ou pista de tráfego durante um determinado tempo em condições normais de via, tráfego e controle. O indicador do HCM que sintetiza o desempenho de uma via é o Nível de Serviço (NS) que classifica a via ou conjunto de vias rodoviárias em seis níveis, de A a F.

Buscou-se aqui, no entanto, ser o mais completo possível, sendo pesquisados tanto relatórios de agências governamentais quanto trabalhos acadêmicos publicados sob a forma de artigos em periódicos especializados, teses de doutorado ou dissertações de mestrado.

Há indicadores que medem diretamente a intensidade do congestionamento, como o V/C (relação volume/capacidade) e o NS – Nível de Serviço (TRB, 2010). Por outro lado, há inúmeros indicadores apoiados em consequências do congestionamento. Em ambos os casos eles permitem o acompanhamento do seu nível seja para links isolados seja para redes viárias.

Dentre os indicadores levantados foram selecionados aqueles ligados à intensidade de congestionamento e às consequências diretas da redução de velocidade e organizados nos seguintes grupos:

- Equilíbrio Demanda/Oferta – indicadores que avaliam o equilíbrio entre oferta e demanda através da densidade de veículos e o comprometimento da capacidade de escoamento do fluxo pela infraestrutura viária;
- Velocidade – indicadores que medem o congestionamento a partir da velocidade média do fluxo ou de sua variação;
- Tempo – indicadores que medem o congestionamento pelo tempo de viagem médio ou de sua taxa de variação;
- Atraso – indicadores que medem o congestionamento pelo aumento no tempo médio de viagem. Esse grupo de indicadores poderia fazer parte do grupo “Tempo”, mas optou-se por considerá-lo como um grupo à parte, tendo em vista o seu destaque na literatura, como, por exemplo, no HCM (TRB, 2010); e
- Outros – nesse grupo foram incluídos os indicadores que não puderam ser enquadrados nos grupos anteriores, mas que podem ser considerados como ligados à intensidade de congestionamento ou às consequências diretas da redução da velocidade.

3.2.1 Relação de indicadores de congestionamento

A seguir são apresentados os indicadores de congestionamento encontrados na bibliografia organizados nos grupos apresentados no tópico anterior. Exceto quando explicitamente citados, os indicadores podem ser aplicados a links individuais, a regiões da rede ou à rede como um todo.

Equilíbrio Demanda/Oferta

- Densidade Média (K) (Liu e Frangopol, 2006; Elefteriadou *et al.*, 2012) – mede a densidade média ou concentração do fluxo de veículos em veículos/km, em um determinado período de observação;
- Fluxo médio (Liu *et al.*, 2011; Elefteriadou *et al.*, 2012) – mede o fluxo de veículos em veículos/h, por faixa de rolamento;
- Nível de serviço (NS) – mede o nível de serviço tal como preconizado pelo HCM (TRB, 2010);
- V/C – mede a relação volume de tráfego sobre a capacidade, tal como preconizado pelo HCM (TRB, 2010) (aplicável a links individuais);
- Índice de Adequação da Capacidade (CA), e, de forma agregada, ACCESS, são indicadores recíprocos ao V/C, ou seja, são determinados mediante a relação capacidade sobre o volume de tráfego (Boarnet *et al.*, 1998) (aplicável a links individuais).
- Capacidade de Reserva – mede a capacidade de a rede viária acomodar um aumento na demanda (Chen *et al.*, 2002).

Velocidade

- Velocidade média – mede a velocidade média no link ou na rede (Quiroga, 2000; Grant *et al.*, 2011; Elefteriadou *et al.*, 2012);
- Taxa de Viagens (Quiroga, 2000; Aftabuzzaman *et al.*, 2011) – representa o tempo médio de viagem por unidade de deslocamento; é, portanto, um indicador recíproco à velocidade média;
- Redução Relativa de Velocidade (Smit, 2006; Transport Scotland, 2006; Smit *et al.*, 2008; Morán e Bang, 2010) – determinado a partir da diferença entre a velocidade observada e a velocidade em fluxo livre, dividida pela velocidade em fluxo livre; e

- Bandas de Redução de Velocidade (Smit, 2006; Transport Scotland, 2006; Smit, Brown e Chan, 2008; Morán e Bang, 2010) – é a organização em faixas ou bandas, dos valores do indicador Redução Relativa de Velocidade.

Tempo

- Tempo de Viagem Médio – representa o tempo de viagem médio de um usuário (Quiroga, 2000; OECD/ECMT, 2007; Litman e Doherty, 2009; Schrank *et al.*, 2011; Elefteriadou *et al.*, 2012; Litman, 2012a);
- Índice de Congestionamento (CI) (Smit, 2006; Zhang e Lomax, 2007), Índice de Tempo de Viagem (TTI) (Grant *et al.*, 2011; Schrank *et al.*, 2011), Taxa de Tempo de Viagem (TTR) (OECD/ECMT, 2007; Litman e Doherty, 2009; Litman, 2012a), Índice de Stress do Usuário Pendular (Schrank *et al.*, 2011) e Encargo do Congestionamento (STPP, 2001) – índices que medem a relação entre tempo observado (geralmente no pico) e tempo em condições de fluxo livre, com pequenas diferenças conceituais; o TTI é talvez o mais difundido, através dos relatórios periódicos do *Texas Transportation Institute*, frequentemente citados na literatura;
- Proporção de Tempo Parado (Taylor *et al.*, 2000) – mede a proporção entre o tempo parado (ou em velocidades muito baixas) e o tempo total de viagem; e
- Percentual do Tempo de Viagem em Congestionamento (Litman e Doherty, 2009; Litman, 2012a) – mede a proporção do tempo de viagem médio de um usuário (ou veículo) que ocorre em condições de congestionamento em determinado período, normalmente o pico.

Atraso

- Atraso Médio (Lindley, 1987; Quiroga, 2000; Taylor *et al.*, 2000; OECD/ECMT, 2007), Atraso por Usuário Fora do Pico (Schrank *et al.*, 2011), Atraso Total (Quiroga, 2000; Smit, 2006; Elefteriadou *et al.*, 2012), Atraso Anual (Litman e Doherty, 2009) – indicadores que mostram a existência de congestionamento e sua intensidade, a partir da diferença entre os tempos de viagem nas condições observadas e as condições de fluxo livre, aplicados a diferentes períodos de tempo;
- Taxa de Atraso (Quiroga, 2000; Smit, 2006; TRB, 2006; OECD/ECMT, 2007; Transport Scotland, 2006) – atraso normalizado pela extensão percorrida, apresentado normalmente em min/km; e

- Taxa de Atraso Relativa (Quiroga, 2000; Taylor *et al.*, 2000) – atraso normalizado por um tempo de viagem de referência, normalmente o tempo em condições de fluxo livre, configurando, portanto, um índice adimensional.

Outros

Os grupos anteriores listam indicadores que permitem determinar se há congestionamento e sua intensidade, em cada link da rede em dado período do tempo. Podem ser estendidos no espaço (para um dado itinerário, sub-rede ou toda a rede) ou no tempo. O grupo *Outros* se difere por tratar geralmente de forma agregada uma rede ou sub-rede viária, quantificando a magnitude do congestionamento em termos espaciais (como em Extensão Congestionada, Percentual da Sub-rede Local Congestionada entre outros) ou temporais (como em Horas Congestionadas, Atraso Anual per Capita, entre outros).

- Atraso Anual per Capita (OECD/ECMT, 2007; Litman e Doherty, 2009) – normaliza o atraso atual em uma rede através de sua divisão pela população da região, permitindo o monitoramento de redes e sub-redes, além de análises comparativas;
- Atraso Anual por Viagem de Auto (OECD/ECMT, 2007; Schrank *et al.*, 2011) – normaliza o atraso anual em uma rede ou link através de sua divisão pelo número de viagens pendulares de automóvel realizadas por ano;
- Horas Congestionadas (OECD/ECMT, 2007; Litman e Doherty, 2009; Grant *et al.*, 2011; FHWA, 2012; Litman, 2012a) – avalia a dimensão temporal do congestionamento em um link ou rede, medindo o tempo em condições de congestionamento. Esse tempo é geralmente medido como uma média de horas congestionadas diárias;
- Extensão Congestionada (OECD/ECMT, 2007; Litman e Doherty, 2009; Grant *et al.*, 2011; Litman, 2012a) – avalia a dimensão espacial do congestionamento, normalmente em uma rede, medindo a extensão total de vias em condições de congestionamento;
- Percentual de Usuários Congestionados (TRB, 2006) – mede a proporção de usuários que enfrentam congestionamento em determinado período, normalmente no pico (aplicável a redes ou regiões);
- Percentual da sub-rede local congestionada (Portugal e Araújo, 2008) – mede a proporção de vias do sistema local que enfrentam congestionamento em determinado período, normalmente no pico; e

- *Throughput* (Morán, 2010; Tsubota *et al.*, 2013) – é definido como o produto do número de viagens atendidas em uma rede viária pela velocidade com que isso ocorre, o que permite inferir o balanceamento entre a quantidade e qualidade do serviço oferecido. Este indicador é agregado para toda a rede.

3.2.2 Aplicação dos indicadores de congestionamento

Segundo a OECD/ECMT (2007), não há, necessariamente, um melhor indicador de congestionamento de forma absoluta, mas pode haver um indicador mais adequado para uma determinada finalidade. Recomenda ainda que se resista à ideia de se adotar um indicador simplesmente por que ele está disponível, mas sim escolher aquele mais apropriado para medir o progresso obtido em direção a determinado objetivo.

Podem ser identificadas duas vertentes principais na análise de congestionamento, uma ligada ao diagnóstico e monitoramento e outra ligada à comparação e hierarquização de links e redes. A vertente de diagnóstico e monitoração exige indicadores relacionados à intensidade de congestionamento, à sua abrangência (magnitude espacial) e à sua duração (magnitude temporal). A vertente de comparação e hierarquização, por outro lado, exige indicadores que permitam a comparação entre redes ou sub-redes viárias e entre os links que as compõem, seja de forma isolada ou contextualizada. O resultado da análise com base em indicadores de congestionamento deverá servir como subsídio para o estabelecimento de medidas para a mitigação dos problemas de desempenho identificados e estabelecer prioridades para atuação nesse sentido. O Quadro 3.1 correlaciona os indicadores identificados e vertentes de aplicação.

Diagnóstico – Identificação e intensidade

Frequentemente há dificuldade em se precisar a partir de que ponto uma via se encontra congestionada (OECD/ECMT, 2007). A Austroads, associação de órgãos públicos rodoviários e de tráfego da Austrália e Nova Zelândia, também considera fundamental precisar um critério que permita afirmar se um trecho se encontra congestionado, e em que grau, para a gerência do congestionamento viário (Austroads, 2009). Pesquisa realizada com 480 profissionais de transporte nos EUA apontou diferentes variáveis como as mais importantes para caracterizar a existência de congestionamento e sua intensidade. Para a mensuração do congestionamento, 29% dos entrevistados se referiu ao atraso, 20% ao nível de serviço, 14% à relação V/C, 14% ao tempo de viagem, 13% à velocidade e 10% a outros parâmetros (Bertini, 2005). A mesma pesquisa revelou que apenas 51% dos especialistas entrevistados consideram as medidas de

gestionamento como acuradas (18%) ou de alguma forma acuradas (33%). Verifica-se assim, que não há consenso quanto ao melhor indicador para avaliar o congestionamento. Grant *et al.* (2011) apontam a intensidade como uma das quatro principais dimensões (as outras seriam: duração, extensão e variabilidade) a ser considerada na gerência de redes sujeitas a congestionamento.

Todos os indicadores de congestionamento levantados permitem, ao menos, detectar indícios de congestionamento. Aqueles que permitem verificar com mais segurança a existência ou não de congestionamento e sua intensidade, estão marcados na coluna correspondente do Quadro 3.1.

Quadro 3.1 – Classificação quanto à aplicação de indicadores de congestionamento.

	Identificação e Intensidade	Magnitude Espacial	Magnitude Temporal	Monitoramento	Hierarquização de Links	Comparação entre redes
Equilíbrio Demanda/Oferta						
Densidade Média (K)	X			X	X	X
Fluxo médio/faixa	X			X	X	X
Nível de Serviço (NS)	X			X	X	
Volume / Capacidade (V/C)	X			X	X	
Índice de Adequação da Capacidade (CA)	X			X	X	
CA Agregado (ACCESS)				X		X
Capacidade de Reserva				X		X
Velocidade						
Velocidade Média				X	X	X
Taxa de Viagens				X	X	X
Redução Relativa de Velocidade	X			X	X	X
Bandas de Redução de Velocidade	X			X	X	X
Tempo						
Tempo de Viagem Médio				X		
Índice de Congestionamento (CI)	X			X	X	X
Índice de Tempo de Viagem (TTI)	X			X	X	X
Taxa de Tempo de Viagem (TTR)	X			X	X	X
Índice de Stress do Usuário Pendular	X			X	X	X
Encargo do Congestionamento	X			X	X	X
Proporção de Tempo Parado				X		X
% do tempo de viagem em congestionamento				X		X
Atraso						
Atraso Médio (Delay)	X			X		
Atraso por Usuário Fora de Pico	X			X		
Atraso Total	X			X		
Atraso Anual	X			X		
Taxa de Atraso	X			X	X	X
Taxa de Atraso Relativa	X			X	X	X
Outros						
Atraso Anual per Capita				X		X
Atraso Anual por Viagem de Auto				X		X
Horas Congestionadas			X	X	X	X
Extensão Congestionada		X		X		X
% Usuários Congestionados				X		X
% da subrede local congestionada		X		X		X
Throughput				X		X

Sendo o congestionamento decorrente de um desbalanceamento entre a capacidade viária ofertada e a demanda de tráfego, pode ser identificada a existência de congestionamento por diferentes ângulos.

De forma mais direta, os indicadores do grupo Equilíbrio Oferta/Demanda determinam uma situação de congestionamento comparando demanda com oferta, ou através da densidade do fluxo. Assim, a partir de um determinado nível de referência, uma via pode ser considerada congestionada ou não. Os indicadores mais utilizados desse grupo são o Nível de Serviço (NS) e a relação V/C, ambos propostos pelo HCM (TRB, 2010), que vincula as condições críticas ao NS F ou V/C maior do que 1. Alguns autores (Lindley, 1987; IPEA e ANTP, 1998; Litman e Doherty, 2009) consideram uma via congestionada mesmo com $V/C < 1$. O índice de adequação da Capacidade - CA (Boarnett *et al.*, 1998) é um índice recíproco ao V/C, também derivado da metodologia do HCM, que pode ser agregado para uma rede no índice ACCESS (Boarnett *et al.*, 1998). Outra abordagem é através da avaliação da densidade do fluxo, ou seja, a determinação da quantidade de veículos por extensão de via, como no caso dos indicadores Densidade Média (K) (Elefteriadou *et al.*, 2012). O indicador proposto por Chen *et al.* (2002), Capacidade de Reserva em Redes, busca verificar, através de simulação, se uma determinada rede tem algum link congestionado, e o grau de comprometimento da capacidade, e, da mesma forma que o ACCESS, por ser agregado, não permite uma identificação mais precisa do local de congestionamento.

Sobre o grupo Velocidade, embora todos os seus indicadores forneçam indícios da existência de congestionamento em uma via ou em uma rede viária, os ligados à redução da velocidade em relação a condições de fluxo livre permitem uma avaliação mais direta, tal como a Redução Relativa de Velocidade – RSR (Morán e Bang, 2010). Esse índice é também conhecido como Índice de Redução da Velocidade por Congestionamento – SRCI (Smit, 2006; Smit *et al.*, 2008). Essa redução pode ser organizada em faixas, classificando qualitativamente a intensidade de congestionamento, como no indicador Bandas de Queda de Velocidade (Transport Scotland, 2006).

Os indicadores do grupo Tempo, da mesma forma que os ligados à velocidade, fornecem indícios da existência de congestionamento. Os indicadores que comparam o tempo de viagem com um tempo de referência (fluxo livre, limite legal etc.), no entanto, são mais adequados para a determinação da existência ou não de congestionamento e sua intensidade. O Índice de Tempo de Viagem – TTI (FHWA, 2012) é a razão entre o tempo de viagem no período de pico e o tempo em fluxo livre, e é talvez o índice mais

citado, na literatura, desse grupo. Os demais índices desse grupo, excetuando-se o Tempo de Viagem Médio, são variações do TTI, com diferenças metodológicas. Já os indicadores do grupo Atraso são muito utilizados para quantificar a intensidade do congestionamento, em particular o resultante de componentes viárias descontínuas, como as interseções.

Diagnóstico – Magnitude espacial

A quantificação do comprometimento da rede viária e os trechos que a compõem quanto ao congestionamento, é uma preocupação que tem suscitado a produção de relatórios periódicos como os desenvolvidos pela Metropolitan Transportation Commission - MTC (San Francisco Bay Area) (MTC, 2008). No mesmo sentido, a comunicação com o público leigo exige mensagens de fácil compreensão, o que se dá normalmente caracterizando a extensão comprometida da rede viária como em: “São Paulo registra 100km de vias congestionadas”. Ou seja, uma vez determinada a existência de congestionamento, é importante determinar-se qual o comprometimento da rede, normalmente no período de pico. Grant *et al.* (2011) consideram a extensão congestionada como uma das quatro principais dimensões a ser considerada na gerência de redes sujeitas a congestionamento.

Este tópico, portanto, visa determinar a abrangência espacial do congestionamento em uma rede. Para tal, é quantificada a extensão de vias congestionadas tanto em números absolutos quanto de forma percentual, em relação à extensão total da rede. Com essa finalidade, tem-se o indicador Extensão de Vias Congestionadas (OECD/ECMT, 2007; Litman e Doherty, 2009; Grant *et al.*, 2011; Litman, 2012a) e o Percentual de Vias Congestionadas (Elefteriadou *et al.* 2012), ambos do grupo Outros, como pode ser visto na coluna correspondente no Quadro 3.1. Adicionalmente, é possível, através do mapeamento em sistemas georreferenciados, observar-se visualmente a magnitude espacial do congestionamento, como, por exemplo, através do serviço oferecido pelo Google Maps (Google, 2012). Portugal e Araújo (2008), chamam a atenção para o impacto do congestionamento no sistema viário local, que tem implicações diretas na qualidade de vida da população, seja pela elevação das emissões de poluentes, seja pelo aumento no nível de ruído, entre outras.

Diagnóstico – Magnitude temporal

Uma das dimensões do congestionamento considerada por Grant *et al.* (2011) diz respeito à duração do congestionamento, ou seja, quanto tempo decorre, após iniciado o congestionamento, até que a via retorne a um estado não congestionado. Elefteriadou

et al. (2012), no mesmo sentido, citam a duração do congestionamento como exemplo de medida de desempenho. Colman (2007) considera essa uma questão importante pouco abordada na literatura.

Normalmente, busca-se quantificar a duração diária de um congestionamento recorrente. O indicador relacionado é apresentado no Quadro 3.1 como Horas Congestionadas (OECD/ECMT, 2007; Litman e Doherty, 2009; Grant *et al.*, 2011; FHWA, 2012; Litman, 2012a), no grupo Outros, único marcado na coluna correspondente do Quadro 3.1.

Monitoramento

Mantendo a premissa de que uma das funções dos indicadores é medir o progresso em direção a um objetivo (OECD/ECMT, 2007), tem-se como consequência a necessidade de monitoramento ao longo do tempo, de forma a verificar a evolução do congestionamento e as consequências de eventuais medidas tomadas (ou não) para sua mitigação. Esse monitoramento ao longo do tempo permite a elaboração de um perfil da ocorrência de congestionamento e sua intensidade, identificando congestionamentos recorrentes e seus padrões, bem como os efeitos de acidentes e outros eventos responsáveis por congestionamentos não recorrentes. Nesse sentido, o *Federal Highway Administration* - FHWA dos EUA considera o monitoramento uma ferramenta importante para verificar a eficácia das medidas tomadas na gerência do congestionamento (Grant *et al.*, 2011) e o *Texas Transportation Institute* produz relatórios de mobilidade urbana periódicos (Schrank *et al.*, 2011), onde são apresentados indicadores que podem ser monitorados ao longo do tempo, o que permite verificar a evolução do congestionamento nas principais áreas urbanas dos EUA.

Todos os indicadores, independentemente do grupo no qual foram enquadrados, permitem o monitoramento de vias ou conjunto de vias ao longo do tempo, sejam ou não normalizados. Sendo assim, a coluna correspondente no Quadro 3.1 apresenta marcações em todas as posições.

Hierarquização de links

Uma questão frequentemente abordada e que surge após a determinação de quais links estão sujeitos a congestionamento, seja recorrente ou não recorrente, se refere a como determinar qual seria o link mais crítico ou mais congestionado. De fato, Grant *et al.* (2011) colocam esse problema como um dos mais relevantes para a gerência de uma rede sujeita a congestionamentos e Jenelius *et al.* (2006) enfocam o problema em seu

trabalho. A resposta a essa questão tem particular importância tendo em vista que normalmente os recursos são finitos e que há necessidade de priorização de investimentos em intervenções que visem a mitigar os efeitos do congestionamento. Sendo assim, é necessário utilizar indicadores que permitam a comparação entre links, de forma a que possa ser estabelecida uma hierarquia ou um *ranking* de prioridades. Há indicadores adequados em todos os grupos, como pode ser visualizado nas marcações da coluna correspondente do Quadro 3.1. É importante ressaltar, no entanto, que os indicadores de congestionamento não avaliam a importância de um link no contexto da rede na qual está incluído, o que pode levar a uma hierarquia que não seja a ideal para o melhor desempenho global da rede viária. No entanto, é possível ressaltar problemas localizados e subsidiar medidas também locais para sua mitigação, sejam elas operacionais ou, eventualmente, de ampliação da capacidade viária.

Comparação entre redes

Em paralelo à identificação de links críticos, vários autores salientam a importância da avaliação do desempenho de redes ou sub-redes viárias e de sua comparação. Como exemplo, Sullivan *et al.* (2010) propuseram um indicador de desempenho para a comparação de redes e sub-redes, independentemente de sua topologia e porte. Os relatórios de mobilidade urbana do *Texas Transportation Institute* (Schrank *et al.*, 2011) apresentam quadros comparativos do congestionamento em diferentes áreas urbanas dos EUA, através de indicadores representativos de suas redes viárias.

De fato, para a montagem de estratégias para a mitigação de congestionamentos recorrentes em uma rede é conveniente dividi-la em partes e, com auxílio de indicadores apropriados, comparar as sub-redes resultantes e daí derivar uma hierarquia. A coluna correspondente do Quadro 3.1 apresenta os indicadores que podem ser utilizados com essa finalidade marcados, presentes em todos os grupos. Adicionalmente, esses indicadores selecionados permitem a comparação entre redes distintas, o que torna sua utilização possível em estudos de benchmarking.

3.3 Indicadores de confiabilidade

Os principais indicadores encontrados na bibliografia para confiabilidade, se referem à variabilidade do tempo de viagem, e propõem formas distintas para a mensuração da distribuição desse tempo. Alguns autores, como Börjesson *et al.* (2012), no entanto, consideram importante a modelagem da confiabilidade levando em consideração não somente a variabilidade do tempo de viagem, mas também as preferências do usuário

quanto aos horários de saída e chegada. Assumem que existe um horário preferido para chegada, base para a decisão do horário de saída. Se a confiabilidade fosse 100%, seria possível escolher o tempo de saída com precisão, de forma a chegar no horário exato, sem qualquer atraso ou antecipação. No entanto, em alguns casos, chegar com antecipação, ou mesmo atraso, não acarreta qualquer custo adicional ou desconforto, ou seja, haveria uma variação na confiabilidade que não seria percebida como desutilidade pelo usuário. A medição da confiabilidade deveria ser função do custo de oportunidade da realização de outras atividades, impactada, portanto, pela existência de atividades alternativas. Em abordagem semelhante, Engelson e Fosgerau (2011) propõem uma avaliação da confiabilidade partindo do princípio que o principal elemento motivador de uma viagem seria que, a partir de um determinado momento, a utilidade de estar no local de destino seria maior do que estar no local de origem. No entanto, não consideram que exista uma variação que seria indiferente quanto à utilidade, preferindo utilizar uma função contínua para a valoração dessas utilidades. Essas abordagens que procuram tratar das especificidades e motivações das diferentes viagens, representadas por uma matriz de origem e destino, embora sejam relevantes, dificilmente poderiam ser tratadas de forma sistemática em uma rede urbana complexa.

Alguns autores propõem abordagens indiretas de forma a facilitar a previsão de indicadores de confiabilidade, como é o caso de van Lint e van Zuylen (2005), que verificaram diferentes distribuições dos tempos de viagem para as condições de fluxo livre, formação e dissolução do congestionamento. Nesse sentido, Eliasson (2006, 2007, 2009) foi bem-sucedido em sua busca de uma relação entre a variabilidade do tempo de viagem e um indicador de congestionamento, no caso representado pela razão entre o tempo em condições reais e o tempo em condições de fluxo livre.

Lomax *et al.* (2003) propõem que os indicadores de confiabilidade poderiam ser classificados em quatro diferentes categorias:

- Estatísticos – indicadores apoiados em estatísticas sobre dados não processados ou pouco processados e que procuram expressar a variabilidade do tempo de viagem;
- *Buffer* – indicadores apoiados em medidas mais facilmente compreendidas por usuários e que são relacionadas à folga necessária para garantir que o destino será atingido no horário desejado;
- Viagens atrasadas – indicadores apoiados nos efeitos decorrentes da não confiabilidade do tempo de viagem, normalmente a quantidade de viagens atrasadas em determinado período; e

- Probabilísticos – indicadores apoiados em probabilidades da realização de viagens em faixa de tempo pré-determinada em determinado período.

3.3.1 Relação de indicadores de confiabilidade

A seguir são apresentados os indicadores de confiabilidade encontrados na bibliografia organizados nos grupos apresentados no tópico anterior.

Estatísticos

- Desvio padrão – é o desvio padrão do tempo de viagem em um link ou em uma rota. Pode ser determinado para um determinado horário do dia (pico, fora de pico) (OECD/ECMT, 2007);
- σ/t – Coeficiente de variação – obtido pela razão entre o desvio padrão e a média dos tempos de viagem (Eliasson, 2006, 2007, 2009; Lomax *et al.*, 2003);
- Distribuição dos tempos de viagem – medida da diferença entre o 80º ou o 90º percentil da distribuição dos tempos de viagem e a mediana (OECD/ECMT, 2007);
- Janela de tempo de viagem – em inglês, *Travel time window*, representa o conjunto dos tempos esperados de viagem, assumindo-se uma distribuição normal. O indicador é o intervalo de tempo determinado pela média dos tempos de viagem somando ou subtraindo um determinado número de desvios padrões, conforme o percentual de viagens que se queira incorporar (Lomax *et al.*, 2003);
- Índice de variabilidade – razão entre as diferenças nas condições de viagem entre os períodos de pico e fora do pico. O índice é calculado como uma razão da diferença entre os intervalos 95% de confiança superior e inferior entre os períodos de pico e fora do pico. As diferenças entre os intervalos (que representam cerca de 2 desvios padrões acima e abaixo da média) são geralmente maiores no pico do que fora do pico o que torna este índice normalmente maior do que 1 (Lomax *et al.*, 2003);
- Assimetria da distribuição – razão das diferenças entre os 90º e 50º percentis e entre os 50º e 10º percentis da distribuição dos tempos de viagem. Quanto maior for a assimetria, mais provável é a existência de tempos de viagem extremos em relação à mediana. Se a assimetria for maior do que 1, há mais tempo perdido com os viajantes com valores acima da mediana do que tempo economizado por aqueles abaixo da mediana (Van Lint *et al.*, 2008);

- Largura da distribuição – razão entre a diferença entre os 90º e 10º percentis e a mediana (Van Lint *et al.*, 2008); e
- Índice de Não Confiabilidade (UI) – probabilidade de que uma determinada viagem tenha um tempo atipicamente longo. Calculado como função dos indicadores de assimetria e de distribuição, além da extensão da rota (ver Van Lint *et al.*, 2008).

Buffer

- Tempo de *buffer* – medido a partir do excesso de tempo necessário para que o usuário tenha segurança de chegar no horário desejado, normalmente medido a partir da diferença entre o 95º percentil do tempo de viagem e o tempo de viagem médio (Lomax *et al.*, 2003);
- Índice de tempo de buffer – divisão da diferença entre o 95º percentil da taxa de viagens média e a taxa de viagens média pela taxa de viagens, considerando-se a taxa de viagens como a razão entre o tempo de viagem e a distância percorrida. Representa o percentual de tempo extra necessário para realizar uma viagem em função do congestionamento esperado (Lomax *et al.*, 2003; OECD/ECMT, 2007); e
- Índice de Planejamento de Tempo – 95º percentil do índice de buffer do tempo medido ao longo do período de pico (Lomax *et al.*, 2003).

Viagens atrasadas

- Índice de Confiabilidade da Florida (ou Método de Confiabilidade da Florida) – percentual de viagens realizadas sem atraso, no período de pico (Lomax *et al.*, 2003, McLeod e Morgan, 2011); e
- Índice de Sofrimento – mede o aspecto negativo da confiabilidade, medido a partir da quantidade de minutos em que os piores tempos de viagem excedem a média. Normalmente utilizam-se dados dos 20% piores tempos de viagem para a obtenção de um tempo médio de viagem com atraso que é então comparado ao tempo médio de viagem. Assim, o Índice de Sofrimento seria a diferença entre a taxa de viagens dos 20% maiores tempos de viagem e a média, dividida pela taxa média de viagem (Lomax *et al.*, 2003).

Probabilísticos

- Indicador Probabilístico – probabilidade de que o tempo de viagem ocorra dentro de um intervalo em função da mediana dos tempos (van Lint *et al.*, 2008).

3.3.2 Aplicação dos indicadores de confiabilidade

A seguir são apresentadas as principais vertentes para a mensuração da confiabilidade, segundo Lomax *et al.* (2003).

- Variação segundo o motorista – são medidos os tempos individuais de cada usuário (motorista). A variabilidade tende a ser elevada tendo em vista as características individuais de cada indivíduo serem um dos fatores que influenciam a velocidade de deslocamento;
- Variação segundo o segmento viário – taxa médias de viagem são comparadas, considerando-se um determinado segmento viário, ao longo de um intervalo de tempo, normalmente incluindo pico e fora de pico;
- Variação ao longo do dia – taxas médias de viagem são comparadas para cada viagem. As variações na velocidade devido a congestionamentos ao longo da rota são captadas;
- Variação cotidiana – taxas de viagem para viagens realizadas em determinado dia são comparadas a taxas médias diárias de viagem; e
- Variações em condições específicas – variações na taxa de viagem em função de eventos particulares ou condições específicas podem ser significativas.

Pode ser observado que todas as principais vertentes são apoiadas em dados históricos, não permitindo a determinação de indicadores de confiabilidade para casos em que esses dados não estejam disponíveis. De forma a contornar essa restrição, vários autores buscaram uma correlação entre o nível de serviço e o tempo de viagem e sua variação. Van Lint e Van Zuylen (2005), por exemplo, encontraram diferentes distribuições de tempo de viagem para as condições de fluxo livre, formação do congestionamento, congestionamento e dissolução do congestionamento. Eliasson (2006, 2007, 2009), por sua vez, foi o primeiro autor identificado na bibliografia a ser bem-sucedido em encontrar uma relação entre a variabilidade do tempo de viagem e congestionamento, definindo essa variabilidade como a razão entre o desvio padrão e a média do tempo de viagem, ou seja, o desvio padrão normalizado pelo tempo médio de viagem. Como é mais simples, através de modelagem, estimar o grau de congestionamento do que a variabilidade do tempo de viagem, a abordagem de Eliasson torna possível a estimativa de indicadores de confiabilidade mesmo em redes viárias complexas.

3.4 Indicadores de vulnerabilidade

De acordo com Jenelius and Mattsson (2012), é importante identificar a vulnerabilidade a eventos que possam causar a interrupção do serviço em links da rede viária, e as conexões que possam ter os maiores impactos. Esse procedimento permite o planejamento e a adoção de medidas para prevenção, mitigação e/ou reparo dos danos associados, incluindo a estimativa dos custos associados. A adoção de indicadores de vulnerabilidade contribuiria positivamente neste sentido. É importante lembrar que, pela conceituação apresentada no Capítulo 2, os indicadores de vulnerabilidade se referem a eventos infrequentes. De fato, Taylor *et al.* (2006) acrescentam que a possibilidade de interrupção de um link, ainda que altamente improvável, deve ser levada em consideração quando a vulnerabilidade é analisada, dessa forma reconhecendo a diferença entre os conceitos de vulnerabilidade e confiabilidade (que trata das variações cotidianas) e a necessidade de indicadores específicos.

Um crescente número de autores vem estudando a vulnerabilidade de redes, propondo indicadores para a hierarquização de links de acordo com sua importância para o desempenho dessas redes. A metodologia predominante para a obtenção desses indicadores (Chen and Miller-Hooks, 2012; Erath *et al.*, 2010; Jenelius *et al.*, 2006; Murray-Tuite and Mahmassani, 2004; Nicholson, 2003; Scott *et al.*, 2006; Taylor *et al.*, 2006) é baseada na avaliação do comportamento da rede após a retirada de um de seus links. A importância daquele link para a vulnerabilidade da rede poderia ser então medida a partir da diferença de desempenho nas condições com e sem o link analisado. Uma variação dessa abordagem é apresentada por outros autores, como Sullivan *et al.* (2010), Knoop *et al.* (2008, 2012) e Snelder *et al.* (2012), onde, em lugar da interrupção completa de um link, é sugerida uma interrupção parcial, com a análise do impacto da redução da capacidade de um link sobre o desempenho da rede.

Observa-se ainda que os autores analisados sempre contrapõem a oferta à demanda, através do carregamento de matrizes de viagens nas situações com a rede íntegra e após o evento perturbador. Nas duas situações são avaliados o tempo ou o custo total de deslocamento para a medição do desempenho da rede. A principal diferença metodológica é quanto ao modelo de alocação de viagens. Enquanto que alguns autores propõem a adoção de modelos dinâmicos de alocação (Knoop *et al.*, 2012; Snelder *et al.*, 2012), outros admitem a utilização de modelos de alocação estáticos, do tipo de equilíbrio do usuário (*User Equilibrium*) (Dehghanisani *et al.*, 2013; Jenelius *et al.*, 2006; Scott *et al.*, 2006; Sullivan *et al.*, 2010). A alocação dinâmica tende a retratar mais fielmente o processo de alocação de viagens, por considerar a dinâmica temporal,

permitindo, por exemplo, simular de forma mais fiel o efeito em links a montante decorrente de filas em links a jusante. Há ainda a possibilidade de 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. No entanto, as simulações dinâmicas são muito exigentes em termos de recursos computacionais e de tempo, o que restringe na prática seu uso em redes urbanas complexas, como as representativas de grandes cidades. Tampère *et al.* (2007) propõem uma abordagem mista, com a utilização de alocação dinâmica inicialmente e alocações estáticas adicionais, como forma de minimizar o custo de processamento sem abandonar totalmente as alocações dinâmicas.

Como já relatado anteriormente, as principais variáveis quantificadas para a obtenção dos indicadores são o tempo e o custo de viagem, presumivelmente 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. Zhu *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.

3.4.1 Relação de indicadores de vulnerabilidade

Esses indicadores buscam quantificar a importância relativa de cada link para o desempenho da rede que o contém. 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 ótica da vulnerabilidade. Há ainda indicadores que buscam avaliar a vulnerabilidade da rede viária como um todo, de forma a permitir comparações entre redes ou sub-redes.

A seguir são apresentados os principais indicadores de vulnerabilidade encontrados na bibliografia, agrupados conforme o tipo do modelo de alocação utilizado para sua obtenção. É importante salientar que as denominações dos índices nem sempre coincidem com os termos utilizados pelos autores referenciados em seus trabalhos originais e têm como finalidade facilitar sua identificação.

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* (UE). A seguir são apresentados os indicadores encontrados na bibliografia e que podem ser avaliados segundo este método de alocação.

- Confiabilidade da capacidade – CC (Chen *et al.*, 2002) – definido como a probabilidade de que a capacidade máxima de uma rede seja maior ou igual a um determinado nível fixo de demanda quando a capacidade de seus links é sujeita a variações aleatórias. Este índice incorpora, portanto, efeitos de dois atributos, Vulnerabilidade e Confiabilidade.
- Índice de Risco – IRN (Nicholson, 2003) – índice de risco relacionado à vulnerabilidade, mede as diferenças de desempenho ocasionadas pela interrupção de um link, considerando, adicionalmente, a probabilidade da ocorrência do evento disruptivo. Não é, portanto, um índice exclusivamente de vulnerabilidade, incorporando o atributo Risco em sua determinação.
- Índice de Interrupção – IIT (Murray-Tuite e Mahmassani, 2004) – índice agregado que consolida índices obtidos por par de origem e destino. Baseia-se na verificação da capacidade ociosa em rotas alternativas e na diferença de tempo de viagem.
- Índice de Importância – II (Jenelius *et al.*, 2006) – mede a variação do custo global para a rede de transporte derivado da interrupção de um link ou grupo de links. O índice leva em consideração a possibilidade da desconexão da rede, e a eventual demanda não satisfeita.
- Índice de Exposição – IE (Jenelius *et al.*, 2006) – semelhante ao índice II, o índice de exposição difere no sentido em que procura avaliar um grupo de nós, ou uma região, quanto à sua exposição ou vulnerabilidade a um evento capaz de interromper o fluxo em um link determinado. Trata-se basicamente de uma variação média de custo provocada pela interrupção de um link.
- Índice de Robustez da Rede – *Network Robustness Index* – NRI (Scott *et al.*, 2006) – semelhante aos dois índices anteriores, mede a deseconomia decorrente da desativação de um determinado link. Mede, portanto, a importância de um link determinado para a robustez da rede viária. Sendo a vulnerabilidade um atributo recíproco à robustez, um link crítico para a robustez o é também para a vulnerabilidade.

- Índice de Vulnerabilidade – IV (Taylor *et al.*, 2006) – Semelhante ao IE e NRI, difere no cômputo do custo, calculado ao longo das rotas e ponderado pela demanda.
- Índice de Custo Marginal de Congestionamento – ICMC (Safirova *et al.*, 2007) – mede o custo marginal de congestionamento imposto ao sistema pelo aumento de uma unidade de tráfego (fluxo x distância). Não foi concebido como um índice de vulnerabilidade pelos autores, mas guarda uma relação com esse atributo, uma vez que avalia a sensibilidade do desempenho em função do comprometimento da capacidade de um ou mais links.
- Índice de Vulnerabilidade – IVE (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.
- Índice de Robustez da Rede modificado – NRI-m (Sullivan *et al.*, 2010) – trata-se de uma modificação do 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.
- Índice de Resiliência – IR (Chen e Miller-Hooks, 2012) – relaciona a demanda atendida pós-evento disruptivo da rede com a demanda atendida pré-evento.
- Índice de Rotas Alternativas – IRA (Snelder *et al.*, 2012) – indicador baseado na capacidade oferecida por rotas alternativas a um determinado link sob análise. Exige análise gráfica para a determinação das rotas alternativas a serem consideradas.
- Índice de Vulnerabilidade – IVD (Dehghnisani *et al.*, 2013) – semelhante à maioria dos indicadores descritos e que se baseiam em diferenças de desempenho de uma rede entre situações antes e depois da interrupção de um link. Difere, no entanto, na métrica, por ser determinado a partir da variação do produto veículos x extensão percorrida, em lugar da utilização do tempo ou custo de viagem.

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. Vários autores consideram a abordagem dinâmica como mais adequada para a avaliação da vulnerabilidade, como Courthout *et al.* (2009), Knoop *et al.* (2008, 2012) e Snelder *et al.* (2012).

Knoop *et al.* (2012) e Snelder *et al.* (2012), particularmente, apresentam uma série de indicadores relacionados à vulnerabilidade, entre os quais:

- Índice de filas – IF1 (Knoop *et al.*, 2012) – correlaciona o fluxo com a razão fluxo/capacidade, como indicador para a formação de filas;
- Índice de tempo de bloqueio a montante – IF2 (Knoop *et al.*, 2012) - tempo em que a fila formada atinge uma interseção a montante; e
- Índice de perda de tempo – IPT (Snelder *et al.*, 2012) – tempo global perdido em decorrência do 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.

3.4.2 Indicadores de vulnerabilidade voltados para regiões

Alguns indicadores de vulnerabilidade 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 se torna intransitável.

Os principais indicadores encontrados são:

- Índice de Robustez de Viagens em Rede (NTR) (Sullivan *et al.*, 2010) – permite 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; e

- Índice de Vulnerabilidade com Base em Célula – IVBC (Jenelius e Mattsson, 2011) – avalia a vulnerabilidade com base na obstrução de todos os links em uma região, ou célula.

3.4.3 Aplicação dos indicadores de vulnerabilidade

A maior aplicação dos indicadores de vulnerabilidade é estratégica. Este atributo está diretamente relacionado à capacidade de a rede viária ter um desempenho satisfatório ainda que um ou mais de seus links estejam degradados e com a capacidade comprometida. Tipicamente, um indicador de vulnerabilidade não busca avaliar a probabilidade da ocorrência de um evento que possa prejudicar o desempenho de uma rede viária, mas sim avaliar as consequências de um evento destrutivo, seja ele frequente ou não. Este tipo de abordagem é particularmente importante para regiões sujeitas a desastres naturais, ou mesmo antropogênicos, como atentados terroristas e acidentes diversos. Uma aplicação possível seria a avaliação da vulnerabilidade de uma rede viária em face de eventos pouco prováveis, mas de características desastrosas, como, por exemplo, em planos de evacuação de áreas próximas a usinas nucleares.

Conhecendo-se a hierarquia de links quanto à sua importância para o desempenho da rede viária pode-se avaliar a conveniência da alocação de recursos para mitigar o efeito do mal funcionamento daqueles links considerados críticos. Dessa forma pode-se intervir não só com aumentos de capacidade da infraestrutura viária, mas com a implantação de modos de transporte mais eficientes ou de maior capacidade. Dada a sensibilidade do atributo Vulnerabilidade à existência de rotas alternativas, links potencialmente pertencentes a seções de corte mínimo da rede viária são candidatos a um alto nível de importância no que se refere este atributo, como é o caso daqueles formados por túneis, viadutos e pontes.

3.5 Síntese

O presente capítulo conclui a revisão bibliográfica no que toca à caracterização dos atributos de desempenho, delimitação da pesquisa e identificação de indicadores. Verifica-se que o planejamento do transporte urbano com foco no automóvel é um modelo esgotado e que este paradigma já vem sendo substituído por iniciativas como *Complete Streets* (National Complete Streets Coalition, 2015) e mesmo o Desenvolvimento Orientado a Transporte Público (DOT ou TOD, na sigla em inglês) (EMBARQ Brasil, 2015). O foco no automóvel tem consequências negativas no desempenho da rede viária e traz como consequência visível o congestionamento,

decorrente do desequilíbrio entre oferta viária e a demanda de tráfego. O congestionamento não é, no entanto, o único atributo para a avaliação do desempenho da rede viária. De fato, quanto a critérios para avaliação de redes, McLeod e Morgan (2011) discutiram a importância da análise da mobilidade em uma rede viária sob quatro dimensões, e Oliveira (2012) destaca as principais funções que uma rede deve exercer para que possa ser considerada como com bom desempenho (ver item 2.1, no Capítulo 2).

Segundo o TRB (2006), é fundamental a adoção de medidas para a melhor alocação de recursos para preservar, operar e melhorar a infraestrutura. Nesse sentido, torna-se necessária uma estrutura metodológica que permita a hierarquização de links em uma rede viária, com base em sua importância para o desempenho. O Capítulo 2 discute os atributos de desempenho e delimita a presente pesquisa, que abrange os atributos Congestionamento, Confiabilidade e Vulnerabilidade, baseados na contraposição entre oferta e demanda. A estrutura metodológica desenvolvida deve, portanto, ser apoiada na avaliação desses três atributos. Uma rede vulnerável é mais suscetível à formação de congestionamentos, sempre que houver falha em um ou mais de seus links em função de eventos, ainda que infrequentes (Taylor *et al.*, 2006; Snelder *et al.*, 2012, Chen e Miller-Hooks, 2012). O congestionamento, por sua vez, leva à queda da confiabilidade, já que a variabilidade do tempo de viagem tende a aumentar com aumento da saturação da via (Eliasson, 2007, 2009). Há, portanto, algum relacionamento entre os atributos analisados, embora tenham conceitos distintos. É importante verificar se as hierarquias produzidas pelos três atributos são distintas e, ainda, se hierarquias produzidas por diferentes indicadores do mesmo atributo produzem resultados semelhantes.

O presente Capítulo 3 apresenta os principais indicadores para a mensuração do desempenho de uma rede viária segundo os atributos citados. Para cada um dos atributos os indicadores foram classificados em grupos segundo suas características, seja com relação às variáveis envolvidas seja com relação aos procedimentos envolvidos para sua avaliação. Dessa forma obtém-se um arcabouço, que, juntamente com a conceituação discutida no Capítulo 2, permite o desenvolvimento da Etapa 1 da estrutura metodológica proposta no Capítulo 4. Essa estrutura visa a obtenção de hierarquias derivadas dos três atributos de desempenho, através da avaliação dos indicadores aqui apresentados. Dessa forma, podem ser verificadas as hipóteses apresentadas no Capítulo 1, quanto à independência dos três atributos tratados e das hierarquias resultantes.

4. ESTRUTURA METODOLÓGICA

4.1 Considerações iniciais

O objetivo geral da presente Tese é preencher a lacuna na literatura referente à análise do desempenho de redes viárias com base em mais de um atributo de desempenho, como já discutido no Capítulo 1. Nesse sentido, é proposta uma estrutura metodológica que permite a elaboração de múltiplas hierarquias de links críticos sob as diferentes óticas decorrentes de cada atributo analisado. Os atributos aqui especificamente tratados são Congestionamento, Confiabilidade e Vulnerabilidade.

A estrutura proposta cumpre o propósito de praticidade e aplicabilidade de forma sistemática a redes viárias urbanas, ainda que complexas, com dados comumente disponíveis. Permite ainda a identificação de semelhanças e diferenças entre os resultados obtidos a partir de cada atributo, e uma análise, portanto, em várias dimensões.

No decorrer da pesquisa evidenciou-se a importância estratégica do atributo Vulnerabilidade e, conseqüentemente, da hierarquia derivada da aplicação de seus indicadores. No entanto, o cálculo de indicadores de vulnerabilidade para todos os links de uma rede complexa exige grandes recursos computacionais e de tempo, o que contraria uma das premissas citadas anteriormente, que envolve a praticidade da metodologia proposta. Dessa forma, foi necessário um passo extra na metodologia, que compreende uma pré-seleção de links potencialmente mais críticos no que diz respeito à Vulnerabilidade e que teriam, em um passo seguinte, seus indicadores calculados. De fato, outros autores utilizaram por vezes indicadores auxiliares como *proxy* de indicadores de vulnerabilidade em virtude dessa dificuldade de sua determinação em redes complexas. A abordagem aqui adotada consiste em calcular efetivamente indicadores de vulnerabilidade em uma rede complexa, a partir de uma pré-seleção que inclui a consideração de outros atributos, além de *proxys* da vulnerabilidade. É, portanto, uma abordagem original e que difere significativamente do encontrado na bibliografia.

A Estrutura Metodológica proposta pode ser dividida em três etapas, descritas sucintamente a seguir e apresentadas, de forma esquemática, na Figura 4.1.

- 1) Etapa 1 – consiste na seleção, para cada atributo, de indicadores aderentes passíveis de serem utilizados para a hierarquização de links em uma rede viária complexa. Os principais critérios para a seleção são: disponibilidade de

informações; adequação aos recursos existentes, financeiros e de tempo. Para cada um dos indicadores selecionados deve ser desenvolvido procedimento para sua obtenção a partir da adaptação de procedimentos levantados em revisão bibliográfica. A adaptação deve ser realizada de forma a permitir sua aplicação de forma prática, o que é realizado na etapa seguinte.

- 2) Etapa 2 – consiste na aplicação dos procedimentos desenvolvidos na Etapa 1, visando a obtenção de hierarquias individualizadas para cada um dos atributos de desempenho, quais sejam: Congestionamento, Confiabilidade e Vulnerabilidade. Como ferramenta principal deve ser utilizado software de planejamento de transportes que permita simulações sobre redes de transporte complexas. Como explanado anteriormente, tornou-se necessária a inclusão na estrutura metodológica de procedimentos para tratamento de indicadores auxiliares. Assim, os procedimentos para determinação dos indicadores de vulnerabilidade são aplicados após uma pré-seleção de links potencialmente críticos.
- 3) Etapa 3 – consiste na análise dos resultados obtidos durante a Etapa 2. A avaliação proposta é realizada de forma numérica e qualitativa, apoiada em análises comparativas das hierarquias produzidas pelos indicadores dos três atributos de desempenho.

A análise comparativa permite uma análise quanto aos indicadores e atributos considerados: indicadores diferentes de um mesmo atributo devem produzir hierarquias semelhantes, ao contrário do que se espera de indicadores baseados em atributos diferentes. Especificamente quanto à presente Tese, essa análise permite ainda buscar evidências de que Congestionamento, Confiabilidade e Vulnerabilidade sejam atributos distintos, complementares e que a hierarquia produzida para cada um dos atributos seja única.

A produção de múltiplas hierarquias de links críticos com base em diferentes atributos permite que a conceituação desses atributos possa ser melhor compreendida, complementando o arcabouço tratado nos Capítulos 2 e 3. A aplicação da estrutura em uma rede viária complexa permite, ainda, a verificação da sua praticidade e possibilidade de utilização de forma sistemática. Adicionalmente, pode ser avaliada a existência ou não de correlação entre os diferentes atributos analisados e entre indicadores de um mesmo atributo.

A seguir são apresentadas considerações sobre as três etapas da estrutura metodológica proposta.

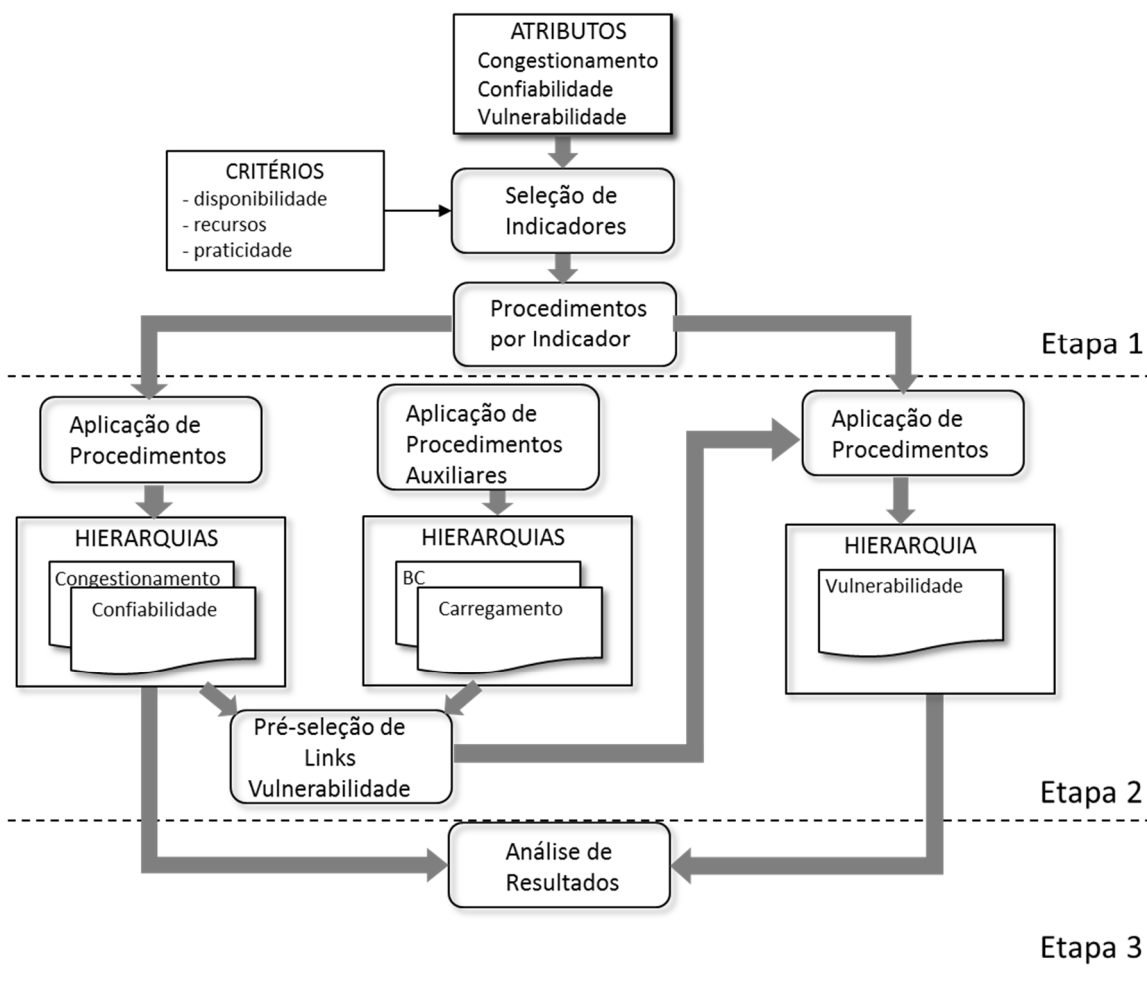


Figura 4.1 – Estrutura metodológica.

4.2 Etapa 1 – Procedimentos para cálculo dos indicadores selecionados para cada atributo e justificativas

Esta etapa tem como propósito selecionar indicadores para cada um dos três atributos e propor procedimentos para sua determinação. Normalmente seria suficiente um indicador para cada atributo. Aqui, no entanto, onde possível, foram selecionados mais de um indicador por atributo de forma a verificar, em aplicação teste, semelhanças e diferenças entre resultados não só entre hierarquias derivadas de diferentes atributos, mas também entre hierarquias derivadas de indicadores diferentes de um mesmo atributo, onde se espera uma maior semelhança. É importante ressaltar que, embora tenham sido envidados esforços para a seleção dos indicadores mais adequados à metodologia proposta, outros indicadores poderão ser utilizados, em substituição aos

selecionados, para atender casos específicos ou se adequar à disponibilidade de recursos também específicos. Nos itens subsequentes, os indicadores selecionados e procedimentos para sua determinação são apresentados, por atributo de desempenho.

4.2.1 Congestionamento

Os indicadores de congestionamento foram, na Seção 3, classificados em diferentes grupos: Equilíbrio Demanda/Oferta; Velocidade; Tempo; Atraso; e Outros. Desses grupos, verifica-se que *Velocidade*, *Tempo* e *Atraso* são, na realidade, grupos de indicadores que abordam diferentes aspectos da dimensão tempo. Dessa forma, foram selecionados dois indicadores de congestionamento para o desenvolvimento da pesquisa, um deles ligado ao grupo *Equilíbrio Demanda/Oferta* e outro ligado a um dos grupos da dimensão tempo. Os indicadores selecionados foram o V/C, do grupo Demanda/Oferta, e o CI (Zhang e Lomax, 2007), do grupo Tempo, à semelhança do realizado em Oliveira *et al.* (2014a e 2014b). A escolha do V/C se dá por se tratar, junto com o nível de serviço, do indicador mais difundido para a mensuração do grau de congestionamento, particularmente no Brasil. Tem ainda a seu favor a facilidade de obtenção e a compreensão de seu conceito. Dentre os indicadores do grupo Tempo, que tratam da diferença ou razão entre tempos nas condições congestionadas e sem congestionamento, o TTI é talvez o mais difundido, desenvolvido pelo *Texas Transportation Institute* e citado em diversos documentos, tal como em Grant *et al.* (2011). O TTI 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. Dessa forma, como representante do grupo da dimensão tempo, optou-se pelo CI, uma variação mais genérica do índice TTI, mais difundido. Assim, foram selecionados dois indicadores de congestionamento, o V/C e o CI.

De uma forma geral, o procedimento para a obtenção dos indicadores de congestionamento para cada link em uma rede viária pode ser visto na Figura 4.2. Uma matriz de origem e destino é carregada sobre um modelo de rede viária, utilizando um método de alocação de viagens, como, por exemplo, o método de Equilíbrio do Usuário, ou *User Equilibrium* (UE). O indicador V/C, razão entre volume de tráfego e capacidade pode ser obtido para cada link com base no volume alocado para cada link e respectiva capacidade viária, normalmente determinada para o nível de serviço “E” por metodologia simplificada baseada naquela preconizada pelo *Highway Capacity Manual – HCM* (TRB, 2010). O indicador CI, por sua vez, mede o congestionamento a partir da relação entre

o tempo na situação congestionada (t) e o tempo em condições de fluxo livre (T), como pode ser visto na Equação 4.1.

$$CI = \frac{t}{T} \quad (4.1)$$

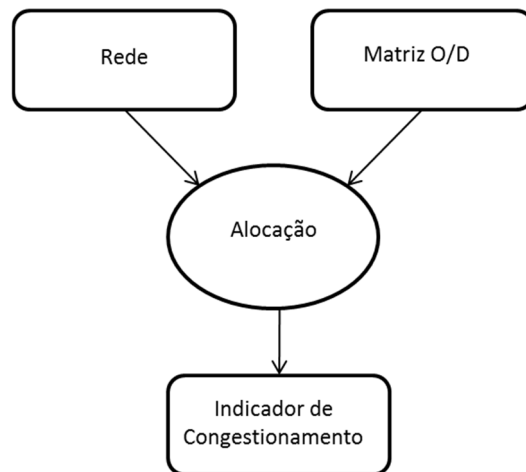


Figura 4.2 – Procedimento geral para a obtenção de indicadores de congestionamento.

De uma maneira geral, o procedimento é direto, com os indicadores calculados a partir de informações obtidas da rede viária carregada. Para o V/C, o volume é determinado a partir dos carregamentos obtidos na alocação e a capacidade é característica de cada link da rede de simulação. No caso do CI, as duas variáveis são o tempo de viagem após a alocação (obtido a partir dos resultados da alocação) e o tempo em fluxo livre, disponível a partir da extensão e da velocidade em fluxo livre, dados de entrada para a modelagem do tráfego e base para a determinação do tempo de viagem inicial de cada link, no processo de alocação.

4.2.2 Confiabilidade

Os indicadores de confiabilidade foram classificados, no Capítulo 3, nos grupos: Estatísticos; Buffer; Viagens atrasadas; e Probabilísticos. Todos os grupos têm em comum uma relação com a distribuição do tempo, ou seja, uma busca da mensuração da variabilidade do tempo de viagem.

Não apenas os indicadores de confiabilidade incluídos no grupo *Estatísticos*, mas também os classificados nos demais grupos, dependem essencialmente de estatísticas baseadas em dados históricos. Embora a determinação da maioria dos indicadores identificados seja relativamente simples a partir de dados obtidos de coletas automáticas de dados de tráfego e de tempo de viagem, essa determinação é difícil de ser

generalizada em uma rede complexa, tendo em vista o grande esforço necessário para a obtenção de dados. A estimativa da variabilidade do tempo de viagem, atual e futura, em modelos de simulação de redes complexas é igualmente difícil, exigindo micro simulação e alocação dinâmica. Para redes viárias representativas de áreas de menor porte, no entanto, ferramentas de micro simulação poderiam ser usadas, levando em consideração fatores estocásticos de demanda e seu efeito nos tempos de viagem.

Como o que aqui se pretende é a simulação do tráfego em redes viárias complexas, há que se tomar uma abordagem indireta.

A variabilidade do tempo de viagem proposta por Eliasson (2006, 2007, 2009) é similar ao coeficiente de variação do tempo proposto por outros autores (Lomax, 2003, por exemplo), apresentados no grupo *Estatísticos* de indicadores, no Capítulo 3. A proposição de Eliasson apresenta, no entanto, a vantagem de poder ser estimada uma vez conhecidos os tempos de viagem em condições observadas (ou simuladas) e em condições de fluxo livre, para cada link da rede. Assim, a determinação deste indicador em redes complexas pode ser sistematizada utilizando-se simuladores estáticos largamente disponíveis no mercado, tais como o TransCad (Caliper Corporation), EMME (INRO) e outros. A variabilidade do tempo para diferentes cenários futuros de oferta e demanda passa, portanto, a poder ser estimada com relativa praticidade.

Dessa forma, o indicador de confiabilidade selecionado para a aplicação teste foi o proposto por Eliasson (2006, 2007, 2009), adotado também em Oliveira *et al.* (2016) e determinado conforme a Equação 4.2. Trata-se de um coeficiente de variação, razão entre o desvio padrão e a média dos tempos de viagem.

$$\frac{\sigma}{t} = \beta * \beta_{tod} * \beta_{speed} * L^{\alpha} * t^{\gamma-1} \left(\frac{t}{T} - 1 \right)^{\omega} \quad (4.2)$$

Onde:

σ = desvio padrão dos tempos de viagem [min];

t = tempo médio de viagem [min];

T = tempo médio de viagem em condições de fluxo livre [min];

L = extensão do link [km];

β_{tod} = variável *dummy* para o período do dia;

β_{speed} = variável *dummy* para o limite de velocidade;

$\alpha, \beta, \gamma, \omega$ = parâmetros estimados.

As variáveis incluídas no modelo de Eliasson (2009) são, portanto:

- Tempo médio de viagem;
- Aumento no tempo de viagem em relação ao tempo em condições de fluxo livre ($t/T-1$);
- Extensão do link;
- Variável *dummy* para o período do dia: o parâmetro para o período de entre-pico é normalizado para 0 na anamorfose logarítmica da função e são estimados parâmetros para “antes do pico da manhã”, “depois do pico da manhã”, “antes do pico da tarde” e “depois do pico da tarde”. Segundo Eliasson (2009), esse procedimento se deve à expectativa de que o desvio padrão seja diferente durante a formação e dissipação do congestionamento; e
- Variável *dummy* para o limite de velocidade: o parâmetro para a velocidade limite de 50km/h é normalizado para 0 (zero) na anamorfose logarítmica da função e é estimado parâmetro para o limite de 70km/h.

Eliasson (2009) testou modelos em separado para três períodos de análise: primavera de 2005, outono de 2005 e primavera de 2006, além de um modelo para o conjunto total de dados, sempre para cidade de Estocolmo, Suécia. Tendo em vista se tratar de um trabalho não publicado, disponibilizado diretamente pelo autor, cabe aqui a reprodução de seus resultados.

O Quadro 4.1 apresenta os principais resultados obtidos para a regressão linear, após anamorfose logarítmica.

Quadro 4.1 – Resultados da regressão – parâmetros para o cálculo do indicador de confiabilidade de Eliasson.

	Todos os períodos			Primavera 2005			Outono 2005			Primavera 2006		
	Erro padrão	Teste t		Erro padrão	Teste t		Erro padrão	Teste t	Erro padrão	Teste t		
β	-1,50	0,03	-57,8	-1,27	0,05	-26,7	-1,69	0,04	-44,4	-1,46	0,05	-30,0
γ	1,09	0,02	48,3	1,04	0,04	26,5	1,09	0,03	31,8	1,02	0,04	23,6
ω	0,52	0,01	48,8	0,56	0,02	27,6	0,52	0,02	32,1	0,48	0,02	26,0
α	-0,28	0,02	14,4	-0,23	0,03	-6,7	-0,29	0,03	10,2	-0,26	0,04	-6,7
β_{ToD} após pico da tarde	0,14	0,02	5,5	0,02	0,04	0,5	0,23	0,04	5,8	0,17	0,05	3,7
β_{ToD} após pico da manhã	0,18	0,03	7,0	0,02	0,04	0,5	0,31	0,04	7,5	0,22	0,05	4,7
β_{ToD} antes do pico da tarde	0,00	0,02	0,1	-0,13	0,04	-3,2	0,06	0,04	1,5	0,10	0,05	2,2
β_{ToD} antes do pico da manhã	0,02	0,02	0,8	-0,05	0,04	-1,4	0,06	0,03	1,9	0,04	0,04	1,1
β_{speed} 70km/h	0,27	0,02	13,3	0,27	0,03	7,9	0,34	0,03	10,3	0,21	0,04	5,6
R ² múltiplo	0,61			0,68			0,73			0,61		

Fonte: Eliasson (2009)

Pode ser observado, no Quadro 4.1, que os parâmetros encontrados são razoavelmente estáveis, comparando-se os três períodos de análise. As exceções seriam os valores encontrados para β_{TOD} , que apresentam uma maior variação. Percebe-se, no mesmo Quadro 4.1, que o desvio padrão do tempo de viagem esperado é maior nos horários de dissolução do congestionamento, quando comparado com o esperado para o horário de formação de congestionamento, que é semelhante ao esperado para o entre-pico (valor normalizado para zero).

Segundo Eliasson (2009), os dados foram levantados em grande diversidade de condições de características de tráfego e de níveis de congestionamento. Vale ainda ressaltar que foi implantada uma taxa de congestionamento em Estocolmo na primavera de 2006, o que permitiu levar em conta o efeito dessa taxa nas condições de tráfego e, conseqüentemente, na variabilidade do tempo de viagem. Dessa forma, acredita-se que a formulação obtida possa ser generalizada para outras redes viárias urbanas.⁵

Para a aplicação da estrutura metodológica proposta optou-se pela utilização dos valores derivados da regressão realizada para todos os períodos em conjunto.

Sendo assim, os valores para os parâmetros considerados para a aplicação da fórmula citada na Equação 4.2 são aqueles estimados por Eliasson (2009) e relacionados nos Quadros 4.2 e 4.3, com as variáveis *dummy* já convertidas da anamorfose logarítmica.

Quadro 4.2 – Parâmetros para o Indicador de Confiabilidade de Eliasson (ICE).

Parâmetro	α	β	γ	ω
Valor	-0,28	0,2231	1,09	0,52

Fonte: Eliasson (2009)

Quadro 4.3 – Variáveis Dummy para o Indicador de Confiabilidade de Eliasson (ICE).

Variáveis Dummy	β_{tod} (*)	β_{speed} (50/km/h)	β_{speed} (70 km/h)
Valores	1,1052	1,00	1,31

(*) média dos valores estimados por Eliasson para antes e depois do pico da manhã.

Fonte: adaptado de Eliasson (2009)

É interessante observar que a relação t/T (Equação 4.2) pode ser considerada como um indicador de congestionamento (de fato, semelhante ao CI discutido anteriormente),

⁵ Contatado por correspondência em 2015, Jonas Eliasson confirmou o seu entendimento que os parâmetros obtidos com base em observações na cidade de Estocolmo são aplicáveis a outras cidades, como o Rio de Janeiro, tendo em vista a diversidade de situações em que os dados foram coletados.

com o valor 1 para situações de fluxo livre, e crescendo à medida em que aumenta o congestionamento. Assim, o indicador de confiabilidade de Eliasson é influenciado pelo nível de congestionamento.

O procedimento geral para a determinação do Indicador de Confiabilidade de Eliasson (ICE) apresentado na Figura 4.3 é similar ao apresentado para Congestionamento, com base no carregamento de uma matriz de origem e destino à uma rede viária utilizando-se um método de alocação de viagens, geralmente o UE.

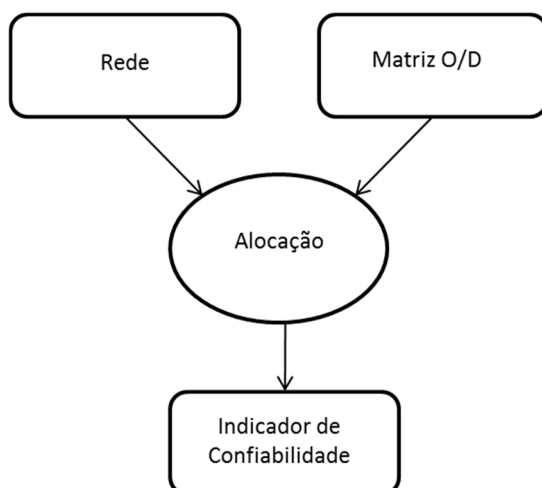


Figura 4.3 – Procedimento geral para a obtenção do Indicador de Confiabilidade de Eliasson (ICE).

Para a estrutura metodológica proposta selecionou-se, assim, o ICE, único indicador identificado na bibliografia passível de ser aplicado em redes complexas com praticidade. Como esse indicador é uma função do nível de saturação da via (tempo de viagem nas condições de carregamento simuladas/tempo de fluxo livre), o procedimento para sua obtenção é direto, a partir dos resultados da alocação na rede de simulação.

4.2.3 Vulnerabilidade

Tendo em vista a premissa da praticidade da metodologia a ser proposta, foram descartados os indicadores dependentes de alocação dinâmica ou mista, dando preferência aos derivados de alocação estática. De fato, os indicadores apoiados em alocação dinâmica exigem uma quantidade maior de recursos tanto financeiros como de tempo, o que limita a sua aplicação sistemática, um dos critérios de seleção de indicadores adotado. Como se tem como objetivo a comparação de resultados obtidos a partir da análise da vulnerabilidade com outros de diferente abordagem, é desejável ainda selecionar indicadores não impactados por outros atributos. Dentre os indicadores baseados em alocação estática, a maioria propõe uma avaliação com base no efeito da

interrupção de um link da rede viária. Alguns, no entanto, admitem a análise com base no comprometimento da capacidade de um link, função de um evento que interrompe apenas parcialmente uma ligação.

Dentre os indicadores analisados no Capítulo 3, passíveis de serem determinados a partir de alocações estáticas, podem ser descartados, em princípio, o CC e o IRN, por serem índices impactados por outros atributos, Confiabilidade e Risco, respectivamente. Os indicadores ICMC e IRA medem a vulnerabilidade de forma indireta: o ICMC a partir do cômputo de um custo marginal de congestionamento e o IRA a partir do cômputo da capacidade ociosa de rotas alternativas. Dessa forma, foram esses também descartados, optando-se pela seleção de indicadores que buscam determinar de forma direta a vulnerabilidade.

Os demais indicadores relacionados são determinados com base na diferença entre o desempenho da rede nas condições antes e depois da interrupção total ou parcial em um dos links, em procedimentos com pequenas diferenças metodológicas e de variáveis consideradas. Uma das principais métricas utilizadas para a mensuração do impacto no desempenho da rede é o aumento no tempo global de viagem. Também a variação na extensão total percorrida ou nos custos generalizados de transporte poderia ser considerada.

Para a estrutura metodológica proposta decidiu-se analisar o comportamento de duas das vertentes da metodologia de determinação de indicadores de vulnerabilidade: a baseada na interrupção total e a baseada na interrupção parcial de um dos links da rede. Dentre os indicadores identificados, apenas o NRI-m propõe a análise da vulnerabilidade com base na interrupção parcial do link, simulando uma redução da sua capacidade e, por esse motivo, foi um dos indicadores selecionados para análise. O NRI-m é uma modificação do NRI, diferindo exatamente por ser o NRI baseado na interrupção total de um link. Assim, surge naturalmente o NRI como o segundo indicador selecionado, de forma a que possam ser analisadas as diferenças entre as duas metodologias com o menor viés possível.

A métrica a ser utilizada para o desempenho é a quantificação do aumento no tempo global de viagem na rede quando um de seus links é impactado. A determinação tanto do NRI quanto do NRI-m se faz de acordo com a Equação 4.3.

$$NRI_k = \sum_i t_i^{(k)} \times v_i^{(k)} - \sum_i t_i \times v_i \quad (4.3)$$

Onde:

NRI_k = índice de robustez para o link k (NRI ou NRI-m);

$t_i^{(k)}$ = tempo (ou custo) no link i na situação com o link k obstruído (total ou parcialmente);

$v_i^{(k)}$ = volume de tráfego no link i na situação com o link k obstruído (total ou parcialmente);

t_i = tempo (ou custo) no link i com a rede íntegra;

v_i = volume de tráfego no link i com a rede íntegra.

É importante notar que o índice NRI (não é o caso do NRI-m, discutido adiante) não é perfeitamente adequado para a avaliação de links que, se interrompidos, provoquem a divisão da rede em partes desconectadas. De fato, se aplicada a Equação 4.3 literalmente para um link nessas condições, como o tempo e custo de viagem tenderiam ao infinito, seria obtido um valor também tendendo ao infinito para o NRI.

Jenelius *et al.* (2006), ao proporem seu Índice de Importância (II) chamam atenção para a questão afirmando que, embora significativa, a impossibilidade de realização de uma viagem não seria infinitamente pior do que qualquer aumento finito no custo de viagem. Para tratar o problema, introduzem o conceito de demanda insatisfeita, que poderia ser definido pela Equação 4.4.

$$u_{ij}^{(k)} = \begin{cases} x_{ij} & \text{se } c_{ij}^{(k)} = \infty, \\ 0 & \text{se } c_{ij}^{(k)} < \infty \end{cases} \quad (4.4)$$

Onde:

$u_{ij}^{(k)}$ = demanda insatisfeita para os pares de nós i e j , quando o link k é interrompido;

x_{ij} = demanda entre os pares de nós i e j ;

$c_{ij}^{(k)}$ = custo (ou tempo) de viagem entre os pares i e j , quando o link k é interrompido.

Jenelius *et al.* (2006) optam, então, por tratar em separado dois conjuntos de links: o primeiro conjunto (C_1) composto por links que, se interrompidos, não desconectam a rede; e o segundo conjunto (C_2) com os demais links. Dentro dessa abordagem, propõem formulações independentes para cálculo do II para cada um dos conjuntos. Assim, embora discutam o problema da desconexão da rede, não apresentam uma solução para a obtenção de um índice único aplicável aos dois conjuntos de links. Dessa forma, o II na formulação para C_1 tem valor infinito para todos os links pertencentes a

C_2 e, na formulação para C_2 , tem valor zero para todos os links pertencentes a C_1 , como pode ser visto nas Equações 4.5 e 4.6.

$$II_{C_1}(k) = \frac{\sum_i \sum_{j \neq i} w_{ij} (c_{ij}^{(k)} - c_{ij}^{(0)})}{\sum_i \sum_{j \neq i} w_{ij}}, k \in C_1. \quad (4.5)$$

Para $k \in C_2$, $II_{C_1}(k) = \infty$.

Onde:

$II_{C_1}(k)$ = Índice de Importância para o link k voltado para o conjunto C_1 ;

w_{ij} = peso para o par de nós i e j , normalmente a demanda por viagens;

$c_{ij}^{(k)}$ = custo (ou tempo) de viagem entre i e j , quando o link k está interrompido;

$c_{ij}^{(0)}$ = custo (ou tempo) de viagem entre i e j , com a rede íntegra.

$$II_{C_2}(k) = \frac{\sum_i \sum_{j \neq i} u_{ij}^{(k)}}{\sum_i \sum_{j \neq i} x_{ij}}, k \in C_2. \quad (4.6)$$

Para $k \in C_1$, $II_{C_2}(k) = 0$.

Onde:

$II_{C_2}(k)$ = Índice de importância para o link k voltado para o conjunto C_2 ;

$u_{ij}^{(k)}$ = demanda insatisfeita para os pares de nós i e j , quando o link k é interrompido;

x_{ij} = demanda entre os pares de nós i e j .

Pode-se observar que o II para o conjunto C_1 é semelhante ao NRI, uma vez que avalia a importância de um link de acordo com a diferença de custos (ou tempos) de viagens totais na rede entre as situações antes e depois da interrupção do link sob análise. Como diferença numérica principal tem-se o fato de o II ser normalizado pela demanda total de viagens na rede. Portanto, não há, de fato, maior relevância que justifique o esforço de incluí-lo como indicador adicional a ser considerado na aplicação da estrutura metodológica proposta.

Sendo o NRI-m indicador baseado em redução da capacidade do link sob análise, ao invés de sua completa interrupção, a vulnerabilidade pode ser então quantificada mesmo para links que, se eliminados, provocariam a desconexão, ou subdivisão da rede. Sullivan *et al.* (2010) investigaram ainda qual seria a intensidade de redução da capacidade mais recomendável para a avaliação da vulnerabilidade. Consideram que a

redução mais recomendável seria aquela que apresentasse resultados mais consistentes, no sentido de que a hierarquia dos links fosse menos modificada em função de pequenas variações do percentual de redução da capacidade. Chegamos à conclusão que a redução utilizada para o cálculo do indicador deve ser tão maior quanto maior for a conectividade da rede. Considerando-se o índice gama, proposto por Kansky (1963 *apud* Ducruet e Lugo, 2013) como medida de conectividade (Equação 4.7). Sullivan *et al.* (2010) fizeram experimentos com três redes artificiais (Redes 1, 2 e 3) e uma real (Rede 4) de diferentes conectividades e chegaram às faixas de redução recomendadas apresentadas no Quadro 4.4. Percebe-se que para redes muito conectadas a redução recomendada se aproxima de 100%; e que para redes mais esparsas a redução deveria ser menor, porém ainda significativa. Não há, no entanto, uma recomendação formal de uma redução de capacidade padrão e sim diretrizes gerais para reduções entre 99 e 75%, em função da conectividade da rede.

$$\Gamma = \frac{l}{3(n-2)} \quad (4.7)$$

Onde:

Γ = índice gama;

l = número de links;

n = número de nós.

Quadro 4.4 – Redução de capacidade recomendada para determinação do NRI-m.

Rede	Nós	Links	Gama	Redução de Capacidade para NRI-m
1	37	84	0,80	99-95%
2	37	74	0,70	95-90%
3	37	58	0,55	80-75%
4	1367	1791	0,44	80-75%

Fonte: Sullivan *et al.* (2010)

Do ponto de vista do tratamento do indicador às situações de desconexão da rede, o indicador mais completo seria, pelo exposto, o NRI-m, uma vez que é calculado por uma redução na capacidade em lugar da interrupção completa de um link. Este é, portanto, um argumento adicional para sua seleção para a aplicação da estrutura metodológica proposta. Dessa forma é confirmada a seleção dos indicadores NRI-m (Sullivan *et al.*, 2010) e NRI (Scott *et al.*, 2006) para essa finalidade.

O procedimento geral para a determinação de indicadores de vulnerabilidade é apresentado na Figura 4.4. A determinação dos indicadores de vulnerabilidade exige tantos processos de alocação de viagens quanto forem os links a analisar, uma vez que os indicadores de vulnerabilidade selecionados são determinados com base em diferenças de desempenho entre cenários íntegros e cenários em que um determinado link é impactado.

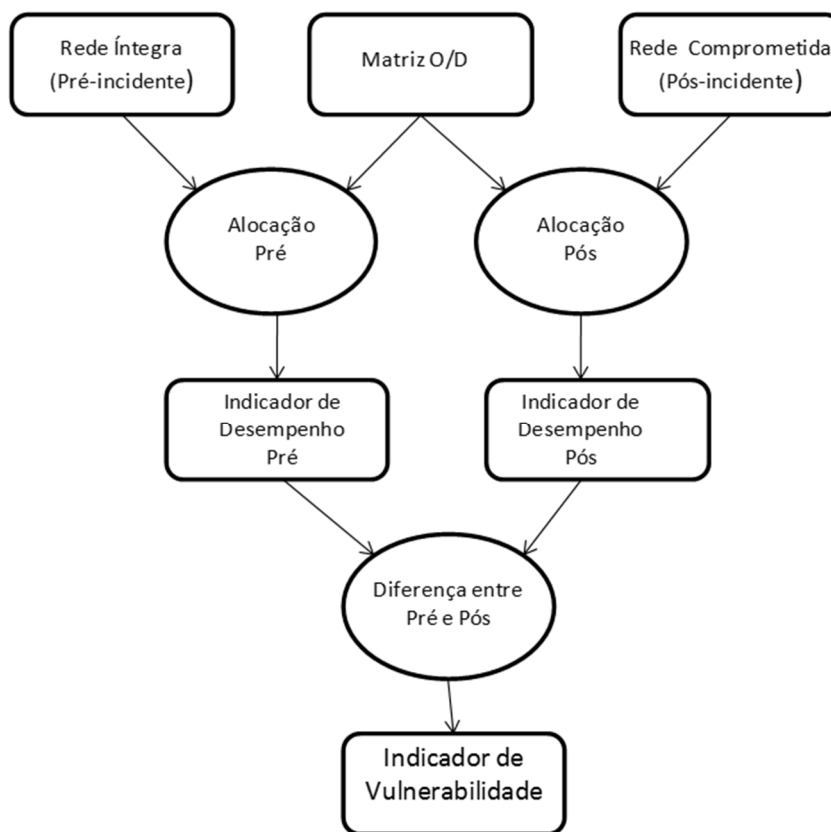


Figura 4.4 – Procedimento geral para a obtenção de indicadores de vulnerabilidade.

É considerada, na presente estrutura metodológica, a impactação de um link por vez, caso considerado como mais comum, e que permite a determinação de um indicador de vulnerabilidade para cada link. Naturalmente, é possível que um evento particularmente severo, como um terremoto, ou inundação, venha a afetar diversos links próximos simultaneamente. A ocorrência de tempestades, comuns no verão do Rio de Janeiro, por exemplo, também frequentemente provoca a interrupção de vários links simultaneamente, não só próximos uns dos outros como também distantes, provocando impactos disseminados por toda a rede viária. No caso de análise da vulnerabilidade de grupos de links, ou regiões de uma rede, no entanto, não seria possível o estabelecimento de um indicador de vulnerabilidade por link, e, conseqüentemente, a

hierarquia não poderia ser estabelecida por link, e sim por regiões ou grupos de links, o que foge ao objetivo da presente pesquisa.

Segundo Jenelius (2009), os usuários podem responder às interrupções ou redução de capacidade nos links de suas rotas preferidas pela utilização de rotas alternativas ou mesmo pelo adiamento da realização de viagens para um momento mais propício. É possível ainda que haja transferência para modos menos afetados pelo evento ou mesmo que parte das viagens deixe de ser realizada. Nos procedimentos adotados para a estrutura metodológica proposta, assume-se que a demanda é inelástica, o que leva a uma possível superestimação das diferenças de tempo ou custo estimadas. Isso se deve ao fato de que, para os usuários que desistem de realizar uma viagem, implicitamente o custo do atraso (ou desutilidade) é percebido como maior do que o custo da não realização da mesma.

4.3 Etapa 2 – Determinação das hierarquias dos links por atributo e respectivos indicadores

Para a determinação das hierarquias dos links da rede viária referentes aos atributos Congestionamento e Confiabilidade o procedimento é direto. Após a alocação da matriz de viagens à rede de simulação, são extraídas as informações necessárias de forma a que possam ser determinados os indicadores selecionados, no caso específico, o V/C, o CI e o ICE. Essa determinação pode ser realizada com facilidade para todos os links da rede, ainda que se trate de uma rede complexa, uma vez que um único processo de alocação é suficiente. As hierarquias obtidas a partir de cada indicador são produzidas pela ordenação dos links da rede segundo os valores obtidos, consistindo, portanto, em uma lista ordenada de todos os links da rede viária objeto de simulação.

A hierarquia derivada de indicadores de vulnerabilidade apresenta, no entanto, maiores dificuldades para sua obtenção. De fato, a exigência, pelos procedimentos levantados, de um processo de alocação para cada link para o qual se deseja a determinação da vulnerabilidade dificulta a aplicação sistemática desses procedimentos e a produção de uma hierarquia completa para uma rede complexa. É possível que essa dificuldade seja responsável pela pouca disseminação de estudos que levem à hierarquia de links segundo sua importância para a vulnerabilidade. Torna-se, portanto, necessário o tratamento dessa dificuldade de forma a que a estrutura metodológica possa efetivamente ser aplicada. Como a maior utilidade da obtenção de hierarquias, do ponto de vista da gestão de uma rede viária, é a identificação de links críticos para o desempenho, um conjunto que compreenda todos os links da rede não é indispensável.

É importante, no entanto, que os links mais relevantes para o desempenho sejam identificados e hierarquizados. O item seguinte endereça o problema e propõe um procedimento para o seu tratamento.

4.3.1 Determinação das hierarquias derivadas dos atributos Congestionamento e Confiabilidade

No que diz respeito aos indicadores de congestionamento, particularmente aqueles selecionados para a aplicação na presente pesquisa, não há maior dificuldade na identificação e ordenação dos links mais críticos. De fato, a relação V/C depende da estimativa do fluxo e da capacidade de cada um dos links da rede sob análise. A determinação da capacidade, seguindo os preceitos do *Highway Capacity Manual* (TRB, 2010), envolve diversas variáveis, como a composição do tráfego, largura e número de faixas de rolamento, resistências laterais, entre outras. Essa exigência pode tornar inexequível a determinação da capacidade para cada link de uma rede complexa tendo em vista os levantamentos necessários. No entanto, é possível uma estimativa razoável da capacidade com base no número de faixas, velocidade em fluxo livre e velocidade limite das vias, o que pode ser feito de forma sistemática e, de fato, é procedimento frequentemente realizado quando se deseja modelar uma rede viária complexa para utilização em planejamento de transportes. Na rede do PDTU (2005) analisada, por exemplo, percebe-se que a velocidade em fluxo livre e capacidade por faixa foram padronizadas com base em uma classificação funcional da rede viária. A partir do número de faixas (levantado diretamente) e da capacidade por faixa estimada de forma padronizada, obteve-se, para cada link da rede, a capacidade viária considerada nas simulações. Admitindo-se como aceitável a estimativa da capacidade com base nas variáveis mais significativas e disponíveis, resta a estimativa do fluxo de veículos. Para essa estimativa o procedimento mais usual é a utilização de modelos de planejamento de transporte, como o de quatro etapas, alocando uma matriz de viagens à rede. Dessa forma, uma vez estimados volume (fluxo) e capacidade para cada link que compõe a rede, é possível a determinação do indicador V/C também para cada um deles.

Para a determinação do Indicador CI também não há maior dificuldade, assumidas as mesmas premissas aceitas para a determinação de V/C. O CI é determinado pela razão entre o tempo sob congestionamento e o tempo em fluxo livre. O tempo sob congestionamento, ou o tempo estimado em função do fluxo de veículos e da capacidade em cada link é uma saída direta da maioria dos softwares de planejamento de transporte após a etapa de alocação de tráfego. O tempo em fluxo livre é uma função da velocidade em fluxo livre, admitida como conhecida para cada link. A velocidade em

fluxo livre pode ser obtida a partir de pesquisas diretas de velocidade ou em estimativas baseadas nos limites regulamentares de velocidade e na classificação funcional de cada via (como no caso da rede do PDTU 2005). Dessa forma, é possível a determinação do indicador CI para cada link em uma rede, independentemente de sua complexidade, aceitando-se como válida a modelagem da rede viária e os métodos de alocação considerados.

Observa-se, assim, que a determinação dos indicadores de congestionamento V/C e CI pode ser realizada de forma direta após a etapa de alocação de viagens a uma rede, independentemente de sua complexidade, não sendo necessária uma pré-seleção de links.

Como no caso dos indicadores de congestionamento, o indicador de confiabilidade ICE também pode ser determinado de forma direta, para todos os links de uma rede complexa, a partir dos resultados de uma alocação de viagens a um modelo de rede viária.

Assim, para os atributos Congestionamento e Confiabilidade, a determinação dos indicadores pode ser realizada de forma direta, para todos os links, mesmo em uma rede complexa. A hierarquia desejada pode então ser obtida pela simples ordenação dos links de acordo com os valores obtidos para cada um dos indicadores determinados.

4.3.2 Determinação de hierarquias baseadas nos indicadores de vulnerabilidade e procedimento de pré-seleção de links

Na medida em que o objetivo da presente tese é propor uma metodologia que seja aplicável a redes complexas, pressupõe-se que essa metodologia possa ser utilizada em redes com grande número de nós e links. Por grandes números entende-se dezenas de milhares de nós e links, capazes de representar com razoável precisão redes viárias de grandes metrópoles. A determinação dos indicadores de vulnerabilidade, no entanto, não pode ser realizada diretamente após um único processo de alocação. De fato, como discutido anteriormente, a metodologia exige tantos processos de alocação quantos forem os links para os quais se deseja determinar os indicadores. Em uma rede complexa esse é um fator que impacta o custo, o tempo e a praticidade da determinação desses indicadores, o que fere as premissas previamente estabelecidas para a presente pesquisa. Dessa forma, torna-se imperativa a introdução de um procedimento para a pré-seleção de links críticos, ou seja, links com maior potencial para figurar como prioritários em uma hierarquia de links críticos para o desempenho da rede viária.

Tendo em vista que se deseja, além de produzir hierarquias a partir de múltiplos atributos de desempenho, analisar semelhanças e diferenças entre os resultados obtidos a partir de diferentes óticas, é importante que os links pré-selecionados para a determinação dos indicadores de vulnerabilidade conttenham também aqueles já sabidamente críticos para os demais atributos, no presente caso, Congestionamento e Confiabilidade. Naturalmente, sendo a Vulnerabilidade atributo independente, os links mais críticos segundo este atributo poderão não figurar entre aqueles mais críticos quanto aos demais atributos. São, portanto, necessários critérios adicionais, de forma a captar para a seleção aqueles links potencialmente mais críticos quanto à vulnerabilidade e que talvez não o sejam sob a ótica do congestionamento ou da confiabilidade. Esses critérios adicionais dão origem a procedimentos para a determinação de indicadores auxiliares, que possam ser determinados a toda a rede, de forma direta, independentemente da complexidade dessa rede.

A dificuldade em determinar diretamente indicadores de vulnerabilidade é um problema que tem sido enfrentado por outros pesquisadores e uma evidência disso são soluções encontradas na bibliografia, com a utilização de *proxys* para o tratamento de redes complexas, como em von Ferber *et al.* (2012). Nesse caso, por exemplo, foram utilizados indicadores de centralidade *betweenness*. De acordo com o conceito de centralidade *betweenness*, a relativa dependência de um elemento é um aspecto importante de sua posição estrutural e é associado ao número de vezes que este elemento participa quando interações são estabelecidas ao longo de uma rede viária (Gonçalves *et al.*, 2009). Sendo o link esse elemento, aqueles que pertencem a um grande número de rotas entre nós, centroides⁶ em particular, tenderiam a ser mais críticos para o desempenho da rede. Cats e Jenelius (2014) confirmam que a habilidade de uma rede de transportes desempenhar bem, apesar de eventuais degradações, tem conexão clara com a estrutura da rede. Assim, links de maior centralidade *betweenness* são frequentemente críticos para a degradação da rede, ou seja, para a sua vulnerabilidade. Nesse sentido, a pesquisa de von Ferber *et al.* (2012) mostra que o indicador *Betweenness Centrality* (BC - baseado no conceito descrito) é um *proxy* melhor para a vulnerabilidade do que outros indicadores como, por exemplo, o grau de um link, oriundo da teoria dos grafos. De fato, naquela pesquisa, avalia-se a vulnerabilidade da rede de transporte público de Londres e Paris, utilizando o indicador BC como critério para a seleção das estações mais importantes para a vulnerabilidade da rede. De acordo com o exposto, o indicador BC foi um dos critérios adicionais

⁶ Nós especiais de uma rede viária onde se consideram concentradas as origens e destinos de viagens em uma região.

considerados para a pré-seleção de links para a análise da vulnerabilidade, e sua determinação é realizada através de um procedimento auxiliar descrito mais à frente.

Segundo Von Ferber *et al.* (2012), a centralidade *betweenness* de um determinado nó i pode ser medida a partir da parcela dos caminhos mínimos entre pares dos demais nós da rede que passam por esse nó i . Assim, o indicador BC de um nó i , poderia ser calculado como na Equação 4.8.

$$BC(i) = \sum_{j \neq k \in N} \frac{S_{jk}(i)}{S_{jk}} \quad (4.8)$$

Onde:

$BC(i)$ = indicador de centralidade *betweenness* relativa ao nó i ;

S_{jk} = número de caminhos mínimos entre os demais pares de nós $j, k \in N$;

N = identificador da rede;

$S_{jk}(i)$ = número de caminhos mínimos entre os demais nós e que passam pelo nó i .

Na presente Tese, o conceito de centralidade *betweenness* é aplicado aos links de uma rede, adaptando-se a formulação apresentada na Equação 4.8 da seguinte forma: a) a centralidade *betweenness* se refere ao link genérico e ; b) o cálculo é realizado não entre todos os pares de nós da rede, mas entre todos os pares o, d de centroides da rede, concentradores das origens e destinos das viagens na rede N considerada. A Equação 4.9 reflete a adaptação realizada:

$$BC(e) = \sum_{o \neq d \in N} \frac{S_{od}(e)}{S_{od}} \quad (4.9)$$

Onde:

$BC(e)$ = *Betweenness Centrality* relativa ao link e ;

S_{od} = número de caminhos mínimos entre os pares de centroides o, d da rede N ;

N = identificador da rede;

$S_{od}(e)$ = número de caminhos mínimos entre os pares de centroides o, d que passam pelo link e .

Como pode ser visto, o indicador BC independe da demanda, sendo uma característica da oferta, particularmente da configuração da rede, e pode ser determinado para todos os links de forma simples, mesmo no caso de uma rede complexa. Sua não consideração da demanda, aspecto importante na determinação dos indicadores de

vulnerabilidade, levanta dúvida quanto à sua aplicabilidade isolada como *proxy* de vulnerabilidade em redes viárias complexas urbanas, frequentemente saturadas. Outro aspecto é sua aplicabilidade em redes menos hierarquizadas, e que oferecem mais alternativas ao sistema arterial o que poderia dissociar o indicador de centralidade do de vulnerabilidade.

Assim, apesar do respaldo do indicador BC encontrado na bibliografia, julgou-se importante considerar como critério adicional para a pré-seleção o carregamento de cada link. Esse critério se justifica pelo fato de os indicadores de vulnerabilidade serem fortemente impactados pela demanda. Um link com fluxo elevado provavelmente serve a ligações mais demandadas. Portanto, pré-selecionando-se os links mais carregados da rede, evita-se que um link muito demandado seja eliminado do conjunto de links a serem analisados, tendo em vista sua possível importância para a vulnerabilidade. A consideração do atributo Congestionamento, como critério de pré-seleção, poderia sugerir que os links mais demandados estariam assim implicitamente considerados. No entanto, nem sempre os links mais carregados coincidem com aqueles mais congestionados, uma vez que, se a capacidade for suficiente, não haverá congestionamento.

Em resumo, o procedimento de pré-seleção proposto compõe-se dos seguintes passos, um aprimoramento da versão preliminar testada em Oliveira *et al.* (2016), quando não havia o passo 5 e quando a centralidade (passo 6) era calculada de forma ligeiramente diferente⁷.

- 1) Delimitação de uma sub-rede foco da análise detalhada (opcional);
- 2) Determinação dos indicadores de congestionamento e confiabilidade para todos os links da rede ou sub-rede delimitada;
- 3) Ordenação de links segundo um indicador de congestionamento;
- 4) Ordenação de links segundo um indicador de confiabilidade;
- 5) Ordenação de links segundo o carregamento observado ou simulado;
- 6) Ordenação de links segundo o indicador *Betweenness Centrality* (BC); e

⁷ Em Oliveira *et al.* (2016), a centralidade foi calculada como o número absoluto dos caminhos mínimos entre centroides servidos por cada link, enquanto que na presente Tese foi utilizada uma proporção entre os caminhos mínimos servidos por cada link e o total de caminhos mínimos, como pode ser visto na Equação 4.9. Este procedimento é mais próximo da definição de Von Erber *et al.* (2012), e, por ser normalizado, permite uma melhor compreensão dos valores encontrados.

- 7) Seleção dos n links mais críticos de cada uma das listas ordenadas, de forma a compor um elenco de links pré-selecionados compatível com os recursos disponíveis.

O primeiro passo é opcional, e ocorre quando há interesse na análise de uma região específica da rede. É importante frisar que os carregamentos e cálculos para a determinação de indicadores devem ser sempre realizados para a totalidade da rede, e não apenas para a sub-rede eventualmente delimitada. Dessa forma, têm-se indicadores representativos da importância de cada link para o desempenho de toda a rede, independentemente de sua complexidade. Apenas a hierarquização será limitada à região focada.

O segundo passo é autoexplicativo. Os passos 3 e 4 garantem que os links mais críticos sob a ótica dos atributos Congestionamento e Confiabilidade pertençam ao conjunto pré-selecionado (os n primeiros, conforme passo 7). Os passos 5 e 6 incorporam os indicadores auxiliares de carregamento e centralidade no processo de pré-seleção, compondo os procedimentos auxiliares mencionados no esquema da estrutura metodológica apresentado na Figura 4.1.

Finalmente, o passo 7 busca nas listas ordenadas resultantes dos passos 3 a 6 os links melhores colocados de forma a compor a pré-seleção de links que terão seus indicadores de vulnerabilidade calculados e serão levados à Etapa 3 da Estrutura Metodológica. Esse número deve ser grande o suficiente para que se corra o menor risco possível de se deixar de selecionar um link crítico para a vulnerabilidade, mas pequeno o suficiente para que possa ser tratado de acordo com os recursos disponíveis, sejam financeiros, computacionais ou de tempo. Na seleção dos n primeiros links de cada hierarquia (listas ordenadas), deve-se usar de julgamento crítico e pode ser evitada a inclusão de links não relevantes, como, por exemplo, links consecutivos em um corredor interceptados por vias exclusivamente locais.

4.3.3 Hierarquias por atributo, para links selecionados.

Pelo processo de pré-seleção descrito anteriormente, acredita-se que o conjunto de links pré-selecionados compreenda os links mais críticos para o desempenho, segundo os três atributos considerados na presente pesquisa. É recomendável, no entanto, um exame crítico, por especialista conhecedor da área de estudo, no sentido de incorporar à seleção final eventuais links julgados de interesse para a composição das hierarquias finais e análise de resultados.

Para a determinação da hierarquia de links mais críticos para o desempenho segundo o atributo vulnerabilidade, é aplicado o procedimento esquematizado na Figura 4.5 para cada um dos links selecionados. Assim, primeiramente, é feita uma alocação à rede íntegra e avaliado o somatório do tempo (ou custo, alternativamente) de todas as viagens na rede. Este é o tempo de referência, e que servirá de base de comparação para a determinação dos indicadores de vulnerabilidade. Em seguida, são feitas tantas simulações quantos forem os links selecionados, em cada uma delas comprometendo um dos links e apurando-se o somatório do tempo (ou custo) de todas as viagens na rede. A diferença entre tempos (ou custos) na rede é a base para cálculo dos indicadores de vulnerabilidade, como visto anteriormente.

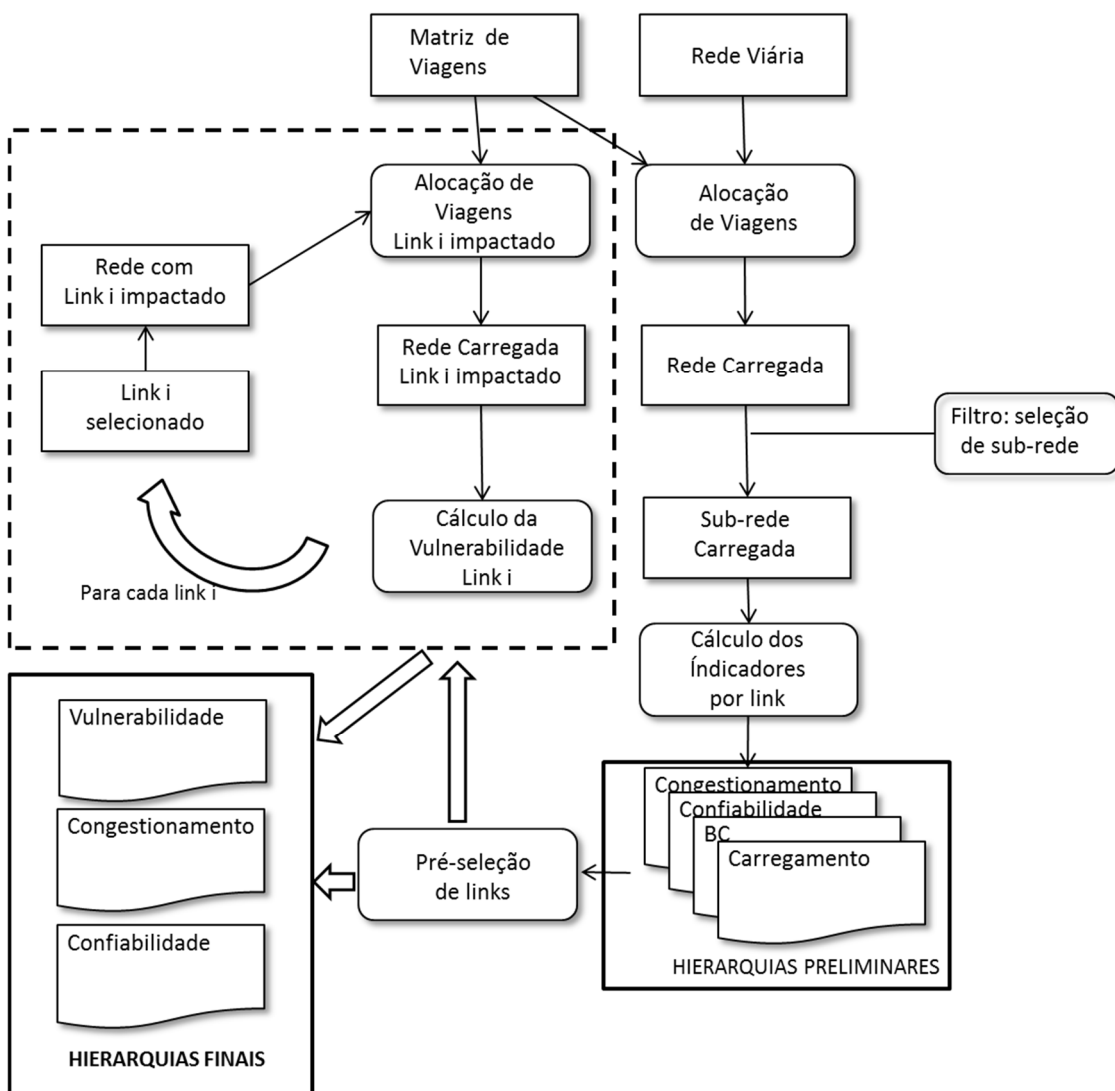


Figura 4.5 – Etapa 2 - Procedimento para a obtenção de indicadores e respectivas hierarquias.

Para o NRI, o comprometimento referido é a desativação ou eliminação do link para o qual se deseja determinar o índice. No caso do NRI-m, não há eliminação total, e sim a

redução da capacidade. Para a escolha da intensidade da redução da capacidade a ser aplicada, recomenda-se seguir o disposto no Quadro 4.4, o que significa apurar primeiramente o índice gama, conforme a Equação 4.7.

Uma vez realizadas as alocações, os indicadores de vulnerabilidade estarão determinados para cada um dos links selecionados. Nesse momento esses links poderão ser ordenados, produzindo-se as hierarquias derivada dos indicadores de vulnerabilidade. Assim, chega-se ao final da Etapa 2, com a produção de hierarquias por atributo, segundo os indicadores considerados, para o conjunto de links selecionados. Espera-se que as hierarquias produzidas por indicadores de um mesmo atributo de desempenho sejam similares, enquanto que hierarquias produzidas por indicadores de diferentes atributos sejam em princípio diferentes.

4.4 Etapa 3 – Análise de resultados

Os resultados obtidos na Etapa 2 devem compor uma tabela, montada de forma a poder ser incorporada a um banco de dados. Essa tabela deve ser composta pelos links selecionados, com, no mínimo, a identificação do link, valores para os indicadores considerados e posições hierárquicas dentro do conjunto selecionado. O Quadro 4.5 apresenta um exemplo parcial, extraído da aplicação descrita nos Capítulos 5 e 6.

Quadro 4.5 – Exemplo de resultados dispostos em uma tabela.

Identificação		Indicadores					Hierarquias				
		Congestionamento		Confiabilidade		Vulnerabilidade	Congestionamento		Confiabilidade		Vulnerabilidade
ID	Logradouro	V/C	CI	ICE	NRI	NRI-m	V/C	CI	ICE	NRI	NRI-m
99372	AUTO EST LAGOA BARRA	0,3020	1,0217	0,0392	67700	5892	84	84	84	36	65
99472	AUTO EST LAGOA BARRA	0,7622	1,5586	0,2162	193874	45389	73	77	81	11	23
99473	AUTO EST LAGOA BARRA	0,7622	1,5580	0,3430	154401	13587	74	78	75	19	45
99693	AV PADRE LEONEL FRANCA	0,9623	3,5957	0,7855	56401	6562	57	55	58	38	62
99793	AV PADRE LEONEL FRANCA	0,8434	2,5658	0,5967	59547	10652	69	66	62	37	50
99800	AV PADRE LEONEL FRANCA	0,7206	1,8332	0,4402	3232	1622	75	74	71	76	76
99802	AV VISC DE ALBUQUERQUE	1,0939	5,3656	1,2894	3443	1093	49	46	41	75	80
99829	AV RODRIGO OTAVIO	1,1793	6,7808	0,9502	84566	46398	34	36	53	29	22
99841	AV PADRE LEONEL FRANCA	0,6190	1,4850	0,3338	1943	1390	80	79	78	79	77
99844	AV BARTOLOMEU MITRE	1,1328	5,8452	1,7678	6173	1390	37	39	23	73	78
99845	R MARIO RIBEIRO	0,6163	1,4574	0,3392	1881	-200	81	80	77	80	83
99850	R MARIO RIBEIRO	0,6133	1,4487	0,3205	1276	754	82	81	79	81	82
99851	R MARIO RIBEIRO	0,6896	1,7119	0,3641	6319	3899	78	76	74	72	68
99853	R JARDIM BOTANICO	1,1567	6,3735	0,7358	84701	56582	35	38	60	28	19
100257	AV BORGES DE MEDEIROS	1,2757	8,4421	1,2718	132713	81079	25	27	43	22	9
100421	AV EPITACIO PESSOA	1,3148	9,5031	2,0667	168357	63826	19	21	14	17	15
100590	AV N SRA DE COPACABANA	0,8060	2,3540	0,4740	22745	8447	70	68	68	60	57
100601	R MIGUEL LEMOS	1,4448	12,5436	3,0944	534	1916	12	14	2	82	74
100639	AV BORGES DE MEDEIROS	1,2842	8,6334	1,3924	139207	80483	23	26	33	21	10

Adicionalmente, a tabela de resultados deve ser associada a modelos de características GIS⁸, compondo um banco de dados georreferenciado.

As análises poderão ter características numéricas ou qualitativas. A abordagem aqui recomendada parte da análise das principais características estatísticas dos resultados obtidos para em seguida realizar análises qualitativas.

4.4.1 Análises numéricas.

Entre as análises numéricas passíveis de serem realizadas podem ser citadas:

- Principais características estatísticas de cada conjunto de indicadores, incluindo a média, desvio padrão e coeficiente de variação;
- Existência ou não de correlação entre indicadores de um mesmo atributo;
- Existência ou não de correlação entre indicadores de diferentes atributos;
- Existência ou não de correlação entre as hierarquias derivadas de indicadores de um mesmo atributo;
- Existência ou não de correlação entre as hierarquias derivadas de indicadores de diferentes atributos.

Cabe aqui ressaltar a que análise de resultados permite verificar a adequabilidade dos indicadores propostos e a coerência dos resultados através da comparação das hierarquias propostas pelos diferentes indicadores.

Espera-se que haja correlação entre os indicadores de um mesmo atributo e que as hierarquias derivadas de indicadores de um mesmo atributo sejam semelhantes. Para a verificação de correlação devem ser utilizados procedimentos estatísticos. Na presente Tese a verificação da correlação é feita através da:

- Determinação do coeficiente de determinação R^2 ;
- Determinação do coeficiente de correlação de Pearson;
- Determinação do coeficiente de correlação de Spearman.

⁸ *Geographic Information System*, conhecido em português pela sigla SIG, ou Sistema de Informações Geográficas. É um sistema que associa um banco de dados a uma base georreferenciada com intenso tratamento gráfico (Oliveira, 2012).

Coeficiente de determinação R^2

O coeficiente de determinação R^2 pode ser definido como a proporção da variância explicada pelo modelo de regressão, o que o torna um indicador de medida de sucesso para a predição de uma variável dependente a partir de variáveis independentes (Nagelkerke, 1991). Quanto mais próximo de 1 for o valor obtido para R^2 , melhor a variável dependente é explicada pelas variáveis independentes. Pode ser calculado pela Equação 4.10:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (4.10)$$

Onde:

R^2 = coeficiente de determinação;

y_i = valor observado;

\bar{y} = média das observações;

\hat{y}_i = valor estimado de y_i .

Para o teste de significância⁹ do coeficiente R^2 encontrado, é utilizada a Estatística F de Snedecor. A Estatística F ou Teste F é um teste de significância baseado na razão entre a variância explicada e a variância não explicada pelo modelo de regressão. (Neto, 2015). Quanto maior for o valor de F maior a probabilidade de que haja uma correlação linear. Na presente aplicação, é calculado pela Equação 4.11, para o caso de regressão linear simples (uma variável independente).

$$F_{1,N-2} = \frac{R^2(N-2)}{1-R^2} \quad (4.11)$$

Onde:

$F_{1,N-2}$ = Estatística F para uma variável independente e $N-2$ graus de liberdade;

R^2 = coeficiente de determinação;

N = Número de observações;

Uma vez observado o valor da estatística $F_{1,N-2}$, este deverá ser comparado a um valor F crítico (F_c), usando-se como parâmetros o nível de significância desejado (n.s. ou α), o número de graus da parcela explicada (no caso 1) atribuída às variáveis

⁹ Para o conceito de significância estatística, ver Roque (2015).

independentes e o número de graus de liberdade ($N - 2$). O F_c pode ser obtido em uma tabela da distribuição F ou pela função equivalente disponível em software estatístico e que está disponível também no software Excel da Microsoft (INV.F).

Se $F_{1, N-2} > F_c$ pode-se considerar que haja significância estatística, dentro do n.s. pretendido para a correlação.

Coeficiente de Correlação de Pearson ou Coeficiente de Correlação Produto-Momento

Segundo Puth *et al.* (2014), o Coeficiente de Correlação de Pearson é uma das medidas mais utilizadas para a verificação da correlação linear entre duas variáveis. Pode ser calculado pela Equação 4.12:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n \{(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})\}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (4.12)$$

Onde:

r = Coeficiente de Correlação de Pearson;

x_i = valor observado do conjunto de valores x cuja correlação com o conjunto de valores y será investigada;

\bar{x} = média dos valores observados do conjunto de valores x ;

y_i = valor observado do conjunto de valores y cuja correlação com o conjunto de valores x será investigada;

\bar{y} = média dos valores observados do conjunto de valores y .

O Coeficiente de Correlação de Pearson (r) terá sempre valores entre -1 e 1. Se $r = 0$, então não há correlação linear entre as variáveis testadas. É importante notar que pode existir uma relação não linear entre as variáveis mesmo que $r = 0$, desde que não haja componente linear consistente naquela relação. Se $r = 1$, então há uma perfeita correlação linear entre as variáveis e a representação gráfica da relação será uma reta perfeita com inclinação positiva. Se $r = -1$, há igualmente uma correlação linear perfeita, mas a reta representativa terá inclinação negativa. Se o valor absoluto de r estiver entre 0 e 1, então há correlação tão mais significativa quanto mais o valor de r se aproximar de 1 (Puth *et al.*, 2014).

Para o teste de significância de r , Puth *et al.* (2014) recomendam a utilização do Teste t de Student, que pode ser calculado pela Equação 4.13.

$$t = \frac{r\sqrt{N-2}}{\sqrt{1-r^2}} \quad (4.13)$$

Onde:

t = Estatística t de Student;

r = Coeficiente de Correlação de Pearson;

N = Número de observações.

Calculado t , este deverá ser comparado a um valor t crítico (t_c), usando-se como parâmetros o nível de significância desejado (n.s. ou α) e o número de graus de liberdade ($N - 2$). O valor t_c pode ser obtido em uma tabela da distribuição t de Student ou pela função equivalente disponível em software estatístico e que está disponível também no software Excel da Microsoft (INV.T.BC).

Se $t > t_c$ ou $t < -t_c$ pode-se considerar que haja significância estatística, dentro do n.s. pretendido para a correlação.

É importante notar que o Coeficiente de Correlação de Pearson não indica uma relação de causa e efeito, e os conjuntos de variáveis x e y testados podem ser invertidos sem que r seja alterado. Não há, portanto, variáveis dependentes e independentes. As unidades de medida utilizadas também não têm efeito sobre r (Puth *et al.*, 2014; Figueiredo Filho e Silva Junior, 2009).

Coeficiente de Correlação de Postos de Spearman

Segundo Puth *et al.* (2015), o Coeficiente de Correlação de Postos de Spearman (r_s) é equivalente ao Coeficiente de Correlação de Pearson, aplicado às posições em uma lista ordenada (postos) ao invés de aos dados propriamente ditos. Pode ser calculado pela Equação 4.14:

$$r_s = \frac{\sum_{i=1}^n \{(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})\}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (4.14)$$

Onde:

r_s = Coeficiente de Correlação de Postos de Spearman;

x_i = posição (posto) do elemento i na lista ordenada do conjunto de valores x cuja correlação com o conjunto de valores y será investigada;

\bar{x} = média dos postos de $x = (n+1)/2$;

y_i = posição (posto) do elemento i na lista ordenada do conjunto de valores y cuja correlação com o conjunto de valores x será investigada;

\bar{y} = média dos postos de $y = (n+1)/2$.

Obs: para o caso de empates na lista ordenada, os postos devem ser considerados como a média de suas posições na lista ordenada.

O Coeficiente de Correlação de Postos de Spearman não pressupõe uma relação linear entre os valores obtidos a partir das observações, como no caso de Pearson, e não é afetado por *outliers*, uma vez que os valores absolutos não são considerados em sua determinação, e sim seu posto na lista ordenada. É, portanto, um coeficiente de correlação indicado para verificar se há uma correlação monotônica entre as variáveis analisadas, aplicável, portanto, a hierarquias e listas ordenadas. (Puth *et al.*, 2015). Da mesma forma que no caso de Pearson, os valores possíveis para r_s estão entre -1 e 1. Quanto mais o valor absoluto do coeficiente se aproximar de 1, melhor é a correlação; quanto mais o valor absoluto se aproximar de 0 menor a correlação observada. Valores positivos indicam uma correlação positiva enquanto que valores negativos indicam uma correlação negativa.

Para o teste de significância de r_s igualmente recomenda-se a realização do teste t de Student, descrito anteriormente (Roque, 2015).

Ainda segundo Puth *et al.* (2015), os coeficientes de Pearson e Spearman, embora calculados de forma similar, medem diferentes tipos de associação, e a utilização de cada um deles deve ser decidida de acordo com o tipo de análise desejada. Na presente Tese, Pearson é utilizado para a análise da correlação entre os valores encontrados para os indicadores, enquanto que Spearman é utilizado para a investigação de correlação entre as hierarquias obtidas para os mesmos indicadores.

A interpretação dos coeficientes obtidos

Mukaka (2012) propõe uma escala para avaliação, baseada em Hinkle *et al.* (2003, *apud* Mukaka, 2012), aplicável tanto ao coeficiente Pearson quanto ao de Spearman, e que é apresentada no Quadro 4.6. É importante ressaltar que não foi encontrado consenso na bibliografia quanto à escala mais apropriada para essa análise, com os valores de corte entre as classes variando conforme o autor.

Quadro 4.6 – Escala simplificada para interpretação dos coeficientes de correlação de Pearson e Spearman.

Coeficiente (em valor absoluto)	Interpretação
0,90 a 1,00	Correlação muito alta
0,70 a 0,90	Correlação alta
0,50 – 0,70	Correlação moderada
0,30 – 0,50	Correlação baixa
0,00 – 0,30	Correlação desprezível

Fonte: Hinkle *et al.* (2003 *apud* Mukaka, 2012)

Além de Pearson e Spearman, propõe-se o cálculo do coeficiente de determinação R^2 , para pares de indicadores, de forma a verificar a possibilidade de predição de um em função do outro, e, assim, poder medir o ajuste da curva que melhor explica a relação entre eles. Naturalmente um elevado R^2 é também um indicador que sugere a dependência de uma variável em relação à outra e a correlação entre elas.

4.4.2 Análises qualitativas

Entre as análises qualitativas, podem ser citadas:

- Características gerais dos links mais críticos segundo cada atributo;
- Análise da localização dos links mais críticos, no que diz respeito à sua função na rede (arterial, coletora, local, acesso);
- Análise de localização de links mais críticos de acordo com a topologia da região da rede (mais conectada, menos conectada).

Pelas características do atributo que representam, os indicadores de Vulnerabilidade devem evidenciar links de importância estratégica para o desempenho e que, não necessariamente, apresentam congestionamento. De fato, espera-se que os links mais críticos quanto à vulnerabilidade façam parte de corredores arteriais e que tenham poucas rotas alternativas concorrentes ou que as impedâncias dessas rotas alternativas sejam significativamente mais elevadas. Assim, túneis, pontes, viadutos e vias expressas são candidatos em potencial para figurar entre a relação de links mais importantes no que se refere à vulnerabilidade.

Os links mais críticos quanto ao Congestionamento e Confiabilidade são mais facilmente identificáveis no dia-a-dia, tendo em vista se caracterizarem por congestionamento diários. Normalmente são gargalos em corredores arteriais, onde há uma redução local

na capacidade da via, problemas de ordenação do tráfego, ou concentração de rotas mais demandadas.

Naturalmente as possibilidades de análise são inúmeras, tanto numéricas quanto qualitativas, e esta Tese não pretende esgotar essas possibilidades, ou mesmo propor um roteiro rígido para a análise das hierarquias obtidas a partir da estrutura metodológica proposta.

4.5 Síntese

O presente Capítulo propõe uma Estrutura Metodológica para a consideração dos atributos de desempenho Congestionamento, Confiabilidade e Vulnerabilidade. Essa estrutura sugere procedimentos tais que, mesmo em uma rede viária complexa, seja possível a hierarquização de seus links de acordo com sua importância para o desempenho, sob diferentes óticas.

A estrutura foi organizada em três etapas. A Etapa 1 trata da seleção de indicadores e de procedimentos para sua determinação. São propostos dois indicadores específicos para os atributos Congestionamento e Vulnerabilidade, de forma a que possam ser feitas comparações não só quanto aos resultados obtidos para diferentes atributos, mas também quanto aos resultados obtidos por diferentes indicadores de um mesmo atributo. Verificou-se nessa fase que, para o atributo Confiabilidade, apenas um indicador atende aos requisitos de praticidade e, portanto, não foi selecionado um segundo indicador.

A Etapa 2 consiste, efetivamente, na produção das hierarquias segundo cada um dos indicadores selecionados. Identificada a impossibilidade prática de se calcular indicadores de vulnerabilidade para todos os links de uma rede complexa, tornou-se necessário um passo extra, a pré-seleção de links para cálculo dos indicadores de vulnerabilidade e para a análise comparativa final. Essa pré-seleção é composta por um conjunto dimensionado de forma a ser compatível com os recursos disponíveis. Procedimentos auxiliares para a determinação de indicadores auxiliares adicionais (Carregamento e *Betweenness Centrality* - BC) foram então propostos de forma a que se obtivesse um elenco de links selecionados composto dos links mais críticos para o desempenho da rede viário sob a ótica dos atributos de Congestionamento, Confiabilidade e Vulnerabilidade.

Finalmente, a Etapa 3 consiste na análise dos resultados obtidos, que devem ser feitos tanto de forma numérica quanto de forma qualitativa. Foram propostos coeficientes (R^2 ,

Pearson e Spearman) para a verificação da existência de correlação entre os resultados obtidos para os diferentes indicadores, de tal forma que sejam identificadas possíveis relações entre os indicadores e os atributos por eles representados.

Os capítulos 5 e 6, a seguir, apresentam uma aplicação teste para a estrutura metodológica aqui proposta, sobre uma rede viária complexa. Os resultados e análises ali realizadas mostram a factibilidade da estrutura proposta, sua praticidade e utilidade como ferramenta adicional de planejamento e de tomada de decisões quanto a prioridades em um sistema de transportes, particularmente no que se refere à rede viária na qual está inserido.

5. APLICAÇÃO DA ESTRUTURA METODOLÓGICA

5.1 Considerações iniciais

Como visto anteriormente, a Estrutura Metodológica tem três etapas distintas. A Etapa 1 trata da seleção de indicadores e do desenvolvimento de procedimentos por indicador. A Etapa 2 consiste na aplicação desses procedimentos e na produção de hierarquias por indicador e atributo, além de um banco de dados de resultados, a serem tratados e analisados na Etapa 3.

Ao longo do Capítulo 4 foi realizada uma seleção de indicadores para cada um dos três atributos de desempenho de interesse, considerados adequados para a utilização em uma rede complexa. A justificativa da escolha e os procedimentos para o cálculo de cada indicador foram também apresentados na ocasião. Dessa forma, a aplicação da Etapa 1 só seria necessária caso se desejasse modificar os indicadores selecionados ou seus procedimentos. Para a presente aplicação, no entanto, serão utilizados os indicadores e procedimentos descritos anteriormente, podendo-se seguir diretamente para a Etapa 2.

Assim, o presente Capítulo trata da Etapa 2, que é o cerne da aplicação da Estrutura Metodológica, com a Etapa 3, análise de resultados, tratada no Capítulo 6.

A Figura 5.1 apresenta a Etapa 2 destacada no esquema geral da Estrutura Metodológica. Percebe-se, pelo esquema apresentado, que a Etapa 2 produz hierarquias e o banco de dados a elas associado, a serem analisados na Etapa 3. Percebe-se ainda que para a produção de hierarquias derivadas de indicadores de vulnerabilidade é necessário um processo intermediário de pré-seleção de links, que tem como entrada os resultados das hierarquias produzidas para os indicadores dos atributos Congestionamento e Confiabilidade, além daquelas produzidas para os indicadores auxiliares BC e Carregamento.

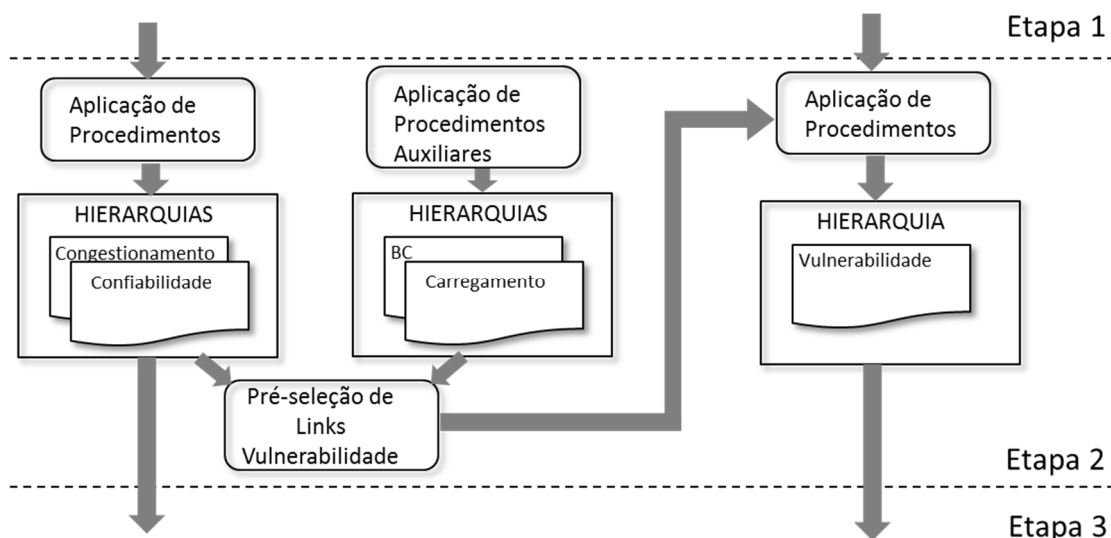


Figura 5.1 – Estrutura metodológica – Etapa 2.

5.2 A rede para a aplicação

O propósito aqui é garantir que a Estrutura Metodológica proposta possa ser aplicada a qualquer rede viária, independentemente de sua complexidade. Assim foi selecionada para a aplicação teste rede representativa da Região Metropolitana do Rio de Janeiro (RMRJ)¹⁰, utilizada no PDTU 2005 (PDTU, 2005a), com cerca de 22.000 nós e 60.000 links, configurando, portanto, uma rede complexa. Os dados referentes ao PDTU foram obtidos sob a forma de um conjunto de arquivos no padrão do *software* TransCAD (Caliper Corporation), representativos da rede de simulação e de matrizes de viagem para diversos horizontes de simulação. A descrição dos campos de interesse do arquivo de rede é apresentada no Quadro 5.1.

A documentação disponibilizada referente aos arquivos do PDTU 2005 é incompleta, mas, pela análise das informações contidas no banco de dados associado à rede, foi possível inferir o significado dos campos de interesse e, em alguns casos, premissas consideradas para os valores encontrados. Percebe-se, por exemplo, que a classificação funcional da rede viária foi a base para a determinação de valores padronizados para a velocidade em fluxo livre (campo *Velocidade*) e para os campos referentes à capacidade teórica por faixa de cada link (*CapTeo_AB* e *CapTeo_BA*). Os valores relativos à capacidade de cada link (*Cap_via_AB* e *Cap_via_BA*) foram obtidos pelo produto da capacidade teórica por faixa pelo número de faixas (*NFAIXAS_AB* e

¹⁰ Segundo as Nações Unidas (2014), a RMRJ é uma das 20 metrópoles mais populosas do mundo.

NFAIXAS_BA). O Quadro 5.2 apresenta os valores padronizados adotados, tal como inferidos.

Quadro 5.1 – Descrição dos campos de interesse da tabela representativa da rede do PDTU 2005

Campo	Descrição
ID	Código de identificação do TransCAD
Length	Extensão [km]
Dir	Código de direção do TransCAD
Nome	Nome do Logradouro
Modo	Modo de transporte
Hierarquia	Classificação funcional das vias
Velocidade	Velocidade em fluxo livre [km/h]
Sel_Redde_1	Se = 1: <i>link</i> pertence à rede viária individual, fora do pico da manhã
Sel_Redde_PM	Se = 1: <i>link</i> pertence à rede viária individual no pico da manhã
Sel_Acesso_TC	Se = 1: <i>link</i> de acesso a transporte coletivo
CapTeo_AB e Cap Teo BA	Capacidade teórica simplificada, por sentido, em função de características da via [UCP/h]
Cap_via_AB e Cap via BA	Capacidade considerada na simulação, por sentido [UCP/h]
Tempo livre	Tempo em fluxo livre para automóveis [minutos]
TApe_AB e TApe_BA	Tempo a pé, por sentido, para <i>links</i> de acesso [minutos]
NFAIXAS_AB e NFAIXA BA	Número de faixas de tráfego, por sentido
ALPHA	Parâmetro alfa para o processo de alocação por equilíbrio
BETA	Parâmetro beta para o processo de alocação por equilíbrio

Fonte: Oliveira, 2012

Quadro 5.2 – Capacidades e velocidades consideradas no PDTU 2005.

Classe	Descrição	Velocidade	Cap Teórica por faixa
E	Expressa	80	2000
AP	Arterial Primária	60	810
AS	Arterial Secundária	50	675
C	Coletora	30	610
L	Local	20	540

Exceções foram encontradas, como, por exemplo, em algumas vias arteriais de características menos urbanas onde a velocidade e capacidade foram consideradas equivalentes àquelas adotadas para as vias expressas. Para outras exceções pontuais (poucas ocorrências) encontradas em relação aos padrões apresentados na tabela não foram encontradas justificativas evidentes, podendo se tratar de casos particulares tratados de forma individualizada ou mesmo erros de codificação não detectados por ocasião do desenvolvimento do PDTU. É importante ainda ressaltar que a rede utilizada na presente pesquisa foi trabalhada e modificada em outros estudos posteriores ao PDTU e, portanto, não é uma imagem exata daquela utilizada no PDTU. Sendo o propósito da presente aplicação verificar a aplicabilidade da estrutura proposta a uma rede complexa, eventuais imprecisões nos dados não impactam nas conclusões da pesquisa e, portanto, não foram realizados esforços no sentido de modificar ou corrigir os dados obtidos, aceitos como corretos.

Muito embora todos os processos que envolvam o cálculo de indicadores de desempenho levem em consideração a totalidade da rede da RMRJ, de forma a que os resultados possam ser melhor compreendidos e analisados, foi selecionada uma sub-rede como foco para o presente estudo, à semelhança do realizado em Oliveira (2012) e Oliveira *et al.* (2013, 2014a, 2014b e 2016). Essa sub-rede é composta pelos bairros: Leme, Copacabana, Ipanema, Leblon, Gávea, Jardim Botânico, Humaitá e parte de Botafogo, e é composta de 1266 vias (entre unidirecionais e bidirecionais). A Figura 5.2 apresenta a representação gráfica da rede da RMRJ em sua totalidade, com o posicionamento da sub-rede de estudo demarcado. A Figura 5.3 apresenta a sub-rede de estudo, e que será analisada em maior detalhe.

Cada ponto numerado da Figura 5.3 representa um centroide das Zonas de Tráfego situadas na sub-rede de estudo, e sua localização aproximada é descrita no Quadro 5.3.

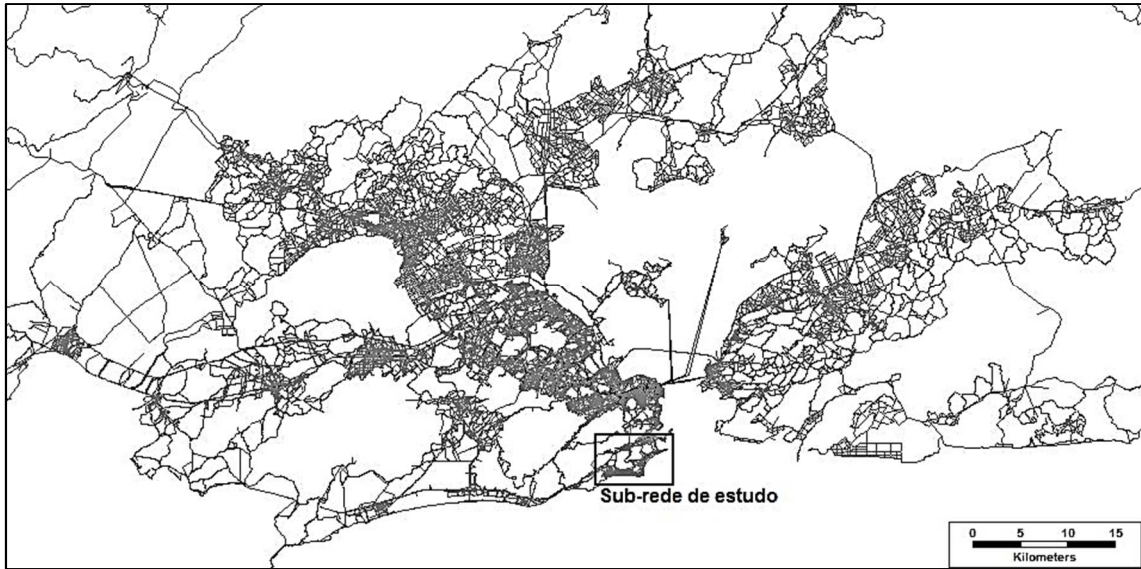


Figura 5.2 – Posicionamento da sub-rede de estudo na rede da RMRJ.

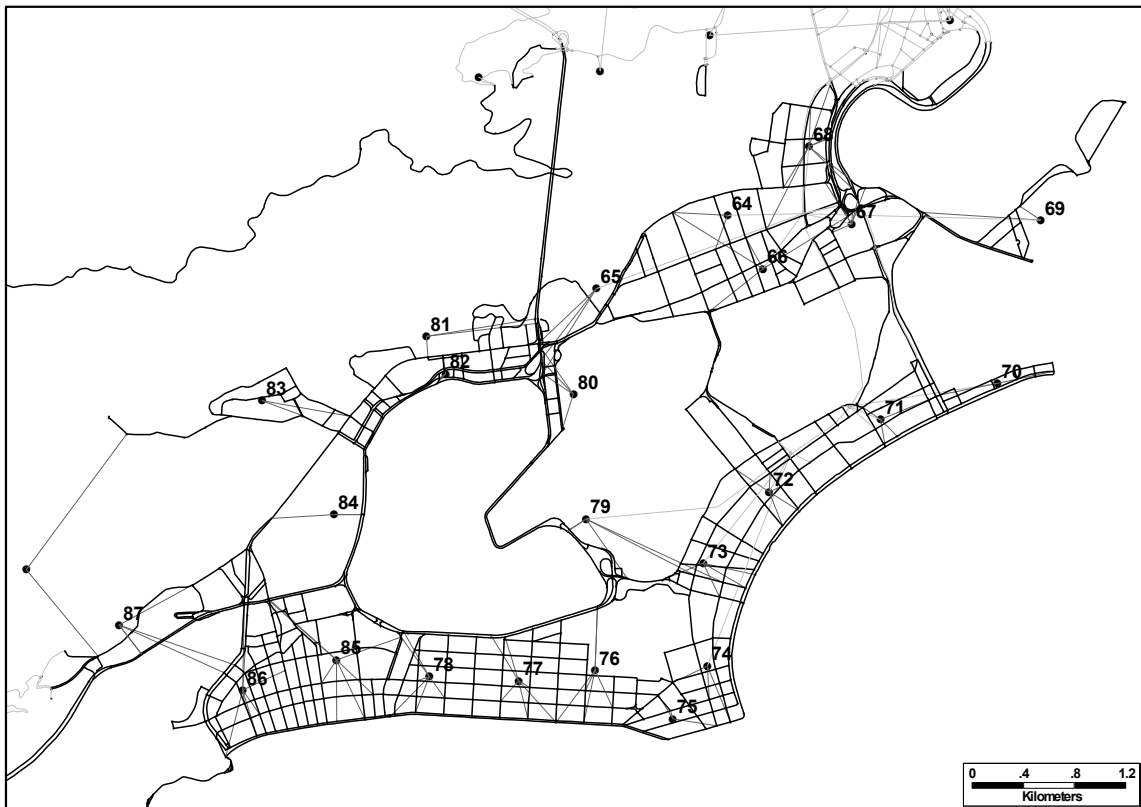


Figura 5.3 – Sub-rede de estudo e posicionamento dos centroides.

Quadro 5.3 – Zonas de Tráfego na sub-rede de estudo.

Zona de Tráfego	Localização (Principais Conexões)
64	Botafogo (Sorocaba / V. da Pátria / S. Clemente)
65	Humaitá
66	Botafogo (Mena Barreto / Dona Mariana)
67	Botafogo (Pasteur)
68	Botafogo (P. de Botafogo / V. Ouro Preto)
69	Urca
70	Leme
71	Copacabana (Lido)
72	Copacabana (Figueiredo de Magalhães)
73	Copacabana (Bolívar)
74	Copacabana (Posto 6)
75	Ipanema (Arpoador)
76	Ipanema (Farme de Amoedo)
77	Ipanema (N. S. da Paz)
78	Ipanema (Bar 20)
79	Lagoa (Catacumba)
80	Fonte da Saudade
81	Jardim Botânico (Parque Lage)
82	Jardim Botânico (Lagoa)
83	Jardim Botânico / Horto
84	Gávea (Jóquei)
85	Leblon (Jardim de Alah)
86	Leblon (Visconde de Albuquerque)
87	Gávea (Alto)

Fonte: Oliveira, 2012

5.3 A matriz de viagens considerada

A matriz utilizada na presente aplicação foi obtida em Oliveira (2012), representativa das viagens por transporte motorizado individual na hora de pico, considerada como o horário entre 7:00 e 8:00 (PDTU, 2005a), para o ano de 2003.

Oliveira (2012) partiu dos arquivos de matrizes por transporte motorizado individuais do PDTU, disponíveis para os anos de 2003, 2008 e 2013. Dessas, a matriz 2003 foi produzida a partir de pesquisas realizadas, representando a situação “atual” da época. As demais foram obtidas por projeção. As matrizes citadas referem-se a veículos no período de pico matutino, considerado como o horário entre 6:30 e 9:29 [sic]. A conversão das matrizes do período de pico para a hora de pico foi realizada com base na distribuição horária de viagens por modo obtida no PDTU (2005a), onde a hora de maior número de viagens individuais era entre 7:00 e 8:00, com 326.122 viagens (pessoas). Adicionalmente, Oliveira (2012) converteu o total de viagens na hora de pico de pessoas para veículos, utilizando a taxa de ocupação média apurada no PDTU (2005b) e em seguida converteu veículos em unidades de carros de passeio (UCP) de forma a produzir uma matriz de veículos em UCP para a hora de pico. O processo adotado para a conversão admitiu que a distribuição de viagens na hora de pico fosse igual à distribuição no período de pico, e chegou a um fator de conversão de 0,4735 a ser aplicado célula a célula sobre a matriz original. A matriz resultante tem 486 linhas e colunas, com um total de 229.674 viagens em UCP e é a matriz utilizada na presente aplicação para as alocações.

5.4 O processo de alocação

O software utilizado na aplicação foi o TransCAD (Caliper Corporation), o mesmo utilizado durante o PDTU 2005 e para o qual tanto a rede quanto a matriz de viagens disponíveis estão formatados. Outros softwares poderiam ter sido utilizados, como EMME (INRO), o Cube (Citilabs), o Visum (PTV). O fundamental é que o software tenha características de GIS e que disponha das ferramentas básicas para o planejamento de transporte além de ter capacidade para a modelagem de redes complexas.

Para o processo de alocação utilizou-se o método do Equilíbrio do Usuário (*User's Equilibrium* – UE), disponível no TransCAD, e que é baseado no algoritmo Frank-Wolf (Frank e Wolf, 1956 *apud* Caliper Corporation, 1996); este mesmo modelo foi utilizado durante o desenvolvimento do PDTU. Segundo Caliper (1996), “a alocação UE utiliza um processo iterativo para atingir uma solução convergente na qual nenhum viajante

pode melhorar seu tempo alterando sua rota. Em cada iteração, os fluxos nos links da rede são computados, o que incorpora efeitos de restrição de capacidade e tempos de viagem dependentes do fluxo”. A função utilizada pelo TransCAD para a determinação dos tempos nos links em função do nível de congestionamento é a conhecida como Função BPR e é apresentada na Equação 5.1:

$$t = T \left[1 + \alpha \left(\frac{v}{c} \right)^\beta \right] \quad (5.1)$$

Onde:

t = tempo congestionado;

T = tempo em fluxo livre;

v = volume de tráfego (fluxo);

c = capacidade do link;

α, β = parâmetros de calibração.

Sendo o UE um processo iterativo, é necessário um critério para a sua finalização. Critérios possíveis para esse propósito são discutidos em Rose *et al.* (1988) e sumarizados em Slavin *et al.* (2006), onde são comparados diferentes métodos de alocação de viagens por equilíbrio. Slavin *et al.* (2006) recomendam a utilização do relative gap (RG), que pode ser definido como a razão da diferença entre o tempo de viagem total (ou custo) obtido pelo método UE e o tempo de viagem total (ou custo) obtido pelo método de alocação “tudo-ou-nada” (AON) pelo tempo de viagem total (ou custo) pelo método UE, como na Equação 5.2 (Caliper, 2013).

$$RG = \frac{\sum v_i^{UE} t_i^{UE} - \sum v_i^{AON} t_i^{UE}}{\sum v_i^{UE} t_i^{UE}} \quad (5.2)$$

Onde:

RG = relative gap;

v_i^{UE} = fluxo em cada link como resultado de uma alocação pelo método UE;

v_i^{AON} = fluxo em cada link como resultado de uma alocação pelo método AON;

t_i^{UE} = tempo de viagem ou custo em cada link como resultado de uma alocação pelo método UE.

Para a presente aplicação, o RG considerado como critério limite para o processo iterativo de alocação foi 0,005, tal como adotado em Oliveira *et al.* (2014a, 2014b, 2016).

Não foi limitado o número de iterações, o critério de convergência sendo exclusivamente o RG. Foram realizados testes exploratórios para verificar a sensibilidade da precisão do resultado ao RG. De fato, o uso de RGs menores não produzem ganhos apreciáveis em precisão, enquanto que os tempos de processamento crescem consideravelmente. De fato, se o RG adotado fosse de 0,0001 em lugar de 0,005, o tempo de processamento seria cerca de 23 vezes maior para uma diferença de resultado (tempos totais de viagem na rede) em torno de 0,37%.

O processo de alocação do TransCAD tem como resultado uma tabela com informações que é associada à rede de simulação de forma georreferenciada, descrita no Quadro 5.4.

Quadro 5.4 – Descrição da tabela resultante do processo de alocação do TransCAD

Campo	Descrição
ID1	Código de identificação do <i>link</i> no TransCAD
AB_Flow e BA_Flow	Fluxo por sentido [UCP/h]
Tot_Flow	Fluxo em ambos os sentidos [UCP/h]
AB_Time e BA_Time	Tempo por sentido [minutos]
MAX_Time	Maior tempo entre os sentidos [minutos]
AB_voc e BA_voc	Relação V/C por sentido [-]
MAX_voc	Maior V/C entre os sentidos [-]
AB_speed e BA_speed	Velocidade por sentido [km/h]

Fonte: Oliveira, 2012

5.5 Aplicação de procedimentos: Congestionamento e Confiabilidade

Conforme discutido amplamente no Capítulo 4, foram selecionados dois indicadores para o atributo Congestionamento (V/C e CI) e um para o atributo Confiabilidade (ICE).

Tanto para os indicadores de congestionamento quanto para o indicador de confiabilidade, o procedimento envolveu apenas uma alocação da matriz de pico à rede representativa da RMRJ. O procedimento pode ser visto de forma esquemática na Figura 5.4, em cinza, no recorte do procedimento mais detalhado da Etapa 2 apresentado anteriormente na Figura 4.4. Para a presente aplicação, a matriz da hora

de pico de veículos motorizados individuais é alocada à rede representativa da RMRJ pelo método descrito anteriormente, produzindo uma rede carregada e um banco de dados georreferenciado associado. Sobre o banco de dados resultante é aplicado um filtro de modo a selecionar os 1266 links componentes da sub-rede de análise. Por uma característica do TransCAD, cada linha do banco de dados corresponde à uma aresta do grafo representativo da rede viária. A essas arestas podem corresponder vias unidirecionais ou bidirecionais, sendo as informações referentes a cada um dos sentidos dispostas em colunas diferentes. Para o caso de links unidirecionais, o sentido não existente tem seus campos não preenchidos. Na presente aplicação as vias bidirecionais tiveram seus dois sentidos tratados como links independentes, o que permite o cálculo de indicadores individualizados.

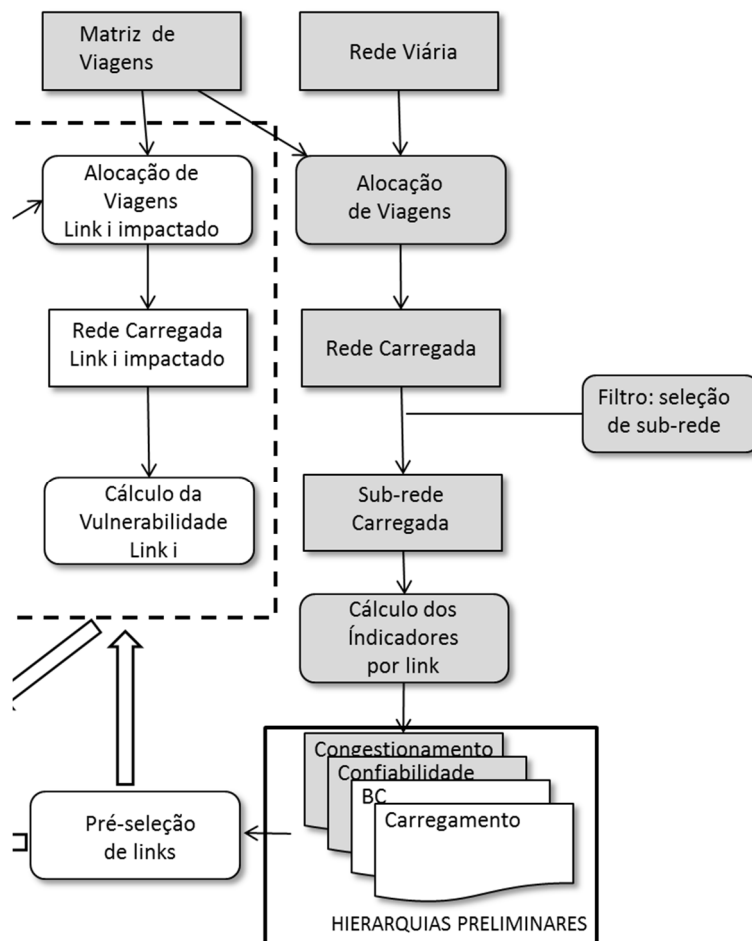


Figura 5.4 – Representação esquemática (em cinza) do procedimento para obtenção de hierarquias referentes aos atributos Congestionamento e Confiabilidade.

5.5.1 Congestionamento: cálculo dos indicadores e produção de hierarquias

O indicador V/C é calculado diretamente pelo TransCAD e apresentado por sentido nos campos AB_voc e BA_voc da tabela de saída do processo de alocação. Já o indicador CI é função da relação entre os tempos observado (ou simulado) e de fluxo livre (ver Equação 4.1, no Capítulo 4). O tempo simulado é obtido também por sentido na tabela de saída do processo de alocação do TransCAD, nos campos AB_Time e BA_Time ; o tempo em fluxo livre, por sua vez, é atributo da rede do PDTU, no campo *Tempo livre*. Dessa forma, o cálculo dos indicadores V/C e CI é simples e direto, conhecidos os resultados do processo de alocação. Os valores encontrados podem, então, ser adicionados ao banco de dados georreferenciado. A ordenação dos links da rede a partir dos valores encontrados para os indicadores, produz uma hierarquia de links segundo sua importância para o desempenho da rede viária de acordo com a ótica do congestionamento.

O Quadro 5.5 apresenta a hierarquia produzida a partir do indicador V/C . São aqui apresentados apenas os 60 links mais críticos, embora a hierarquia tenha sido produzida para toda a sub-rede. A ordenação é decrescente em função do valor de indicador V/C ; em caso de empate, prevaleceu o código do link (ID). Dessa forma, no topo da hierarquia estão os links mais críticos do ponto de vista do congestionamento tal como medido pelo indicador V/C . O campo *Dir* representa a característica de direção do link tal como codificado no TransCAD: 0 – são vias bidirecionais (links em ambos os sentidos), e que, portanto, permitem fluxo nos sentidos AB e BA do TransCAD; 1 – vias unidirecionais em que o sentido do fluxo coincide com o sentido AB, tal como codificado no TransCAD; e -1 – vias unidirecionais em que o sentido do fluxo coincide com o sentido BA, tal como codificado no TransCAD. O campo *Classe* apresenta o código da classificação funcional da via (ver Quadro 5.2).

É importante notar que há links com volume/capacidade superior a 1, o que poderia ser visto como uma impossibilidade, se a capacidade for interpretada como um valor absoluto. No entanto, como visto anteriormente (Capítulo 2, item 2.2.1), vários autores (IPEA e ANTP, 1998; Coelho, 2009; Litman e Doherty, 2009) admitem que em situação de congestionamento severo a relação V/C pode ser maior do que 1, o que implicitamente admite que a capacidade não é um limite absoluto para o fluxo e que em determinadas condições pode ser superada. De qualquer forma, observa-se alguns valores para a relação significativamente superiores à unidade, o que deve ser entendido como uma característica do algoritmo de alocação utilizado, que não admite a não realização de viagens por restrição de capacidade. A única hipótese de não

alocação de viagens é quando há desconexão da rede, não existindo rota entre a origem e destino. Assim, em redes supersaturadas seriam possíveis quaisquer razões V/C.

Como o que se busca aqui é observar os diferentes atributos de desempenho e sua utilização para a hierarquização de link, essa maior amplitude de valores obtidos para os indicadores não implica em qualquer prejuízo para a pesquisa.

O Quadro 5.6 apresenta a hierarquia obtida a partir do indicador CI (apenas os 60 links mais críticos), também produzida com base na ordenação decrescente dos links a partir dos valores encontrados.

Pode se observar que na relação dos 60 links mais críticos em ambos os indicadores de congestionamento, predominam links de classe funcional Arterial Primária ou Secundária (AP ou AS), representando mais de 90% deles. A relação derivada do indicador V/C apresenta ainda três links da classe Coletora (C) e um de classe Local (L); na relação derivada do indicador CI aparecem quatro da classe Coletora e um de classe Local.

O link de classe Local (ID = 100949) é um retorno em via Arterial Secundária e sua presença entre os links mais críticos quanto ao congestionamento sugeriria uma intervenção operacional, de forma a eliminar esse ponto crítico para o desempenho, já que não seria esperado o congestionamento em links locais. A hierarquia produzida permitiu identificar, portanto, uma oportunidade de intervenção. No presente caso, uma análise mais detida do modelo e da rede real, através de aplicativo Google Maps (Google, 2016), além do conhecimento da região, mostra que o modelo não representa adequadamente a circulação viária nessa área específica, ao menos em sua situação atual, o que pode explicar uma alocação de viagens acima do esperado ao link em questão.

Dentre os links classificados como coletores, dois deles (ID = 101216 e ID = 101224) estariam melhor na classe AS, uma vez que fazem parte de um corredor classificado parte como AS e parte como C. Os dois outros links coletores são alternativas a corredor de classe AP, já saturado, o que poderia explicar sua inclusão no conjunto de links mais críticos quanto ao atributo Congestionamento.

Quadro 5.5 – Hierarquia de links de acordo com o indicador de congestionamento V/C (60 links mais críticos).

ID	Extensão (km)	Dir	Logradouro	Classe	SENTIDO	V/C	HIERARQUIA
102036	0,01	0	AV DAS NACOES UNIDAS	AP	BA	1,7301	1
102057	0,12	1	AV VENCESLAU BRAZ	AP	AB	1,5910	2
101752	0,25	0	AV LAURO SODRE	AP	BA	1,5377	3
101771	0,22	0	AV PRINCESA ISABEL	AP	BA	1,5377	4
101772	0,65	0	AV PRINCESA ISABEL	AP	BA	1,5377	5
101117	0,12	0	TUN VELHO	AS	AB	1,5062	6
101122	0,03	0	TUN VELHO	AS	AB	1,5062	7
101173	0,05	0	TUN VELHO	AS	AB	1,5062	8
101178	0,02	-1	TUN VELHO	AS	BA	1,5062	9
101183	0,03	-1	TUN VELHO	AS	BA	1,5062	10
101188	0,01	-1	TUN VELHO	AS	BA	1,5062	11
101189	0,35	1	R DR SAMPAIO CORREIA	AS	AB	1,5062	12
101209	0,01	0	R REAL GRANDEZA	AS	BA	1,5062	13
102061	0,04	1	AV VENCESLAU BRAZ	AP	AB	1,4688	14
100601	0,02	0	R MIGUEL LEMOS	AP	AB	1,4448	15
101773	1,21	-1	AV PRINCESA ISABEL	AP	BA	1,4358	16
101896	0,06	0	AV DAS NACOES UNIDAS	AP	BA	1,4298	17
100758	0,12	-1	VD SAINT HILAIRE	AP	BA	1,3664	18
102034	0,31	0	AV DAS NACOES UNIDAS	AP	BA	1,3544	19
101789	0,05	-1	R VOLUNTARIOS DA PATRIA	AS	BA	1,3454	20
102053	0,16	-1	AV PASTEUR	AP	BA	1,3325	21
100421	0,06	1	AV EPITACIO PESSOA	AP	AB	1,3148	22
100740	1,37	1	AV EPITACIO PESSOA	AP	AB	1,3148	23
100743	0,18	1	AV EPITACIO PESSOA	AP	AB	1,3148	24
101698	0,10	-1	AV PRINCESA ISABEL	AP	BA	1,3109	25
101785	0,13	1	R VOLUNTARIOS DA PATRIA	AS	AB	1,2983	26
102046	0,08	1	AV VENCESLAU BRAZ	AP	AB	1,2968	27
100639	0,33	1	AV BORGES DE MEDEIROS	AP	AB	1,2842	28
100648	0,11	1	AV BORGES DE MEDEIROS	AP	AB	1,2842	29
100257	0,49	1	AV BORGES DE MEDEIROS	AP	AB	1,2757	30
102028	0,05	0	R GEN SEVERIANO	C	BA	1,2753	31
100889	0,03	1	AV EPITACIO PESSOA	AP	AB	1,2593	32
100810	0,01	-1	R PROF SALDANHA	AS	BA	1,2567	33
100964	0,20	1	VD SAINT HILAIRE	AS	AB	1,2567	34
102058	0,05	-1	AV PASTEUR	AP	BA	1,2476	35
100949	0,02	0	R HUMAITA	L	BA	1,2265	36
102025	0,04	0	AV LAURO SODRE	AP	BA	1,2122	37
100809	0,07	0	R JARDIM BOTANICO	AS	AB	1,1990	38
99829	0,27	1	AV RODRIGO OTAVIO	AS	AB	1,1793	39
99853	0,83	0	R JARDIM BOTANICO	AS	AB	1,1567	40
101696	0,03	0	R MIN VIVEIROS DE CASTRO	C	AB	1,1426	41
99844	0,02	1	AV BARTOLOMEU MITRE	AP	AB	1,1328	42
100642	0,12	1	AV BORGES DE MEDEIROS	AP	AB	1,1323	43
100750	0,06	-1	AV BORGES DE MEDEIROS	AP	BA	1,1286	44
100752	0,09	-1	AV BORGES DE MEDEIROS	AP	BA	1,1243	45
100754	0,16	-1	AV BORGES DE MEDEIROS	AP	BA	1,1243	46
100735	0,24	-1	AV BORGES DE MEDEIROS	AP	BA	1,1151	47
101403	0,13	1	R VOLUNTARIOS DA PATRIA	AS	AB	1,1144	48
100733	0,11	1	AV BORGES DE MEDEIROS	AP	AB	1,1093	49
100734	0,08	1	AV BORGES DE MEDEIROS	AP	AB	1,1093	50
101395	0,12	1	R VOLUNTARIOS DA PATRIA	AS	AB	1,1064	51
101224	0,18	-1	R GEN POLIDORO	C	BA	1,1047	52
101697	0,10	0	AV PRINCESA ISABEL	AP	BA	1,1037	53
100649	0,72	1	AV BORGES DE MEDEIROS	AP	AB	1,1036	54
100673	0,13	1	AV BORGES DE MEDEIROS	AP	AB	1,1024	55
100679	0,02	1	AV BORGES DE MEDEIROS	AP	AB	1,1024	56
100683	0,08	1	AV BORGES DE MEDEIROS	AP	AB	1,1024	57
99802	0,02	-1	AV VISC DE ALBUQUERQUE	AS	BA	1,0939	58
102054	0,11	-1	AV REPORT NESTOR MOREIRA	AP	BA	1,0830	59
100729	0,35	1	AV BORGES DE MEDEIROS	AP	AB	1,0804	60

Quadro 5.6 – Hierarquia de links de acordo com o indicador de congestionamento CI (60 links mais críticos).

ID	Extensão (km)	Dir	Logradouro	Classe	SENTIDO	CI	HIERARQUIA
102036	0,01	0	AV DAS NACOES UNIDAS	AP	BA	27,3243	1
102057	0,12	1	AV VENCESLAU BRAZ	AP	AB	18,0365	2
101771	0,22	0	AV PRINCESA ISABEL	AP	BA	17,9032	3
101752	0,25	0	AV LAURO SODRE	AP	BA	17,9001	4
101772	0,65	0	AV PRINCESA ISABEL	AP	BA	17,8987	5
101117	0,12	0	TUN VELHO	AS	AB	15,3055	6
101189	0,35	1	R DR SAMPAIO CORREIA	AS	AB	15,3029	7
101178	0,02	-1	TUN VELHO	AS	BA	15,3013	8
101173	0,05	0	TUN VELHO	AS	AB	15,3011	9
101209	0,01	0	R REAL GRANDEZA	AS	BA	15,3000	10
101122	0,03	0	TUN VELHO	AS	AB	15,2989	11
101183	0,03	-1	TUN VELHO	AS	BA	15,2868	12
101188	0,01	-1	TUN VELHO	AS	BA	15,2857	13
101896	0,06	0	AV DAS NACOES UNIDAS	AP	BA	13,8216	14
102061	0,04	1	AV VENCESLAU BRAZ	AP	AB	13,4521	15
100949	0,02	0	R HUMAITA	L	BA	12,6524	16
100601	0,02	0	R MIGUEL LEMOS	AP	AB	12,5436	17
101773	1,21	-1	AV PRINCESA ISABEL	AP	BA	12,4973	18
102034	0,31	0	AV DAS NACOES UNIDAS	AP	BA	11,4297	19
102028	0,05	0	R GEN SEVERIANO	C	BA	10,7150	20
100758	0,12	-1	VD SAINT HILAIRE	AP	BA	10,6942	21
101789	0,05	-1	R VOLUNTARIOS DA PATRIA	AS	BA	10,2826	22
102053	0,16	-1	AV PASTEUR	AP	BA	9,6893	23
100743	0,18	1	AV EPITACIO PESSOA	AP	AB	9,5071	24
100740	1,37	1	AV EPITACIO PESSOA	AP	AB	9,5055	25
100421	0,06	1	AV EPITACIO PESSOA	AP	AB	9,5031	26
101785	0,13	1	R VOLUNTARIOS DA PATRIA	AS	AB	9,0797	27
101698	0,10	-1	AV PRINCESA ISABEL	AP	BA	9,0115	28
102046	0,08	1	AV VENCESLAU BRAZ	AP	AB	8,7017	29
100648	0,11	1	AV BORGES DE MEDEIROS	AP	AB	8,6352	30
100639	0,33	1	AV BORGES DE MEDEIROS	AP	AB	8,6334	31
100257	0,49	1	AV BORGES DE MEDEIROS	AP	AB	8,4421	32
100889	0,03	1	AV EPITACIO PESSOA	AP	AB	8,3083	33
100810	0,01	-1	R PROF SALDANHA	AS	BA	8,2700	34
100964	0,20	1	VD SAINT HILAIRE	AS	AB	8,2683	35
101696	0,03	0	R MIN VIVEIROS DE CASTRO	C	AB	8,1891	36
102025	0,04	0	AV LAURO SODRE	AP	BA	7,8430	37
102058	0,05	-1	AV PASTEUR	AP	BA	7,7140	38
100809	0,07	0	R JARDIM BOTANICO	AS	AB	7,2221	39
101224	0,18	-1	R GEN POLIDORO	C	BA	7,0381	40
99829	0,27	1	AV RODRIGO OTAVIO	AS	AB	6,7808	41
101216	0,06	-1	R GEN POLIDORO	C	BA	6,5480	42
99853	0,83	0	R JARDIM BOTANICO	AS	AB	6,3735	43
99844	0,02	1	AV BARTOLOMEU MITRE	AP	AB	5,8452	44
101697	0,10	0	AV PRINCESA ISABEL	AP	BA	5,7936	45
100750	0,06	-1	AV BORGES DE MEDEIROS	AP	BA	5,7732	46
100752	0,09	-1	AV BORGES DE MEDEIROS	AP	BA	5,7075	47
100754	0,16	-1	AV BORGES DE MEDEIROS	AP	BA	5,7057	48
100642	0,12	1	AV BORGES DE MEDEIROS	AP	AB	5,6621	49
100735	0,24	-1	AV BORGES DE MEDEIROS	AP	BA	5,5581	50
100734	0,08	1	AV BORGES DE MEDEIROS	AP	AB	5,4667	51
100733	0,11	1	AV BORGES DE MEDEIROS	AP	AB	5,4648	52
101403	0,13	1	R VOLUNTARIOS DA PATRIA	AS	AB	5,4593	53
99802	0,02	-1	AV VISC DE ALBUQUERQUE	AS	BA	5,3656	54
100679	0,02	1	AV BORGES DE MEDEIROS	AP	AB	5,3493	55
100683	0,08	1	AV BORGES DE MEDEIROS	AP	AB	5,3481	56
100673	0,13	1	AV BORGES DE MEDEIROS	AP	AB	5,3469	57
101395	0,12	1	R VOLUNTARIOS DA PATRIA	AS	AB	5,3340	58
100649	0,72	1	AV BORGES DE MEDEIROS	AP	AB	5,2370	59
100729	0,35	1	AV BORGES DE MEDEIROS	AP	AB	5,0506	60

As Figuras 5.5 e 5.6 apresentam graficamente o congestionamento medido a partir dos indicadores V/C e CI, respectivamente. As espessuras das linhas representativas dos links são proporcionais aos valores obtidos para os indicadores. Assim, os links mais espessos são aqueles mais críticos para o desempenho segundo o atributo Congestionamento.

Comparando-se as hierarquias produzidas e a representação gráfica, verifica-se muita semelhança nos resultados obtidos a partir de V/C e CI. Pode ser observado que, conforme esperado, os links mais críticos quanto ao congestionamento encontram-se agrupados em corredores. A visualização gráfica dos resultados é uma ferramenta que pode ser utilizada para a localização de trechos ou conjunto de links mais críticos, e para a tomada de decisões quanto a medidas de controle de demanda, aumento de capacidade viária ou alterações operacionais.

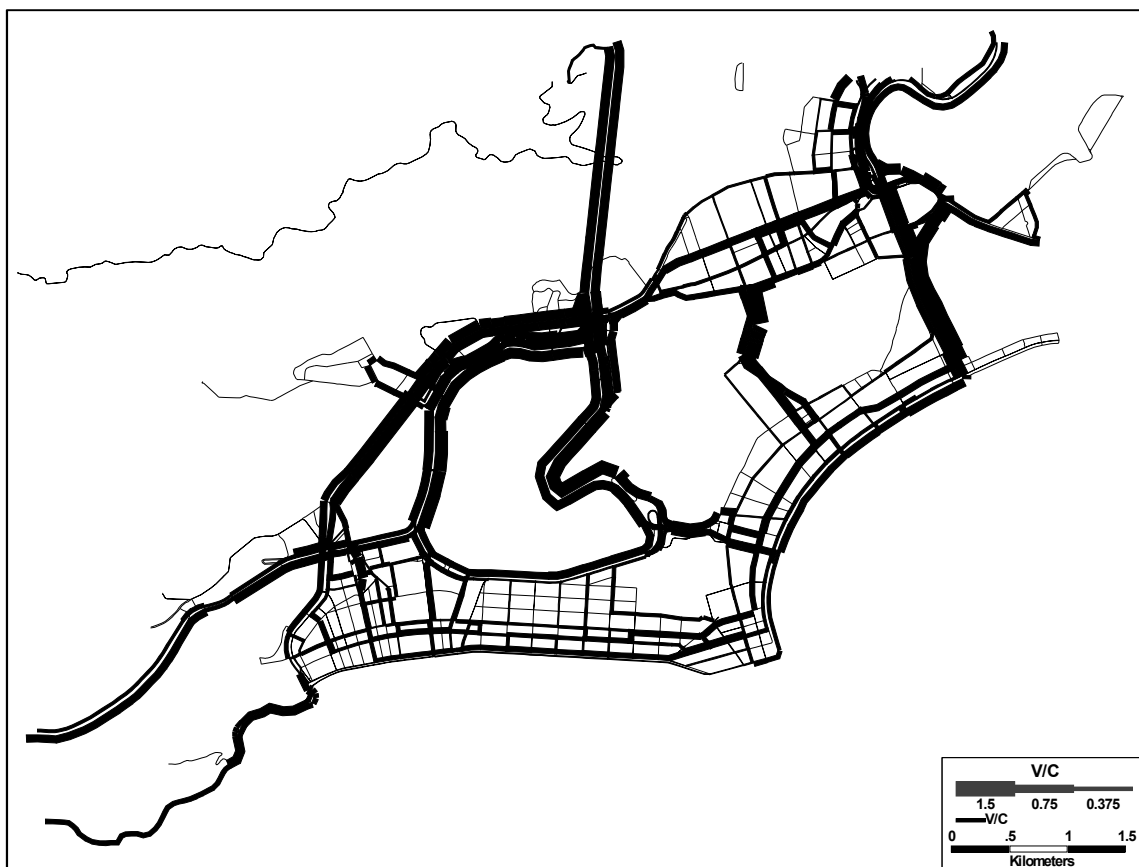


Figura 5.5 – Representação gráfica do congestionamento segundo o indicador V/C.

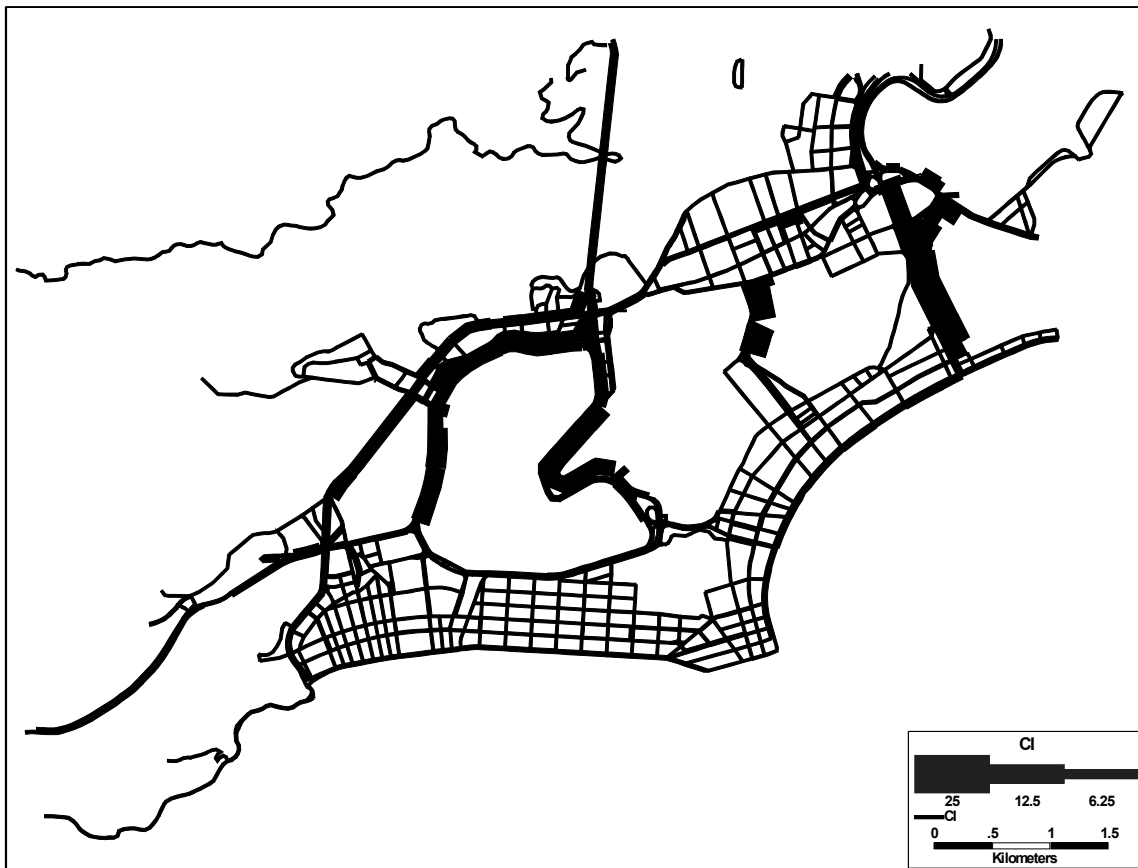


Figura 5.6 – Representação gráfica do congestionamento segundo o indicador CI.

5.5.2 Confiabilidade: cálculo dos indicadores e produção de hierarquias

Para o cálculo do indicador ICE de confiabilidade foi utilizado o procedimento descrito no Capítulo 4, e da Equação 4.2, cujas variáveis e fontes de informação são:

- Tempo médio de viagem [min] – obtido diretamente dos resultados do modelo de alocação do TransCAD, nos campos *AB_Time* e *BA_Time*, para cada um dos sentidos de cada link;
- Tempo médio de viagem em condições de fluxo livre [min] – obtido diretamente do campo *Tempo Livre*, atributo da rede do PDTU;
- Extensão do link [km] – obtido diretamente do campo *Length*, atributo da rede do PDTU;
- $\beta_{tod} = 1,1052$ – variável *dummy* para o período do dia, obtida do Quadro 4.3, média entre os valores estimados por Eliasson (2009) para antes e depois do pico da manhã;
- $\beta_{speed} = 1,00$ (para limite de velocidade de 50 km/h) ou 1,31 (para limite de velocidade de 70 km/h) – variável *dummy* para o limite de velocidade obtida a partir do Quadro 4.3, e conforme a velocidade obtida no campo *Velocidade*,

atributo da rede do PDTU e que, por sua vez, é função da classe funcional de cada link. Não se tem informação sobre a velocidade limite de cada via, mas sim sobre a velocidade adotada, supostamente a média. Assim, admitiu-se que para vias de maior velocidade média seria considerado o β_{speed} correspondente a 70km/h e para as de menor velocidade o β_{speed} correspondente a 50km/h. A linha de corte foi a velocidade de 50km/h: Acima de 50km/h de velocidade média considerou-se o limite 70/km/h e de 50 para baixo o limite como 50 km/h. Os experimentos de Eliasson (2009) só abrangeram esses dois limites de velocidade¹¹; e

- $\alpha, \beta, \gamma, \omega$ = parâmetros estimados por Eliasson (2009) e apresentados no Quadro 4.2.

Dessa forma, o cálculo do indicador ICE é simples e direto, conhecidos os resultados do processo de alocação. Os valores podem, então, ser adicionados ao banco de dados georreferenciado. A ordenação dos links da rede segundo os valores encontrados para o ICE produz uma hierarquia de links segundo sua importância para o desempenho da rede viária de acordo com o atributo Confiabilidade.

O Quadro 5.7 apresenta a hierarquia produzida a partir do indicador ICE (apenas os 60 links mais críticos). A ordenação é decrescente em função do valor de indicador ICE; em caso de empate, prevaleceu o código do link (*ID*). Dessa forma, no topo da hierarquia estão os links mais críticos do ponto de vista da confiabilidade tal como medida pelo indicador ICE. O campo *Dir* representa a característica de direção do link tal como codificado no TransCAD e descrito anteriormente. O campo *Classe* apresenta o código da classificação funcional da via (ver Quadro 5.2).

A exemplo do observado no caso de congestionamento, na relação dos 60 links mais críticos predominam os links de classe funcional Arterial Primária ou Secundária (AP e AS). As exceções são quatro links de classe Coletora (C) e três de classe Local (L).

Os links de classe Coletora coincidem com links também relacionados entre os mais críticos de acordo com o congestionamento, e os mesmos comentários feitos anteriormente se aplicam.

Dentre os links de classe Local relacionados, o link 100949 também consta das relações dos links críticos quanto ao congestionamento, e os comentários feitos anteriormente

¹¹ Contatado por e-mail em 2015, Eliasson confirmou que não dispõe de estatísticas para outros limites de velocidade, além de 50 e 70 km/h.

também se aplicam. O link 101034, no entanto, seria melhor enquadrado como de classe Coletora, sendo, de fato, um giro à esquerda de uma via com essas características. Nesse caso, a hierarquia produzida teria identificado um pequeno segmento com impacto na confiabilidade e que mereceria uma intervenção. De fato, investigando-se com o uso do Google Maps (Google, 2016) e com o conhecimento do local, trata-se de representação inadequada no modelo do PDTU: o número de faixas de rolamento está incorreto, o que tem como resultado a simulação de um gargalo que de fato não existe. O terceiro link Local (100061) seria melhor classificado como de classe Coletora e, com uma velocidade maior, possivelmente não estaria na relação dos 60 links mais críticos quanto à confiabilidade.

A Figura 5.7 apresenta graficamente a sub-rede de análise, apresentando links com espessura proporcional à sua importância para o desempenho da rede segundo o atributo Confiabilidade. Assim, os links mais espessos são aqueles mais críticos para o desempenho segundo a confiabilidade.

A comparação das figuras representativas dos resultados obtidos para os indicadores de congestionamento e confiabilidade mostra que há semelhança entre os links considerados mais críticos segundo os diferentes indicadores. No entanto, pode-se perceber uma diferença visível nos valores relativos, explicitados pelas diferenças entre espessuras dos links. Há uma primeira evidência, portanto, de semelhanças entre os resultados obtidos a partir dos atributos Congestionamento e Confiabilidade, embora não haja uma coincidência de resultados. O Capítulo 6 discute de forma mais aprofundada as relações entre os resultados dos diferentes atributos.

5.6 Aplicação de procedimentos auxiliares: *Betweenness Centrality* e Carregamento

Conforme discutido no Capítulo 4, foram selecionados dois indicadores auxiliares para, em conjunto com os indicadores de congestionamento e confiabilidade, embasarem uma pré-seleção de links que terão seus indicadores de vulnerabilidade determinados. Esses indicadores auxiliares são a *Betweenness Centrality* (BC) e o Carregamento.

A determinação dos indicadores BC e Carregamento foi feita por processo similar ao já descrito no item 5.5, e envolve o carregamento de uma matriz de viagens à rede do PDTU. O procedimento pode ser visto de forma esquemática, em cinza, no recorte do procedimento geral da Etapa 2 apresentado na Figura 5.8.

Quadro 5.7 – Hierarquia de links de acordo com o indicador de confiabilidade ICE (60 links mais críticos)

ID	Extensão (km)	Dir	Logradouro	Classe	SENTIDO	ICE	HIERARQUIA
102036	0,01	0	AV DAS NACOES UNIDAS	AP	BA	5,7699	1
100601	0,02	0	R MIGUEL LEMOS	AP	AB	3,0944	2
101188	0,01	-1	TUN VELHO	AS	BA	3,0611	3
101209	0,01	0	R REAL GRANDEZA	AS	BA	3,0153	4
102061	0,04	1	AV VENCESLAU BRAZ	AP	AB	2,8150	5
102057	0,12	1	AV VENCESLAU BRAZ	AP	AB	2,7397	6
101178	0,02	-1	TUN VELHO	AS	BA	2,6758	7
101896	0,06	0	AV DAS NACOES UNIDAS	AP	BA	2,6174	8
100949	0,02	0	R HUMAITA	L	BA	2,5436	9
101183	0,03	-1	TUN VELHO	AS	BA	2,5106	10
101122	0,03	0	TUN VELHO	AS	AB	2,4926	11
101771	0,22	0	AV PRINCESA ISABEL	AP	BA	2,4262	12
101752	0,25	0	AV LAURO SODRE	AP	BA	2,3734	13
101173	0,05	0	TUN VELHO	AS	AB	2,2712	14
100889	0,03	1	AV EPITACIO PESSOA	AP	AB	2,1078	15
100421	0,06	1	AV EPITACIO PESSOA	AP	AB	2,0667	16
100810	0,01	-1	R PROF SALDANHA	AS	BA	2,0068	17
101772	0,65	0	AV PRINCESA ISABEL	AP	BA	1,9773	18
100758	0,12	-1	VD SAINT HILAIRE	AP	BA	1,9469	19
102025	0,04	0	AV LAURO SODRE	AP	BA	1,9461	20
101117	0,12	0	TUN VELHO	AS	AB	1,9145	21
102028	0,05	0	R GEN SEVERIANO	C	BA	1,8664	22
102058	0,05	-1	AV PASTEUR	AP	BA	1,8509	23
102046	0,08	1	AV VENCESLAU BRAZ	AP	AB	1,8293	24
101698	0,10	-1	AV PRINCESA ISABEL	AP	BA	1,8066	25
99844	0,02	1	AV BARTOLOMEU MITRE	AP	AB	1,7678	26
101696	0,03	0	R MIN VIVEIROS DE CASTRO	C	AB	1,7408	27
101789	0,05	-1	R VOLUNTARIOS DA PATRIA	AS	BA	1,7270	28
102053	0,16	-1	AV PASTEUR	AP	BA	1,7252	29
100648	0,11	1	AV BORGES DE MEDEIROS	AP	AB	1,7106	30
100679	0,02	1	AV BORGES DE MEDEIROS	AP	AB	1,7032	31
102034	0,31	0	AV DAS NACOES UNIDAS	AP	BA	1,6996	32
100743	0,18	1	AV EPITACIO PESSOA	AP	AB	1,6653	33
101189	0,35	1	R DR SAMPAIO CORREIA	AS	AB	1,5607	34
100862	0,02	0	AV EPITACIO PESSOA	AP	AB	1,5274	35
100750	0,06	-1	AV BORGES DE MEDEIROS	AP	BA	1,4606	36
100639	0,33	1	AV BORGES DE MEDEIROS	AP	AB	1,3924	37
101773	1,21	-1	AV PRINCESA ISABEL	AP	BA	1,3923	38
101785	0,13	1	R VOLUNTARIOS DA PATRIA	AS	AB	1,3318	39
100752	0,09	-1	AV BORGES DE MEDEIROS	AP	BA	1,3313	40
101697	0,10	0	AV PRINCESA ISABEL	AP	BA	1,3276	41
100734	0,08	1	AV BORGES DE MEDEIROS	AP	AB	1,3214	42
100683	0,08	1	AV BORGES DE MEDEIROS	AP	AB	1,3019	43
100809	0,07	0	R JARDIM BOTANICO	AS	AB	1,2917	44
99802	0,02	-1	AV VISC DE ALBUQUERQUE	AS	BA	1,2894	45
101216	0,06	-1	R GEN POLIDORO	C	BA	1,2833	46
100257	0,49	1	AV BORGES DE MEDEIROS	AP	AB	1,2718	47
100642	0,12	1	AV BORGES DE MEDEIROS	AP	AB	1,2620	48
100733	0,11	1	AV BORGES DE MEDEIROS	AP	AB	1,2484	49
101034	0,01	0	R HUMAITA	L	BA	1,2401	50
100694	0,09	1	AV BORGES DE MEDEIROS	AP	AB	1,2123	51
100754	0,16	-1	AV BORGES DE MEDEIROS	AP	BA	1,2002	52
100673	0,13	1	AV BORGES DE MEDEIROS	AP	AB	1,1907	53
100882	0,08	1	AV EPITACIO PESSOA	AP	AB	1,1562	54
100964	0,20	1	VD SAINT HILAIRE	AS	AB	1,1559	55
102054	0,11	-1	AV REPORT NESTOR MOREIRA	AP	BA	1,1554	56
100740	1,37	1	AV EPITACIO PESSOA	AP	AB	1,1343	57
100663	0,02	0	R JARDIM BOTANICO	AS	BA	1,1310	58
100061	0,01	1	R PACHECO LEAO	L	AB	1,1062	59
101224	0,18	-1	R GEN POLIDORO	C	BA	1,1030	60

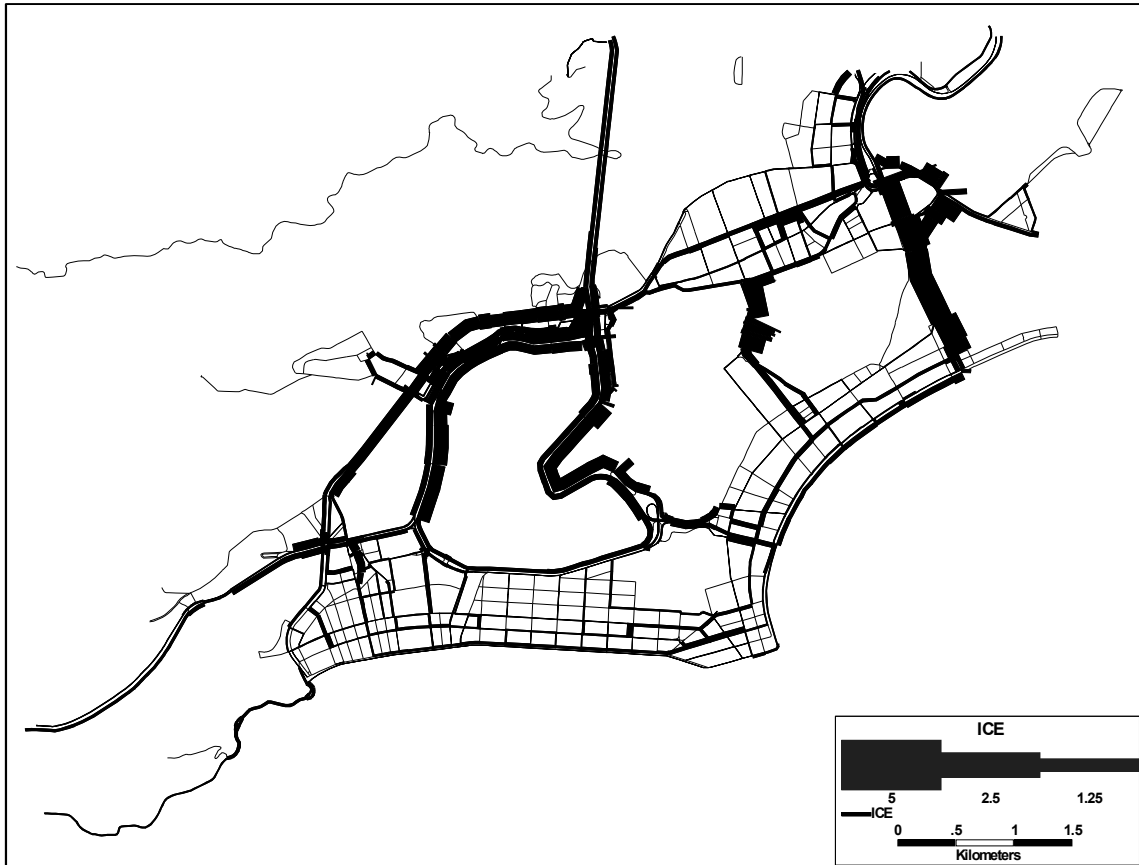


Figura 5.7 – Representação gráfica da importância para a confiabilidade segundo o indicador ICE.

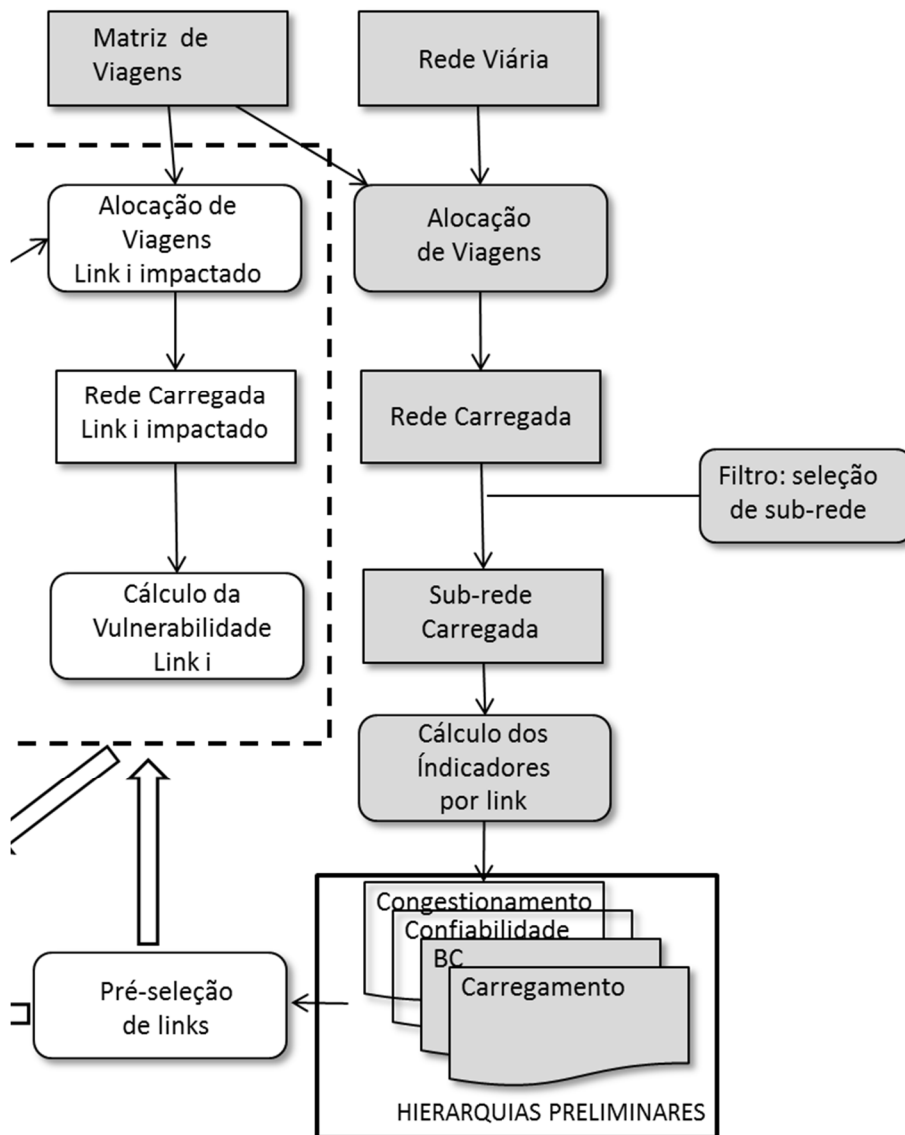


Figura 5.8 – Representação esquemática (em cinza) do procedimento para obtenção de hierarquias referentes aos indicadores auxiliares BC e Carregamento.

5.6.1 Betweenness Centrality: cálculo do indicador e produção de hierarquia

Para a determinação do indicador BC, primeiramente, foi criada uma matriz de viagens tal que a cada par de origem e destino correspondesse uma única viagem. Essa matriz, alocada à rede do PDTU pelo método “Tudo-ou-nada”¹², tem, no carregamento de cada link o número de caminhos mínimos que por ali passa, por sentido. É o único caso na metodologia proposta em que a alocação não é feita pelo método UE.

¹² No método “Tudo-ou-nada”, a matriz de viagens é alocada à rede de simulação ao longo das rotas de menor impedância, independentemente da capacidade viária.

Dessa forma, é possível calcular o BC conforme explicitado na Equação 4.9. Como são 484 as zonas de tráfego na rede de simulação, o número total de caminhos mínimos na rede é de $484^2 = 234.256$. O número total de caminhos mínimos que passa por um determinado link é obtido por sentido nos campos *AB_Flow* e *BA_Flow* na tabela de saída do processo de alocação do TransCAD. Os valores encontrados podem, então, ser adicionados ao banco de dados georreferenciados, à semelhança dos demais indicadores já calculados. A ordenação decrescente dos links da rede segundo os valores encontrados para o indicador BC produz uma relação auxiliar que é utilizada na pré-seleção dos links de acordo com o procedimento descrito no Capítulo 4, e que será aplicado no item 5.7.

O Quadro 5.8 apresenta a hierarquia auxiliar produzida a partir do indicador BC (apenas os 60 links mais críticos). Como nas outras hierarquias produzidas, a ordenação é decrescente em função do valor do indicador BC e, em caso de empate, prevalece o código do link (*ID*). A descrição das colunas do quadro é a mesma já apresentada para as hierarquias dos demais indicadores.

Pode-se observar que na relação dos 60 links de maior centralidade todos os links pertencem às classes Expressa (E), Arterial Primária (AP) e Arterial Secundária (AS). É interessante, portanto, destacar que links de características expressas não pertencem às relações de links mais críticos derivadas dos atributos Congestionamento e Confiabilidade. Vale destacar, ainda, que os 8 primeiros postos da hierarquia segundo o indicador BC são preenchidos, justamente, por links de classe Expressa.

A Figura 5.9 apresenta graficamente a centralidade de cada link. As espessuras das linhas representativas dos links são proporcionais aos valores obtidos para BC.

Sob a ótica do indicador BC destacam-se os links que pertencem aos corredores que conectam a sub-rede de análise às zonas Oeste e Norte, através dos túneis Zuzu Angel e Rebouças com a ligação para o Centro em menor destaque.

Quadro 5.8 – Hierarquia de links de acordo com o indicador auxiliar BC (60 links mais críticos).

ID	Extensão (km)	Dir	Logradouro	Classe	SENTIDO	BC (%)	HIERARQUIA
100970	0,04	1	VD SAINT HILAIRE	E	AB	4,9369	1
101002	0,47	-1	TUN ANTONIO REBOUCAS	E	BA	4,9369	2
101230	1,64	-1	TUN ANTONIO REBOUCAS	E	BA	4,9369	3
101004	0,33	-1	TUN ANTONIO REBOUCAS	E	BA	4,6039	4
101233	1,81	-1	TUN ANDRE REBOUCAS	E	BA	4,6039	5
100928	0,25	1	VD SAINT HILAIRE	E	AB	3,7946	6
100971	0,18	-1	VD SAINT HILAIRE	E	BA	3,7946	7
100963	0,28	1	VD SAINT HILAIRE	E	AB	3,5675	8
100735	0,24	-1	AV BORGES DE MEDEIROS	AP	BA	2,6774	9
100750	0,06	-1	AV BORGES DE MEDEIROS	AP	BA	2,6774	10
100752	0,09	-1	AV BORGES DE MEDEIROS	AP	BA	2,6774	11
100754	0,16	-1	AV BORGES DE MEDEIROS	AP	BA	2,6774	12
100758	0,12	-1	VD SAINT HILAIRE	AP	BA	2,6774	13
100733	0,11	1	AV BORGES DE MEDEIROS	AP	AB	2,6770	14
100734	0,08	1	AV BORGES DE MEDEIROS	AP	AB	2,6770	15
100727	0,46	1	AV BORGES DE MEDEIROS	AP	AB	2,5950	16
100757	0,26	-1	AV BORGES DE MEDEIROS	AP	BA	2,5886	17
100887	0,14	1	AV BORGES DE MEDEIROS	AP	AB	2,5861	18
100645	0,50	1	AV BORGES DE MEDEIROS	AP	AB	2,5592	19
100673	0,13	1	AV BORGES DE MEDEIROS	AP	AB	2,5558	20
100679	0,02	1	AV BORGES DE MEDEIROS	AP	AB	2,5558	21
100683	0,08	1	AV BORGES DE MEDEIROS	AP	AB	2,5558	22
100647	0,02	1	AV BORGES DE MEDEIROS	AP	AB	2,5540	23
100671	0,13	1	AV BORGES DE MEDEIROS	AP	AB	2,5540	24
100672	0,01	0	AV BORGES DE MEDEIROS	AP	AB	2,5540	25
100694	0,09	1	AV BORGES DE MEDEIROS	AP	AB	2,5447	26
100729	0,35	1	AV BORGES DE MEDEIROS	AP	AB	2,5447	27
100639	0,33	1	AV BORGES DE MEDEIROS	AP	AB	2,4674	28
100642	0,12	1	AV BORGES DE MEDEIROS	AP	AB	2,4674	29
100648	0,11	1	AV BORGES DE MEDEIROS	AP	AB	2,4674	30
100649	0,72	1	AV BORGES DE MEDEIROS	AP	AB	2,4610	31
100259	0,46	1	AV BORGES DE MEDEIROS	AP	AB	2,4264	32
99693	0,23	-1	AV PADRE LEONEL FRANCA	AP	BA	2,3837	33
112652	0,64	-1	AUTO EST LAGOA BARRA	E	BA	2,3837	34
99845	0,11	1	R MARIO RIBEIRO	AP	AB	2,3474	35
99850	0,14	1	R MARIO RIBEIRO	AP	AB	2,3474	36
99851	0,27	1	R MARIO RIBEIRO	AP	AB	2,3474	37
100257	0,49	1	AV BORGES DE MEDEIROS	AP	AB	2,3346	38
99795	0,03	-1	AV PADRE LEONEL FRANCA	AP	BA	2,3261	39
99798	0,03	-1	AV PADRE LEONEL FRANCA	AP	BA	2,3099	40
99800	0,16	-1	AV PADRE LEONEL FRANCA	AP	BA	2,2616	41
99372	1,65	-1	AUTO EST LAGOA BARRA	E	BA	2,2480	42
99475	0,26	1	AUTO EST LAGOA BARRA	E	AB	2,2480	43
112657	0,22	1	AUTO EST LAGOA BARRA	E	AB	2,2480	44
99841	0,14	-1	AV PADRE LEONEL FRANCA	AP	BA	2,2189	45
99840	0,03	1	R MARIO RIBEIRO	AP	AB	2,1869	46
99610	0,68	-1	AV PADRE LEONEL FRANCA	AP	BA	2,1754	47
99793	0,21	-1	AV PADRE LEONEL FRANCA	AP	BA	2,1754	48
99472	1,81	1	AUTO EST LAGOA BARRA	E	AB	2,0798	49
99473	0,16	1	AUTO EST LAGOA BARRA	E	AB	2,0401	50
99563	0,26	1	AUTO EST LAGOA BARRA	E	AB	2,0401	51
99790	0,04	-1	AV PADRE LEONEL FRANCA	AP	BA	2,0106	52
100245	0,03	1	AV BORGES DE MEDEIROS	AP	AB	2,0034	53
100247	0,09	-1	R MARIO RIBEIRO	AP	BA	2,0034	54
100251	0,65	1	R MARIO RIBEIRO	AP	AB	1,9329	55
100809	0,07	0	R JARDIM BOTANICO	AS	AB	1,4484	56
100934	0,07	1	R HUMAITA	AS	AB	1,4360	57
100947	0,01	1	R HUMAITA	AS	AB	1,4305	58
100932	0,01	0	R HUMAITA	AS	AB	1,4266	59
112650	0,05	1	R HUMAITA	AS	AB	1,4266	60

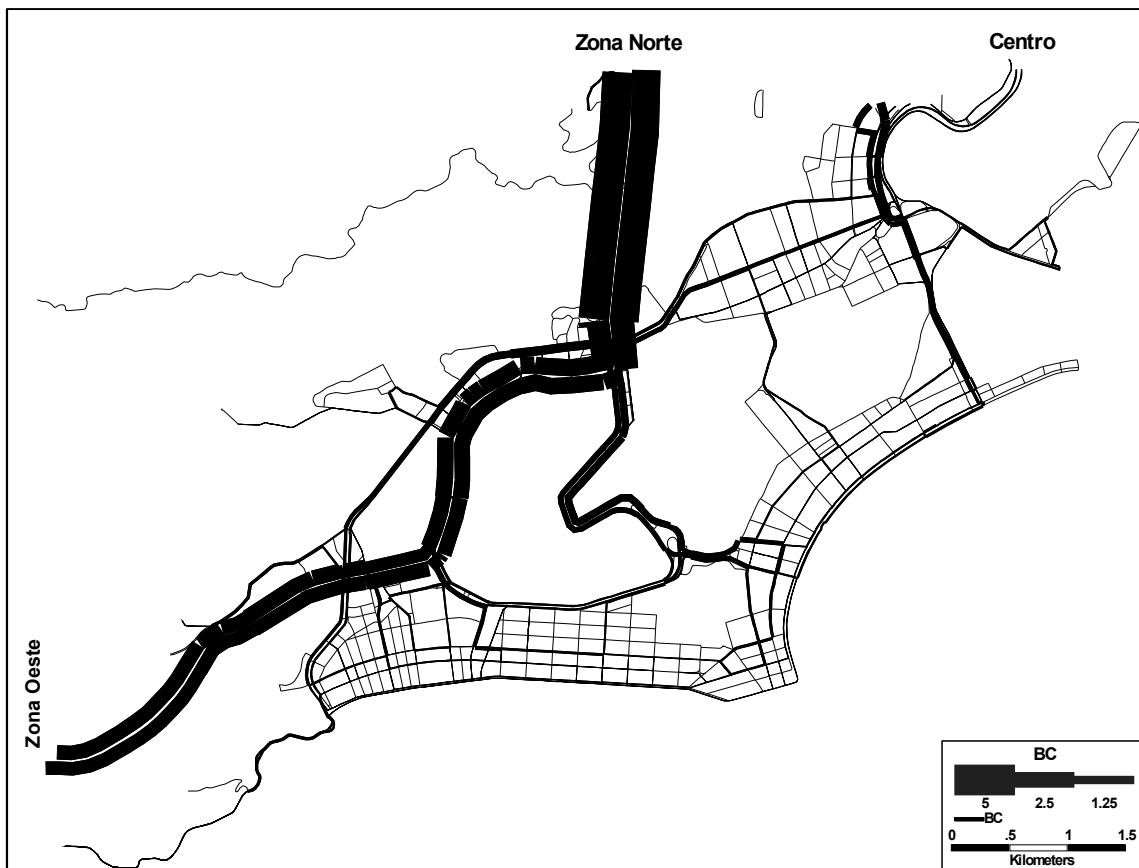


Figura 5.9 – Representação gráfica da centralidade segundo o indicador BC.

5.6.2 Carregamento: cálculo do indicador e produção de hierarquia

O indicador Carregamento é calculado diretamente pelo TransCAD, como principal resultado do processo de alocação de viagens e é apresentado por sentido nos campos *AB_Flow* e *BA_Flow*.

O Quadro 5.9 apresenta a hierarquia auxiliar produzida a partir do carregamento (apenas os 60 links mais carregados). A ordenação é decrescente em função do carregamento; em caso de empate prevalece o código do link (*ID*). A descrição das colunas do quadro é a mesma já apresentada para os demais indicadores.

À semelhança do observado para o indicador BC, todos os 60 links mais carregados pertencem às classes Expressa (E), Arterial Primária (AP) e Arterial Secundária (AS). Na relação de links, no entanto, mais da metade (34) dos links mais carregados não faz parte da relação dos 60 mais críticos segundo a centralidade.

A Figura 5.10 apresenta graficamente os resultados obtidos, com a espessura dos links proporcional ao seu carregamento. Observa-se que, como nas figuras representativas dos demais indicadores, os principais corredores estão em destaque. No entanto, a

relação entre os links nos diferentes corredores é significativamente diferente dos apresentados anteriormente, o que é discutido no Capítulo 6.

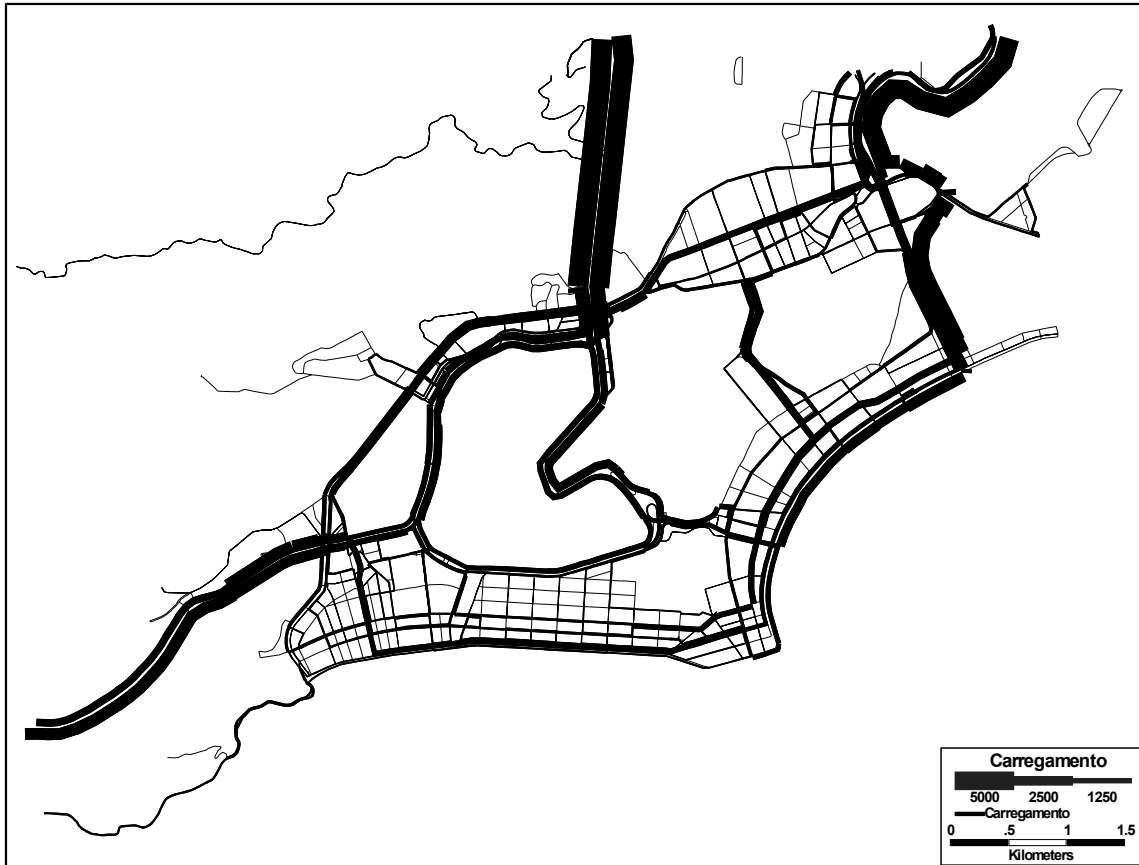


Figura 5.10 – Representação gráfica do carregamento.

Quadro 5.9 – Hierarquia de links segundo o carregamento (60 links mais carregados).

ID	Extensão (km)	Dir	Logradouro	Classe	SENTIDO	Carregamento	HIERARQUIA
100970	0,04	1	VD SAINT HILAIRE	E	AB	5589	1
101002	0,47	-1	TUN ANTONIO REBOUCAS	E	BA	5589	2
101230	1,64	-1	TUN ANTONIO REBOUCAS	E	BA	5589	3
101004	0,33	-1	TUN ANTONIO REBOUCAS	E	BA	5313	4
101233	1,81	-1	TUN ANDRE REBOUCAS	E	BA	5313	5
102237	2,07	-1	AV INFANTE DOM HENRIQUE	E	BA	5214	6
102057	0,12	1	AV VENCESLAU BRAZ	AP	AB	5155	7
102061	0,04	1	AV VENCESLAU BRAZ	AP	AB	4759	8
101773	1,21	-1	AV PRINCESA ISABEL	AP	BA	4652	9
102053	0,16	-1	AV PASTEUR	AP	BA	4317	10
101698	0,10	-1	AV PRINCESA ISABEL	AP	BA	4247	11
102046	0,08	1	AV VENCESLAU BRAZ	AP	AB	4202	12
100928	0,25	1	VD SAINT HILAIRE	E	AB	4110	13
102058	0,05	-1	AV PASTEUR	AP	BA	4042	14
100971	0,18	-1	VD SAINT HILAIRE	E	BA	4041	15
100963	0,28	1	VD SAINT HILAIRE	E	AB	3796	16
102054	0,11	-1	AV REPORT NESTOR MOREIRA	AP	BA	3509	17
99693	0,23	-1	AV PADRE LEONEL FRANCA	AP	BA	3118	18
112652	0,64	-1	AUTO EST LAGOA BARRA	E	BA	3118	19
99472	1,81	1	AUTO EST LAGOA BARRA	E	AB	3049	20
99473	0,16	1	AUTO EST LAGOA BARRA	E	AB	3049	21
99563	0,26	1	AUTO EST LAGOA BARRA	E	AB	3049	22
101934	0,13	-1	AV REPORT NESTOR MOREIRA	AP	BA	2960	23
102056	0,18	-1	AV REPORT NESTOR MOREIRA	AP	BA	2884	24
99795	0,03	-1	AV PADRE LEONEL FRANCA	AP	BA	2883	25
101654	0,46	1	AV ATLANTICA	AP	AB	2843	26
101687	0,09	1	AV ATLANTICA	AP	AB	2843	27
101705	0,03	-1	AV PRINCESA ISABEL	AP	BA	2843	28
99610	0,68	-1	AV PADRE LEONEL FRANCA	AP	BA	2733	29
99793	0,21	-1	AV PADRE LEONEL FRANCA	AP	BA	2733	30
101789	0,05	-1	R VOLUNTARIOS DA PATRIA	AS	BA	2724	31
99798	0,03	-1	AV PADRE LEONEL FRANCA	AP	BA	2696	32
101785	0,13	1	R VOLUNTARIOS DA PATRIA	AS	AB	2629	33
100947	0,01	1	R HUMAITA	AS	AB	2563	34
101501	0,34	1	AV ATLANTICA	AP	AB	2556	35
99790	0,04	-1	AV PADRE LEONEL FRANCA	AP	BA	2471	36
100981	0,25	1	R HUMAITA	AS	AB	2362	37
101562	0,31	1	AV ATLANTICA	AP	AB	2339	38
99800	0,16	-1	AV PADRE LEONEL FRANCA	AP	BA	2335	39
101494	0,61	1	AV ATLANTICA	AP	AB	2328	40
100602	0,24	1	AV ATLANTICA	AP	AB	2315	41
101498	0,18	1	AV ATLANTICA	AP	AB	2311	42
101403	0,13	1	R VOLUNTARIOS DA PATRIA	AS	AB	2257	43
101395	0,12	1	R VOLUNTARIOS DA PATRIA	AS	AB	2241	44
100758	0,12	-1	VD SAINT HILAIRE	AP	BA	2214	45
100590	0,12	1	AV N SRA DE COPACABANA	AS	AB	2176	46
101486	0,19	1	AV N SRA DE COPACABANA	AS	AB	2157	47
100605	0,12	1	AV N SRA DE COPACABANA	AS	AB	2151	48
100607	0,11	1	AV N SRA DE COPACABANA	AS	AB	2151	49
101484	0,33	1	AV N SRA DE COPACABANA	AS	AB	2151	50
100421	0,06	1	AV EPITACIO PESSOA	AP	AB	2130	51
100740	1,37	1	AV EPITACIO PESSOA	AP	AB	2130	52
100743	0,18	1	AV EPITACIO PESSOA	AP	AB	2130	53
101894	0,16	1	AV DAS NACOES UNIDAS	AP	AB	2130	54
100639	0,33	1	AV BORGES DE MEDEIROS	AP	AB	2080	55
100648	0,11	1	AV BORGES DE MEDEIROS	AP	AB	2080	56
101801	0,32	-1	R VOLUNTARIOS DA PATRIA	AS	BA	2067	57
100257	0,49	1	AV BORGES DE MEDEIROS	AP	AB	2067	58
100934	0,07	1	R HUMAITA	AS	AB	2057	59
100932	0,01	0	R HUMAITA	AS	AB	2056	60

5.7 Pré-seleção de links

O procedimento de pré-seleção dos links se insere na Etapa 2 da Estrutura Metodológica como destacado em cinza na representação esquemática apresentada na Figura 5.11.

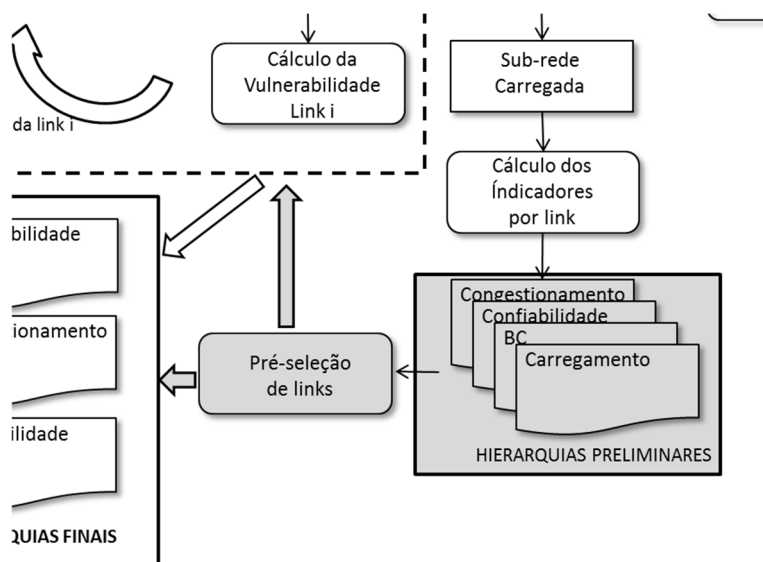


Figura 5.11 – Representação esquemática (em cinza) da inserção do procedimento de pré-seleção de links na Etapa 2 da Estrutura Metodológica.

Conforme descrito no Capítulo 4, o procedimento de pré-seleção busca extrair da sub-rede em estudo os links com maior potencialidade para serem importantes para o desempenho do ponto de vista da vulnerabilidade. Como se deseja ainda fazer uma análise comparativa entre os resultados obtidos pelos três atributos de desempenho e seus indicadores, é importante também pré-selecionar os links mais críticos quanto ao congestionamento e quanto à confiabilidade, de forma a que se tenha um conjunto único de links selecionados para uma análise mais detalhada.

Esse procedimento compreende 7 passos (ver item 4.3.2), dos quais os seis primeiros já foram tratados anteriormente, e que envolvem desde a seleção da sub-rede que será foco da análise detalhada à produção de hierarquias para os indicadores de congestionamento e confiabilidade, além dos indicadores auxiliares de centralidade e carregamento.

O sétimo passo consiste da seleção dos n links mais críticos de cada uma das listas ordenadas, de forma a compor um elenco de links pré-selecionados compatível com os recursos disponíveis. Seguindo Oliveira *et al.* (2016), arbitrou-se um n tal que a quantidade final de links selecionadas fosse superior a 5% da sub-rede sob análise.

Para a presente aplicação testou-se $n = 50$ (o mesmo utilizado em Oliveira *et al.*, 2016), ou seja: são, em princípio, pré-selecionados os 50 links mais críticos das hierarquias produzidas a partir dos indicadores V/C, CI, ICE, BC e Carregamento. Tem-se, portanto, primeiramente, um conjunto de 250 links. Vários links participam de mais de uma lista, e, sendo assim, o conjunto é reduzido. De fato, retirando-se as duplicidades, são 117 os links distintos nessa primeira seleção; destes, 71 (61%) são selecionados a partir de mais de um indicador. Foram ainda excluídos das relações links que não acrescentariam informação às análises, como links consecutivos em um corredor interceptados por vias exclusivamente locais (33 links, ou 28% dos 117 iniciais). Dessa forma, resulta uma pré-seleção de 84 links, o que corresponde a 6,6% dos links da sub-rede, superior ao mínimo de 5% desejado e uma quantidade possível de ser analisada com os recursos disponíveis. É importante lembrar que esta não é uma amostra aleatória da sub-rede, mas sim um conjunto de links que, sob diferentes óticas, são críticos para o desempenho da rede viária. Após análise criteriosa da rede, não se julgou necessário acrescentar qualquer link ao conjunto pré-selecionado, que passou, portanto, a ser a seleção final de links para os quais serão determinados os indicadores de vulnerabilidade.

O Quadro 5.10 apresenta a relação dos 84 links selecionados. O campo *Link* apresenta uma numeração simplificada para identificação de cada link, em lugar do código *ID* do TransCAD, mais extenso. Pode ser observado que os links são numerados de 1 a 104 com descontinuidades, pois buscou-se manter consistência com a numeração adotada em fases anteriores do desenvolvimento da presente Tese. Dessa forma, foi mantida a compatibilidade de notação ao longo da pesquisa.

A Figura 5.12 apresenta, em destaque, os links selecionados de forma georreferenciada. Pode ser observado que há links selecionados em cada corredor cuja relevância foi identificada pelos indicadores considerados. Assim, as ligações externas da sub-área com o Centro, Zona Norte e São Conrado (Zona Oeste) estão presentes, assim como os principais corredores arteriais dos bairros de Copacabana, Botafogo, Humaitá, Lagoa, Jardim Botânico e Gávea. Conforme esperado, links de classe E, AP e AS são predominantes (93%), tendo sido selecionados ainda quatro links de classe C (coletora) e dois de classe L (local). Os links coletores e locais selecionados são provenientes das hierarquias derivadas dos atributos Congestionamento e Confiabilidade e suas características foram comentadas anteriormente.

Quadro 5.10 – Links selecionados para a análise detalhada.

Link	ID	Logradouro	Dir	Classe	Sentido	Link	ID	Logradouro	Dir	Classe	Sentido
1	99372	AUTO EST LAGOA BARRA	-1	E	BA	63	102057	AV VENCESLAU BRAZ	1	AP	AB
2	99693	AV PADRE LEONEL FRANCA	-1	AP	BA	64	102058	AV PASTEUR	-1	AP	BA
3	112652	AUTO EST LAGOA BARRA	-1	E	BA	65	102061	AV VENCESLAU BRAZ	1	AP	AB
5	99829	AV RODRIGO OTAVIO	1	AS	AB	66	99472	AUTO EST LAGOA BARRA	1	E	AB
6	99841	AV PADRE LEONEL FRANCA	-1	AP	BA	67	99473	AUTO EST LAGOA BARRA	1	E	AB
7	99844	AV BARTOLOMEU MITRE	1	AP	AB	68	100648	AV BORGES DE MEDEIROS	1	AP	AB
8	99845	R MARIO RIBEIRO	1	AP	AB	69	100679	AV BORGES DE MEDEIROS	1	AP	AB
9	99853	R JARDIM BOTANICO	0	AS	AB	70	100683	AV BORGES DE MEDEIROS	1	AP	AB
10	100257	AV BORGES DE MEDEIROS	1	AP	AB	71	100733	AV BORGES DE MEDEIROS	1	AP	AB
12	100421	AV EPITACIO PESSOA	1	AP	AB	72	100734	AV BORGES DE MEDEIROS	1	AP	AB
14	100601	R MIGUEL LEMOS	0	AP	AB	73	100752	AV BORGES DE MEDEIROS	-1	AP	BA
16	100639	AV BORGES DE MEDEIROS	1	AP	AB	74	100754	AV BORGES DE MEDEIROS	-1	AP	BA
17	100672	AV BORGES DE MEDEIROS	0	AP	AB	75	100862	AV EPITACIO PESSOA	0	AP	AB
20	100727	AV BORGES DE MEDEIROS	1	AP	AB	76	101122	TUN VELHO	0	AS	AB
21	100750	AV BORGES DE MEDEIROS	-1	AP	BA	77	101178	TUN VELHO	-1	AS	BA
23	100758	VD SAINT HILAIRE	-1	AP	BA	78	101189	R DR SAMPAIO CORREIA	1	AS	AB
25	100809	R JARDIM BOTANICO	0	AS	AB	79	101209	R REAL GRANDEZA	0	AS	BA
26	100810	R PROF SALDANHA	-1	AS	BA	80	101216	R GEN POLIDORO	-1	C	BA
30	100889	AV EPITACIO PESSOA	1	AP	AB	81	101698	AV PRINCESA ISABEL	-1	AP	BA
31	100928	VD SAINT HILAIRE	1	E	AB	82	101771	AV PRINCESA ISABEL	0	AP	BA
32	100947	R HUMAITA	1	AS	AB	83	101772	AV PRINCESA ISABEL	0	AP	BA
33	100949	R HUMAITA	0	L	BA	84	99793	AV PADRE LEONEL FRANCA	-1	AP	BA
34	100963	VD SAINT HILAIRE	1	E	AB	85	99800	AV PADRE LEONEL FRANCA	-1	AP	BA
35	100964	VD SAINT HILAIRE	1	AS	AB	86	99802	AV VISC DE ALBUQUERQUE	-1	AS	BA
36	101002	TUN ANTONIO REBOUCAS	-1	E	BA	87	99850	R MARIO RIBEIRO	1	AP	AB
37	101034	R HUMAITA	0	L	BA	88	99851	R MARIO RIBEIRO	1	AP	AB
39	101188	TUN VELHO	-1	AS	BA	89	100590	AV N SRA DE COPACABANA	1	AS	AB
40	101224	R GEN POLIDORO	-1	C	BA	90	100645	AV BORGES DE MEDEIROS	1	AP	AB
41	101233	TUN ANDRE REBOUCAS	-1	E	BA	91	100649	AV BORGES DE MEDEIROS	1	AP	AB
44	101696	R MIN VIVEIROS DE CASTRO	0	C	AB	92	100887	AV BORGES DE MEDEIROS	1	AP	AB
45	101697	AV PRINCESA ISABEL	0	AP	BA	93	100971	VD SAINT HILAIRE	-1	E	BA
46	101752	AV LAURO SODRE	0	AP	BA	94	100981	R HUMAITA	1	AS	AB
47	101773	AV PRINCESA ISABEL	-1	AP	BA	95	101395	R VOLUNTARIOS DA PATRIA	1	AS	AB
48	101785	R VOLUNTARIOS DA PATRIA	1	AS	AB	96	101486	AV N SRA DE COPACABANA	1	AS	AB
49	101789	R VOLUNTARIOS DA PATRIA	-1	AS	BA	97	101494	AV ATLANTICA	1	AP	AB
52	101896	AV DAS NACOES UNIDAS	0	AP	BA	98	101501	AV ATLANTICA	1	AP	AB
55	102025	AV LAURO SODRE	0	AP	BA	99	101654	AV ATLANTICA	1	AP	AB
56	102028	R GEN SEVERIANO	0	C	BA	100	101705	AV PRINCESA ISABEL	-1	AP	BA
57	102034	AV DAS NACOES UNIDAS	0	AP	BA	101	101934	AV REPORT NESTOR MOREIRA	-1	AP	BA
58	102036	AV DAS NACOES UNIDAS	0	AP	BA	102	102054	AV REPORT NESTOR MOREIRA	-1	AP	BA
59	102046	AV VENCESLAU BRAZ	1	AP	AB	103	102056	AV REPORT NESTOR MOREIRA	-1	AP	BA
61	102053	AV PASTEUR	-1	AP	BA	104	102237	AV INFANTE DOM HENRIQUE	-1	E	BA

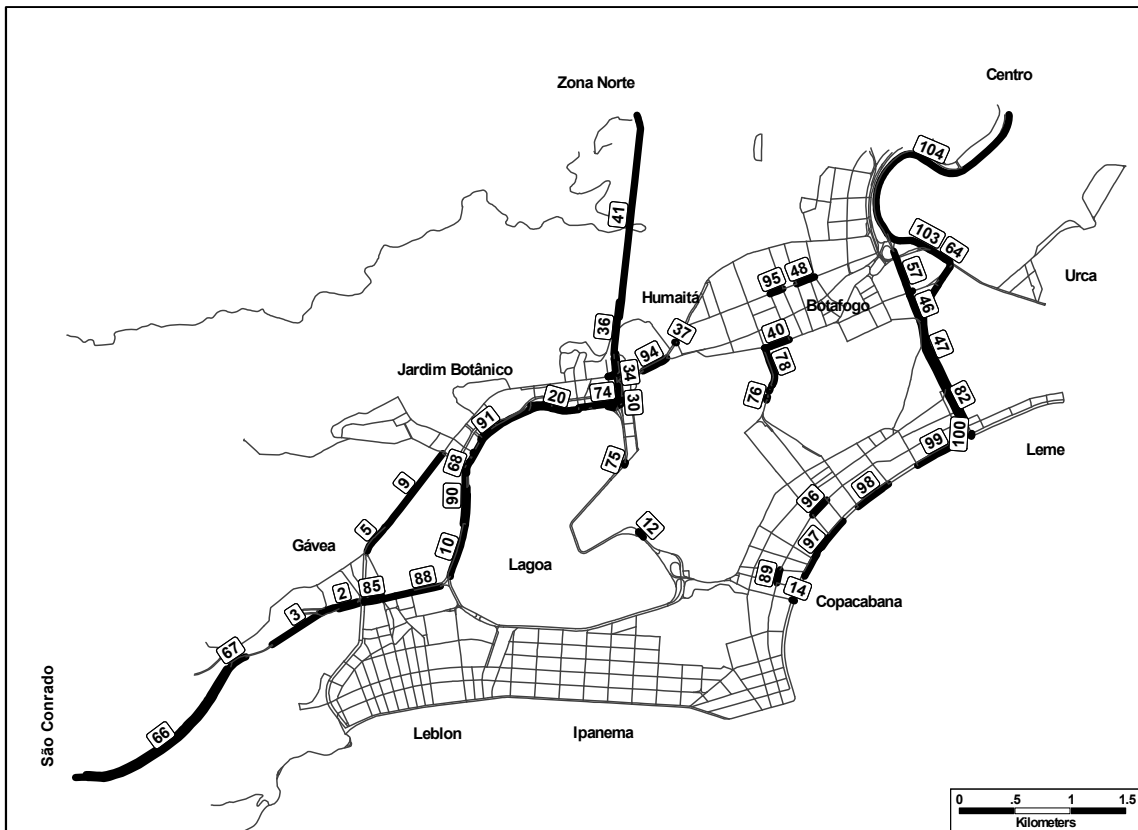


Figura 5.12 – Representação georreferenciada dos links selecionados.

5.8 Aplicação de procedimentos: Vulnerabilidade

Conforme discutido no Capítulo 4, foram selecionados dois indicadores para o atributo Vulnerabilidade: o NRI e o NRI-m. Ambos os indicadores exigem tantos processos de alocação de viagens quanto forem os links a analisar, no presente caso, 84 links. O procedimento para a determinação do indicador de vulnerabilidade de cada link é verificar a diferença de desempenho da rede viária nas situações com o link sob análise impactado por algum evento disruptivo e o desempenho em condições normais. O procedimento, de forma esquemática, e inserido na Etapa 2 da Estrutura Metodológica, é apresentado na Figura 5.13, destacado em cinza.

O parâmetro de desempenho utilizado foi o tempo total de viagem na rede, ou seja, o somatório dos tempos de viagem resultantes das viagens entre todos os pares de origem e destino na rede representativa da RMRJ (e não apenas na sub-rede). Assim, primeiramente foi realizado um processo de alocação de viagens com a rede íntegra e apurado esse tempo total (6.139.726 minutos), que serviu de referência para o cálculo dos indicadores de vulnerabilidade.

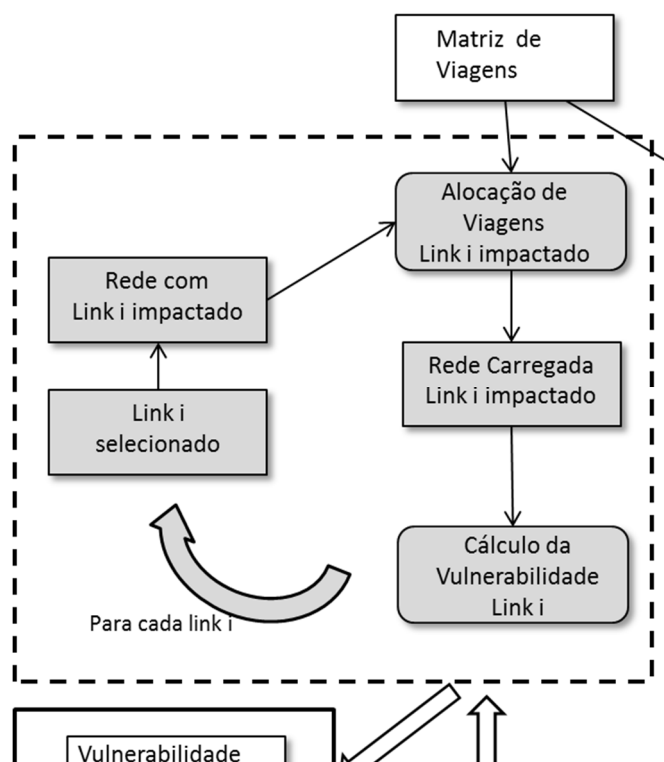


Figura 5.13 – Representação esquemática (em cinza) da inserção do procedimento de determinação dos indicadores de vulnerabilidade na Etapa 2 da Estrutura Metodológica.

5.8.1 Vulnerabilidade: determinação do indicador NRI

Para a determinação do indicador NRI para um determinado link, é realizada uma alocação de viagens à rede eliminando-se esse link. O TransCAD fornece, diretamente em seu relatório de controle, o total dos tempos de viagem na rede. O valor do indicador NRI é calculado para cada link subtraindo-se o tempo de referência (na rede íntegra) do tempo apurado na rede impactada (sem o link para o qual se calcula o NRI).

Para a determinação do NRI foram utilizados os mesmos métodos de alocação UE e parâmetros utilizados para a determinação dos indicadores de desempenho dos demais atributos.

O Quadro 5.11 apresenta a hierarquia produzida a partir do indicador NRI determinado para cada um dos links selecionados. A ordenação é decrescente em função do NRI, e, em caso de empate, prevaleceu o código do link (*ID*). Dessa forma, no topo da hierarquia estão os links mais críticos do ponto de vista da vulnerabilidade tal como medida pelo indicador NRI.

O NRI é normalmente positivo, já que se espera que, com um link bloqueado, o desempenho da rede deveria piorar, e, conseqüentemente os tempos de viagem

deveriam ser maiores. Observa-se, no entanto, que para o link 37 chegou-se a um NRI negativo. Esse valor pode ser atribuído a uma imprecisão intrínseca do método de alocação, já que o valor é muito pequeno (redução de 0,01% em relação ao tempo de referência) e pode ser considerado como próximo a zero. Outra explicação possível para o valor negativo é o “Paradoxo de Braess” (Braess *et al.*, 2005), que estabelece que algumas vezes a eliminação de um link pode melhorar o desempenho de uma rede.

É importante ainda ressaltar uma limitação do indicador NRI, referente a links que desconectam uma parte da rede. Nesse caso, tendo em vista que as viagens referentes aos pares de origem e destino desconectados não são alocadas, os valores obtidos para o NRI são subdimensionados. Na presente aplicação, se enquadram nesse caso os links 61, 63 e 64, que, se bloqueados, desconectam da rede o bairro da Urca.

Quadro 5.11 – Hierarquia de links segundo o indicador de vulnerabilidade NRI.
(continua)

Link	ID	Logradouro	NRI	HIERARQUIA
47	101773	AV PRINCESA ISABEL	664763	1
65	102061	AV VENCESLAU BRAZ	638080	2
41	101233	TUN ANDRE REBOUCAS	488660	3
61	102053	AV PASTEUR	413836	4
64	102058	AV PASTEUR	389777	5
36	101002	TUN ANTONIO REBOUCAS	369505	6
63	102057	AV VENCESLAU BRAZ	336102	7
81	101698	AV PRINCESA ISABEL	266457	8
59	102046	AV VENCESLAU BRAZ	254654	9
104	102237	AV INFANTE DOM HENRIQUE	236503	10
66	99472	AUTO EST LAGOA BARRA	193874	11
76	101122	TUN VELHO	182332	12
77	101178	TUN VELHO	182332	13
39	101188	TUN VELHO	182332	14
78	101189	R DR SAMPAIO CORREIA	182332	15
79	101209	R REAL GRANDEZA	182332	16
12	100421	AV EPITACIO PESSOA	168357	17
68	100648	AV BORGES DE MEDEIROS	159554	18
67	99473	AUTO EST LAGOA BARRA	154401	19
31	100928	VD SAINT HILAIRE	142398	20
16	100639	AV BORGES DE MEDEIROS	139207	21
10	100257	AV BORGES DE MEDEIROS	132713	22
34	100963	VD SAINT HILAIRE	129600	23
82	101771	AV PRINCESA ISABEL	89648	24
46	101752	AV LAURO SODRE	89051	25
83	101772	AV PRINCESA ISABEL	88264	26
93	100971	VD SAINT HILAIRE	85154	27
9	99853	R JARDIM BOTANICO	84701	28
5	99829	AV RODRIGO OTAVIO	84566	29
94	100981	R HUMAITA	77923	30
40	101224	R GEN POLIDORO	75385	31
80	101216	R GEN POLIDORO	71713	32
102	102054	AV REPORT NESTOR MOREIRA	71336	33
75	100862	AV EPITACIO PESSOA	71192	34
91	100649	AV BORGES DE MEDEIROS	70267	35
1	99372	AUTO EST LAGOA BARRA	67700	36
84	99793	AV PADRE LEONEL FRANCA	59547	37
2	99693	AV PADRE LEONEL FRANCA	56401	38

Quadro 5.11 Hierarquia de links segundo o indicador de vulnerabilidade NRI.
(continuação)

Link	ID	Logradouro	NRI	HIERARQUIA
3	112652	AUTO EST LAGOA BARRA	56401	39
49	101789	R VOLUNTARIOS DA PATRIA	54062	40
23	100758	VD SAINT HILAIRE	51751	41
20	100727	AV BORGES DE MEDEIROS	47732	42
98	101501	AV ATLANTICA	46632	43
48	101785	R VOLUNTARIOS DA PATRIA	45978	44
95	101395	R VOLUNTARIOS DA PATRIA	42514	45
97	101494	AV ATLANTICA	41828	46
73	100752	AV BORGES DE MEDEIROS	40239	47
21	100750	AV BORGES DE MEDEIROS	40023	48
74	100754	AV BORGES DE MEDEIROS	39048	49
56	102028	R GEN SEVERIANO	37813	50
30	100889	AV EPITACIO PESSOA	31751	51
32	100947	R HUMAITA	30372	52
99	101654	AV ATLANTICA	30161	53
57	102034	AV DAS NACOES UNIDAS	25151	54
71	100733	AV BORGES DE MEDEIROS	24377	55
72	100734	AV BORGES DE MEDEIROS	24356	56
69	100679	AV BORGES DE MEDEIROS	23728	57
70	100683	AV BORGES DE MEDEIROS	23728	58
25	100809	R JARDIM BOTANICO	23717	59
89	100590	AV N SRA DE COPACABANA	22745	60
55	102025	AV LAURO SODRE	22229	61
26	100810	R PROF SALDANHA	20908	62
35	100964	VD SAINT HILAIRE	20908	63
103	102056	AV REPORT NESTOR MOREIRA	19758	64
96	101486	AV N SRA DE COPACABANA	17303	65
92	100887	AV BORGES DE MEDEIROS	16013	66
90	100645	AV BORGES DE MEDEIROS	14165	67
100	101705	AV PRINCESA ISABEL	13752	68
101	101934	AV REPORT NESTOR MOREIRA	13522	69
45	101697	AV PRINCESA ISABEL	13347	70
17	100672	AV BORGES DE MEDEIROS	9703	71
88	99851	R MARIO RIBEIRO	6319	72
7	99844	AV BARTOLOMEU MITRE	6173	73
58	102036	AV DAS NACOES UNIDAS	4594	74
86	99802	AV VISC DE ALBUQUERQUE	3443	75
85	99800	AV PADRE LEONEL FRANCA	3232	76
52	101896	AV DAS NACOES UNIDAS	2567	77
33	100949	R HUMAITA	2071	78
6	99841	AV PADRE LEONEL FRANCA	1943	79
8	99845	R MARIO RIBEIRO	1881	80
87	99850	R MARIO RIBEIRO	1276	81
14	100601	R MIGUEL LEMOS	534	82
44	101696	R MIN VIVEIROS DE CASTRO	355	83
37	101034	R HUMAITA	-621	84

A Figura 5.14 apresenta graficamente a importância de cada link de acordo com o indicador de vulnerabilidade NRI. As espessuras das linhas representativas dos links são proporcionais aos valores obtidos para o indicador. Assim os links mais espessos são aqueles mais críticos para o desempenho segundo o atributo Vulnerabilidade.

Pode-se observar que se destacam os links pertencentes às chamadas seções de corte mínimo, ou seja, seções em que, com o menor número de links seccionados, se desconecta uma parte da rede. Assim, os túneis Novo (ligação entre Copacabana/Leme

e Botafogo) e Rebouças (ligação entre Jardim Botânico/Humaitá e Zona Norte) se destacam, e, em menor escala, os túneis Zuzu Angel (ligação entre Gávea e São Conrado) e Velho (ligação entre Copacabana e Botafogo). É visível também a importância dos links representativos do Aterro do Flamengo, linha expressa que liga Botafogo ao Centro.

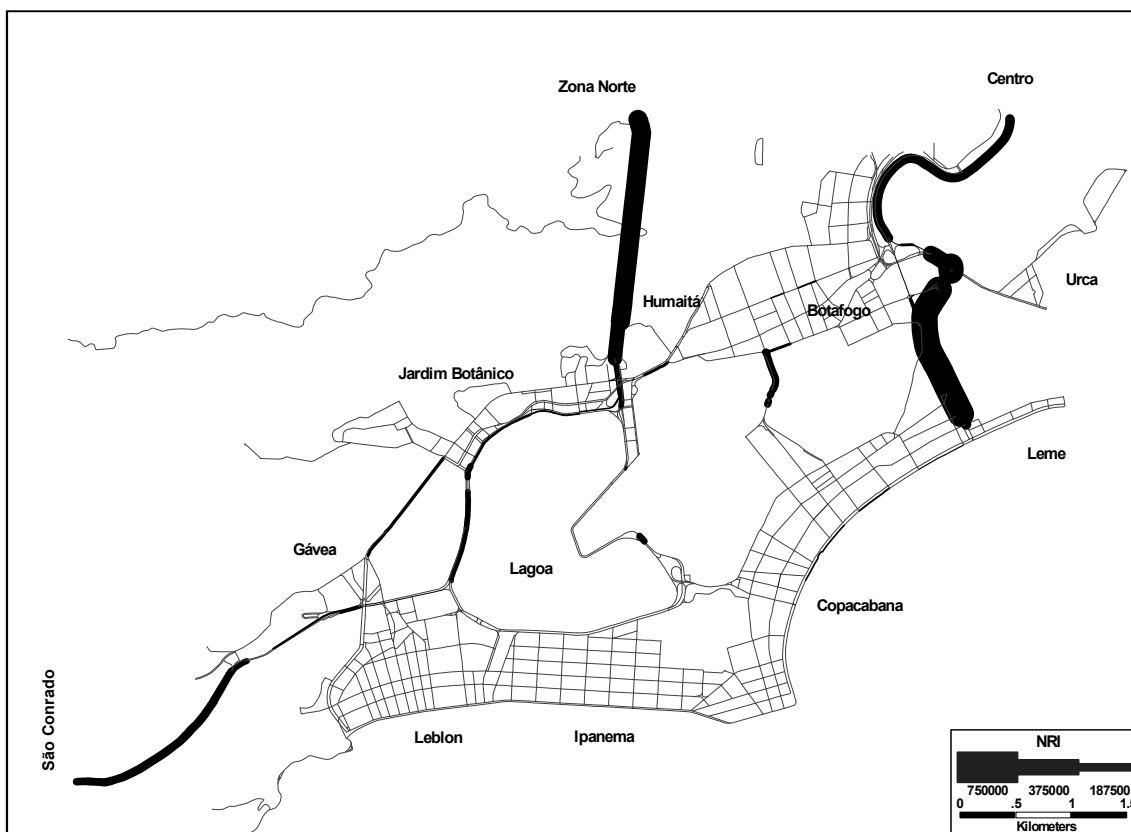


Figura 5.14 – Representação gráfica da vulnerabilidade segundo o indicador NRI.

5.8.2 Vulnerabilidade: determinação do indicador NRI-m

A determinação do indicador NRI-m difere daquela do NRI, por haver uma redução na capacidade do link sob análise, ao invés de seu completo bloqueio ou eliminação. Com essa exceção, o procedimento é o mesmo.

Para a escolha do percentual de redução da capacidade de cada link para a determinação do NRI-m, tomou-se como referência os experimentos de Sullivan *et al.* (2010), cujos resultados são apresentados no Capítulo 4 (Quadro 4.4). O índice gama de conectividade, portanto, é o parâmetro que norteia o percentual de redução a utilizar. Para a presente aplicação há alguns aspectos que merecem comentários, no que diz respeito ao cálculo do índice gama e que são relacionados a seguir:

- O índice gama é medida aplicável a redes planares. A rede da RMRJ utilizada na aplicação não é rigorosamente planar, com a presença de passagens em dois ou mais níveis;
- Ligações *dummy* a centroides são, frequentemente, não planares, e, na aplicação considerada, não há rotas através de centroides;
- A aplicação é realizada sobre rede representativa da Região Metropolitana do Rio de Janeiro, porém o foco da análise é sobre uma sub-rede representativa de parte da Zona Sul da cidade do Rio de Janeiro. Os índices gama calculados para a rede total e para a sub-rede são diferentes;
- A aplicação se restringe ao modo rodoviário, e, portanto, somente os links rodoviários devem ser considerados;
- Não foi encontrada menção a modificações no cálculo do índice gama para grafos orientados. A rede da presente aplicação, em particular a sub-rede foco da análise, possui uma quantidade significativa de links unidirecionais, o que pode impactar na conectividade da rede e não é captado pelo índice gama, tal como calculado por Sullivan *et al.* (2010).

Sullivan *et al.* (2010), em sua aplicação sobre exemplo de rede real, não fizeram qualquer consideração sobre os aspectos anteriormente elencados. De fato, a rede considerada tinha aproximadamente 1.791 links rodoviários (aí incluídos 202 links unidirecionais e 549 ligações *dummy* a centroides) e 1367 nós (aí incluídos 367 centroides), com um índice gama calculado como 0,44. Na presente aplicação foi seguido o mesmo procedimento adotado por Sullivan *et al.* (2010) para o cálculo do índice gama.

Dessa forma, com as ressalvas apresentadas, foram calculados índices gama para o grafo representativo da rede de simulação utilizada segundo diferentes premissas, como pode ser visto no Quadro 5.12.

Quadro 5.12 – Índices Gama para o grafo representativo da rede de simulação.

Rede	Nós	Arestas	Bidirecionais	Gama
Rede RMRJ total	21.586	33.589	23.633	0,52
Rede RMRJ, só links rodoviários	21.104	31.718	21.756	0,50
Sub-rede de análise total	860	1.373	357	0,53
Sub-rede de análise só links rodoviários	834	1.266	250	0,51

É importante notar que o software de simulação utilizado (TransCAD), trata links bidirecionais como dois links independentes, e, portanto, a quantidade de links reportados nos relatórios de simulação é superior ao número de arestas representados no Quadro 5.12 e corresponde à soma das colunas *Arestas* e *Bidirecionais*. Para o cálculo do índice gama, utilizou-se o número de arestas, independentemente de se tratarem de ligações uni ou bidirecionais, da mesma forma como realizado no experimento de Sullivan *et al.* (2010).

Pelo Quadro 5.12, verifica-se que, seja considerando-se a totalidade da rede de simulação, seja considerando-se apenas a sub-rede de análise, o índice gama fica entre 0,50 e 0,53. Dessa forma, a redução recomendada, tomando-se como referência o Quadro 4.4 (Capítulo 4) é algo entre 80 e 75%, como verificado para as Redes 3 e 4, daquele quadro. Para a presente aplicação, foi, portanto, aplicada uma redução de 77,5%, valor intermediário da faixa recomendada, para a determinação do NRI-m.

O Quadro 5.13 apresenta a hierarquia produzida a partir do indicador NRI-m determinado para cada um dos links selecionados. A ordenação é decrescente em função do NRI-m, e, em caso de empate, prevaleceu o código do link (*ID*). Dessa forma, no topo da hierarquia estão os links mais críticos do ponto de vista da vulnerabilidade tal como medida pelo indicador NRI-m.

À semelhança do NRI, o NRI-m é normalmente positivo, já que, com a redução da capacidade de um de seus links, o desempenho da rede deveria piorar e, conseqüentemente, os tempos de viagem deveriam ser maiores. Observa-se, no entanto, que para os links 8 e 33, foram encontrados NRI-m negativos. São valores muito pequenos (reduções de cerca de 0,01% em relação ao tempo de referência). As explicações possíveis são as mesmas elencadas quando foram analisados os valores negativos encontrados para o NRI: possível imprecisão intrínseca do processo de alocação ou o “Paradoxo de Braess”. O link 37, com valor NRI negativo, tem NRI-m muito pequeno e as posições nas hierarquias são, respectivamente 84 e 79. Quanto aos links com NRI-m negativo (posições 83 e 84 na hierarquia derivada do NRI-m) se apresentam nas posições 78 e 80 na hierarquia derivada do NRI. Tratam-se, portanto, de links de pouca relevância para a vulnerabilidade independentemente do indicador considerado.

Por não implicar em bloqueio total do link sob análise, a determinação do NRI-m não envolve desconexão de parte da rede em nenhum caso. Os links 61, 63 e 64, que

provocaram desconexão de parte da rede durante a determinação do NRI aparecem no topo de ambas hierarquias baseadas na vulnerabilidade: posições 4, 5 e 7 (NRI) e 2, 3 e 6 (NRI-m). Percebe-se, portanto, que a desconexão pouco influenciou no que se refere à posição hierárquica, provavelmente por que a demanda da região desconectada é pequena.

Quadro 5.13 – Hierarquia de links segundo o indicador de vulnerabilidade NRI-m.
(continua)

Link	ID	Logradouro	NRI-m	HIERARQUIA
47	101773	AV PRINCESA ISABEL	396144	1
63	102057	AV VENCESLAU BRAZ	323333	2
61	102053	AV PASTEUR	191340	3
65	102061	AV VENCESLAU BRAZ	159762	4
41	101233	TUN ANDRE REBOUCAS	155468	5
64	102058	AV PASTEUR	122379	6
78	101189	R DR SAMPAIO CORREIA	115645	7
36	101002	TUN ANTONIO REBOUCAS	92917	8
10	100257	AV BORGES DE MEDEIROS	81079	9
16	100639	AV BORGES DE MEDEIROS	80483	10
81	101698	AV PRINCESA ISABEL	78062	11
59	102046	AV VENCESLAU BRAZ	72523	12
104	102237	AV INFANTE DOM HENRIQUE	68592	13
76	101122	TUN VELHO	67981	14
12	100421	AV EPITACIO PESSOA	63826	15
83	101772	AV PRINCESA ISABEL	62948	16
68	100648	AV BORGES DE MEDEIROS	59019	17
77	101178	TUN VELHO	56737	18
9	99853	R JARDIM BOTANICO	56582	19
46	101752	AV LAURO SODRE	55264	20
82	101771	AV PRINCESA ISABEL	54304	21
5	99829	AV RODRIGO OTAVIO	46398	22
66	99472	AUTO EST LAGOA BARRA	45389	23
39	101188	TUN VELHO	43347	24
91	100649	AV BORGES DE MEDEIROS	42296	25
79	101209	R REAL GRANDEZA	39652	26
31	100928	VD SAINT HILAIRE	37101	27
34	100963	VD SAINT HILAIRE	34778	28
94	100981	R HUMAITA	33988	29
40	101224	R GEN POLIDORO	31009	30
20	100727	AV BORGES DE MEDEIROS	25559	31
23	100758	VD SAINT HILAIRE	21879	32
97	101494	AV ATLANTICA	20125	33
48	101785	R VOLUNTARIOS DA PATRIA	18976	34
74	100754	AV BORGES DE MEDEIROS	18963	35
102	102054	AV REPORT NESTOR MOREIRA	18924	36
80	101216	R GEN POLIDORO	18795	37
95	101395	R VOLUNTARIOS DA PATRIA	18451	38
93	100971	VD SAINT HILAIRE	17829	39
49	101789	R VOLUNTARIOS DA PATRIA	16436	40
73	100752	AV BORGES DE MEDEIROS	16386	41
57	102034	AV DAS NACOES UNIDAS	16200	42
98	101501	AV ATLANTICA	14898	43
21	100750	AV BORGES DE MEDEIROS	14237	44
67	99473	AUTO EST LAGOA BARRA	13587	45
35	100964	VD SAINT HILAIRE	12058	46
56	102028	R GEN SEVERIANO	11847	47
99	101654	AV ATLANTICA	11030	48
72	100734	AV BORGES DE MEDEIROS	10749	49
84	99793	AV PADRE LEONEL FRANCA	10652	50
71	100733	AV BORGES DE MEDEIROS	10595	51
70	100683	AV BORGES DE MEDEIROS	10126	52
25	100809	R JARDIM BOTANICO	9846	53
75	100862	AV EPITACIO PESSOA	9421	54
92	100887	AV BORGES DE MEDEIROS	8807	55
103	102056	AV REPORT NESTOR MOREIRA	8472	56

Quadro 5.13 Hierarquia de links segundo o indicador de vulnerabilidade NRI-m.
(continuação)

Link	ID	Logradouro	NRI-m	HIERARQUIA
89	100590	AV N SRA DE COPACABANA	8447	57
55	102025	AV LAURO SODRE	8374	58
90	100645	AV BORGES DE MEDEIROS	8225	59
96	101486	AV N SRA DE COPACABANA	8008	60
45	101697	AV PRINCESA ISABEL	7816	61
2	99693	AV PADRE LEONEL FRANCA	6562	62
30	100889	AV EPITACIO PESSOA	6348	63
101	101934	AV REPORT NESTOR MOREIRA	6152	64
1	99372	AUTO EST LAGOA BARRA	5892	65
32	100947	R HUMAITA	5739	66
26	100810	R PROF SALDANHA	4986	67
88	99851	R MARIO RIBEIRO	3899	68
69	100679	AV BORGES DE MEDEIROS	3438	69
3	112652	AUTO EST LAGOA BARRA	3195	70
100	101705	AV PRINCESA ISABEL	3017	71
17	100672	AV BORGES DE MEDEIROS	2705	72
58	102036	AV DAS NACOES UNIDAS	2210	73
14	100601	R MIGUEL LEMOS	1916	74
52	101896	AV DAS NACOES UNIDAS	1660	75
85	99800	AV PADRE LEONEL FRANCA	1622	76
6	99841	AV PADRE LEONEL FRANCA	1390	77
7	99844	AV BARTOLOMEU MITRE	1390	78
37	101034	R HUMAITA	1273	79
86	99802	AV VISC DE ALBUQUERQUE	1093	80
44	101696	R MIN VIVEIROS DE CASTRO	843	81
87	99850	R MARIO RIBEIRO	754	82
8	99845	R MARIO RIBEIRO	-200	83
33	100949	R HUMAITA	-862	84

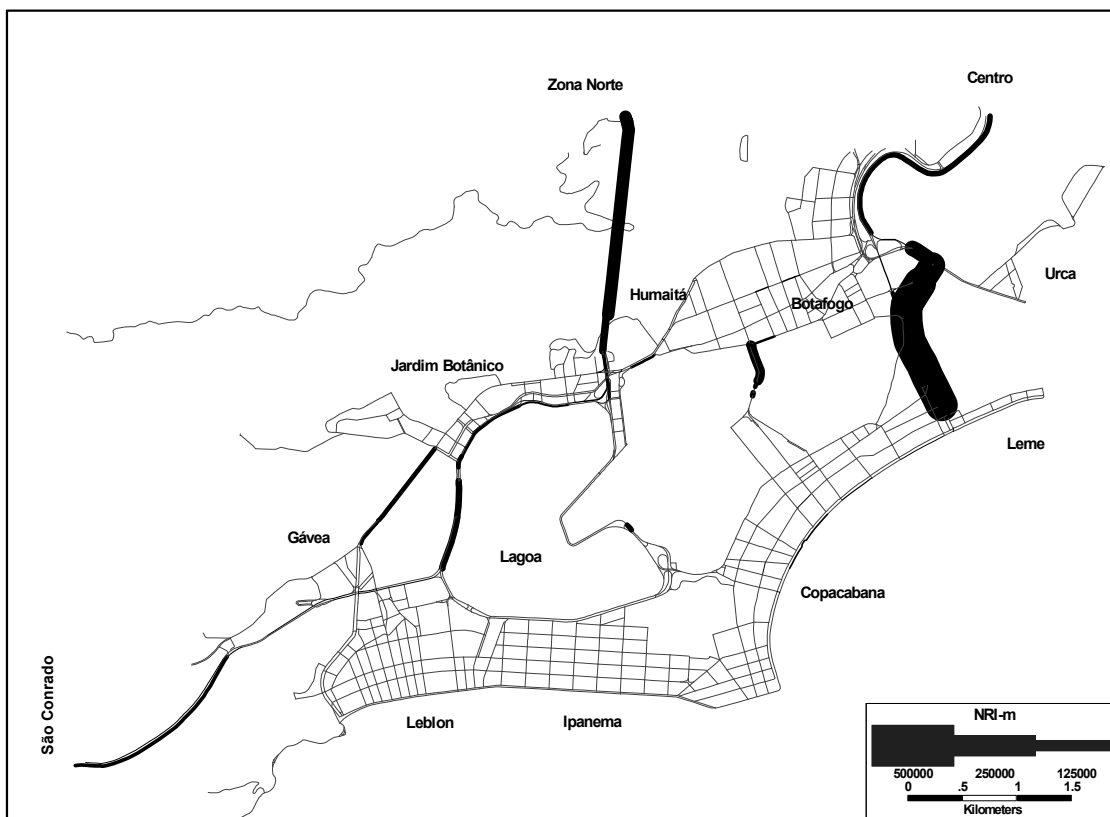


Figura 5.15 – Representação gráfica da vulnerabilidade segundo o indicador NRI-m.

A Figura 5.15 apresenta graficamente a importância de cada link de acordo com o indicador de vulnerabilidade NRI-m. As espessuras das linhas representativas dos links são proporcionais aos valores obtidos para o indicador. Assim os links mais espessos dão aqueles mais críticos para o desempenho segundo o atributo Vulnerabilidade.

A apresentação gráfica dos resultados obtidos a partir do NRI-m se assemelham àqueles obtidos para o NRI, e, em linhas gerais valem as mesmas observações. Os links do corredor Leme/Copacabana – Botafogo, e que incluem o Túnel Novo, se destacam mais nitidamente, no entanto.

5.9 Resultados – Síntese

Foi mostrada no presente Capítulo uma aplicação da Estrutura Metodológica proposta no Capítulo 4 e determinados indicadores para os atributos Congestionamento (V/C e CI), Confiabilidade (ICE) e Vulnerabilidade (NRI e NRI-m), além dos indicadores auxiliares BC e Congestionamento. Foi possível observar semelhanças entre os resultados produzidos para um mesmo atributo, ainda que a partir de indicadores diferentes.

O Quadro 5.14 sintetiza os resultados obtidos para as hierarquias dos três atributos, segundo os indicadores considerados, ordenados pelo código simplificado do link. São apresentadas ainda as hierarquias derivadas dos indicadores auxiliares BC e Congestionamento. Cada hierarquia foi dividida em quatro conjuntos de links, delimitadas por quartis calculados a partir dos postos que ocupam naquela hierarquia. Os postos inferiores ao primeiro quartil receberam a cor azul; entre o primeiro e segundo quartis, a cor verde; entre o segundo e terceiro quartis, a cor laranja; e, finalmente, os postos superiores ao terceiro quartil, a cor marrom avermelhada.

Pelo código de cores percebe-se visualmente uma maior semelhança entre as hierarquias derivadas de um mesmo atributo (V/C e CI; NRI e NRI-m) e uma maior diferença entre as hierarquias derivadas de atributos distintos.

As Figuras 5.16 a 5.17 apresentam a representação gráfica da rede viária segundo os indicadores dos três atributos, ressaltando-se que, no caso da vulnerabilidade, apenas links selecionados são destacados.

O Capítulo 6, a seguir, faz uma análise mais detalhada dos resultados dando continuidade à presente aplicação da Estrutura Metodológica proposta.

Quadro 5.14 – Posições hierárquicas segundo cada um dos indicadores testados.
(continua)

Link	Congestionamento		Confiabilidade	Vulnerabilidade		Auxiliares	
	V/C	CI	ICE	NRI	NRI-m	BC	Carreg
1	84	84	84	36	65	28	50
2	57	55	58	38	62	21	15
3	83	83	83	39	70	22	16
5	34	36	53	29	22	57	64
6	80	79	78	79	77	29	45
7	37	39	23	73	78	52	46
8	81	80	77	80	83	23	66
9	35	38	60	28	19	58	65
10	25	27	43	22	9	26	38
12	19	21	14	17	15	37	35
14	12	14	2	82	74	66	77
16	23	26	33	21	10	18	36
17	68	64	51	71	72	17	71
20	52	52	57	42	31	12	57
21	38	41	32	48	44	6	47
23	15	18	17	41	32	9	32
25	33	34	40	59	53	33	63
26	28	29	15	62	67	35	59
30	27	28	13	51	63	38	39
31	55	65	65	20	27	3	10
32	58	57	50	52	66	34	26
33	31	13	9	78	84	40	83
34	59	70	69	23	28	5	13
35	29	30	47	63	46	36	60
36	60	72	73	6	8	1	1
37	77	56	45	84	79	71	84
39	8	10	3	14	24	75	42
40	44	35	49	31	30	82	72
41	64	73	80	3	5	2	2
44	36	31	24	83	81	83	82
45	45	40	37	70	61	56	53
46	3	4	12	25	20	44	74
47	13	15	34	1	1	72	6
48	21	22	35	44	34	49	25
49	17	19	25	40	40	50	24
52	14	11	8	77	75	69	78
55	32	32	18	61	58	47	80
56	26	17	19	50	47	67	81
57	16	16	29	54	42	48	79
58	1	1	1	74	73	42	70
59	22	24	21	9	12	60	9
61	18	20	26	4	3	61	7
63	2	2	6	7	2	62	4
64	30	33	20	5	6	63	11
65	11	12	5	2	4	84	5
66	73	77	81	11	23	31	17
67	74	78	75	19	45	32	18
68	24	25	27	18	17	19	37
69	47	47	28	57	69	15	55
70	48	48	39	58	52	16	56
71	41	45	44	55	51	10	51
72	42	44	38	56	49	11	52
73	39	42	36	47	41	7	48
74	40	43	46	49	35	8	49
75	53	53	31	34	54	39	58
76	6	9	10	12	14	73	40
77	7	7	7	13	18	74	41
78	9	6	30	15	7	76	43
79	10	8	4	16	26	77	44

Quadro 5.14 Posições hierárquicas segundo cada um dos indicadores testados.
(continuação)

Link	Congestionamento		Confiabilidade	Vulnerabilidade		Auxiliares	
	V/C	CI	ICE	NRI	NRI-m	BC	Carreg
80	51	37	42	32	37	81	73
81	20	23	22	8	11	59	8
82	4	3	11	24	21	45	75
83	5	5	16	26	16	46	76
84	69	66	62	37	50	30	23
85	75	74	71	76	76	27	29
86	49	46	41	75	80	55	68
87	82	81	79	81	82	24	67
88	78	76	74	72	68	25	62
89	70	68	68	60	57	43	33
90	62	59	64	67	59	14	69
91	46	50	56	35	25	20	54
92	54	54	52	66	55	13	61
93	56	67	63	27	39	4	12
94	67	61	67	30	29	41	28
95	43	49	54	45	38	51	31
96	71	69	72	65	60	70	34
97	76	75	76	46	33	65	30
98	72	71	70	43	43	64	27
99	65	63	66	53	48	53	21
100	66	62	55	68	71	54	22
101	61	58	59	69	64	78	19
102	50	51	48	33	36	79	14
103	63	60	61	64	56	80	20
104	79	82	82	10	13	68	3

Azul: postos inferiores ao 1º. quartil; Verde: postos entre o 1º. e 2º. quartis; Laranja: postos entre o 2º. e 3º. quartis; Marrom avermelhado: postos superiores ao 3º. quartil.

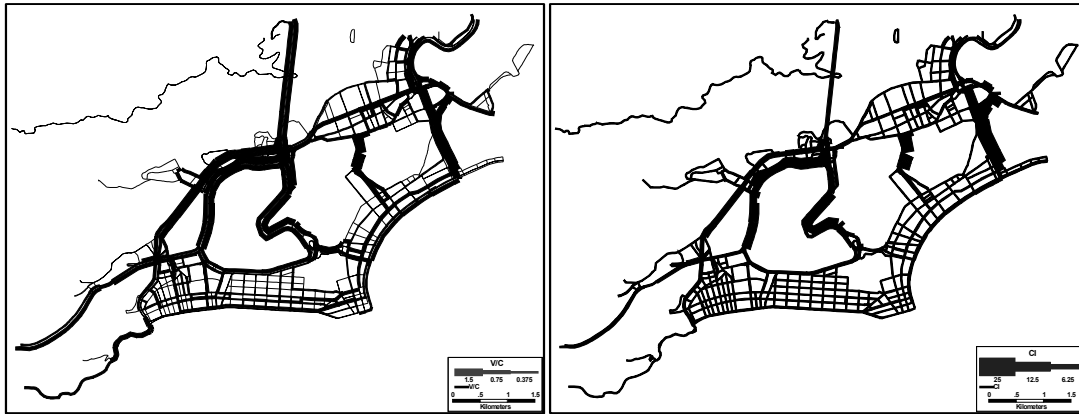


Figura 5.16 – Representação gráfica do congestionamento segundo os indicadores V/C (à esquerda) e CI (à direita), para toda a sub-rede de estudo.

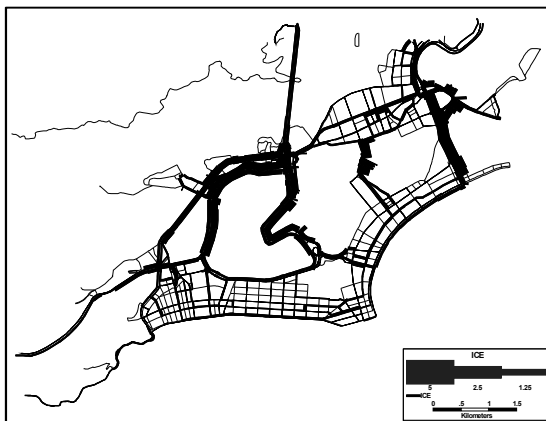


Figura 5.17 – Representação gráfica da importância para a confiabilidade segundo o indicador ICE, para toda a sub-rede de estudo.

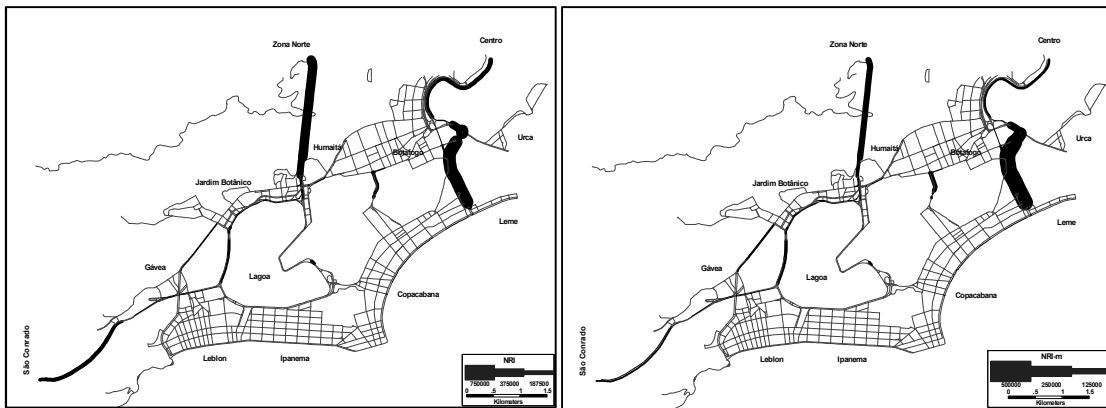


Figura 5.18 – Representação gráfica da vulnerabilidade segundo os indicadores NRI (à esquerda) e NRI-m (à direita), apenas para os links selecionados.

6. ANÁLISE DE RESULTADOS

6.1 Considerações iniciais

O presente capítulo consiste na Etapa 3 da Estrutura Metodológica, que compreende a análise dos resultados produzidos na Etapa 2 e apresentados no Capítulo 5. O procedimento tem aspectos numéricos e qualitativos e visa verificar semelhanças e diferenças entre as hierarquias dos links críticos para os atributos e respectivos indicadores, um dos objetivos da presente pesquisa. A análise é realizada especificamente com base nos indicadores produzidos para os 84 links selecionados (ver item 5.7), considerados como potencialmente mais críticos sob a ótica dos três atributos testados.

Dessa forma, primeiramente, é verificado se há a coerência entre os resultados obtidos a partir de indicadores diferentes de um mesmo atributo, caso de Congestionamento e Vulnerabilidade. Em seguida, é verificada a existência ou não de correlação entre os resultados obtidos a partir de diferentes atributos, o que é feito analisando-se as combinações de indicadores entre cada par de atributos. Os testes estatísticos utilizados são aqueles propostos pela Estrutura Metodológica e descritos no Capítulo 4 (item 4.4.1). Finalmente, são realizadas análises qualitativas quanto aos resultados derivados dos diferentes atributos e indicadores, baseadas em análises das hierarquias e em representações gráficas.

O Quadro 6.1 sumariza os resultados obtidos após a Etapa 2 para os cinco indicadores utilizados. São apresentados tanto os valores absolutos dos indicadores quanto as posições hierárquicas derivadas desses valores (representando sua importância relativa para o desempenho da rede viária), ordenados pelos identificadores dos links.

Quadro 6.1 – Resultados obtidos, por indicador (continua).

Link	Indicadores					Posições Hierárquicas				
	Congestionamento		Confiab.	Vulnerabilidade		Congestionamento		Confiab.	Vulnerabilidade	
	V/C	CI	ICE	NRI	NRI-m	V/C	CI	ICE	NRI	NRI-m
1	0,3020	1,0217	0,0392	67700	5892	84	84	84	36	65
2	0,9623	3,5957	0,7855	56401	6562	57	55	58	38	62
3	0,3897	1,0531	0,0747	56401	3195	83	83	83	39	70
5	1,1793	6,7808	0,9502	84566	46398	34	36	53	29	22
6	0,6190	1,4850	0,3338	1943	1390	80	79	78	79	77
7	1,1328	5,8452	1,7678	6173	1390	37	39	23	73	78
8	0,6163	1,4574	0,3392	1881	-200	81	80	77	80	83

Quadro 6.1 – Resultados obtidos, por indicador (continuação).

Link	Indicadores					Posições Hierárquicas				
	Congestionamento		Confiab.	Vulnerabilidade		Congestionamento		Confiab.	Vulnerabilidade	
	V/C	CI	ICE	NRI	NRI-m	V/C	CI	ICE	NRI	NRI-m
9	1,1567	6,3735	0,7358	84701	56582	35	38	60	28	19
10	1,2757	8,4421	1,2718	132713	81079	25	27	43	22	9
12	1,3148	9,5031	2,0667	168357	63826	19	21	14	17	15
14	1,4448	12,5436	3,0944	534	1916	12	14	2	82	74
16	1,2842	8,6334	1,3924	139207	80483	23	26	33	21	10
17	0,8620	2,6600	1,1013	9703	2705	68	64	51	71	72
20	1,0585	4,6131	0,8373	47732	25559	52	52	57	42	31
21	1,1286	5,7732	1,4606	40023	14237	38	41	32	48	44
23	1,3664	10,6942	1,9469	51751	21879	15	18	17	41	32
25	1,1990	7,2221	1,2917	23717	9846	33	34	40	59	53
26	1,2567	8,2700	2,0068	20908	4986	28	29	15	62	67
30	1,2593	8,3083	2,1078	31751	6348	27	28	13	51	63
31	1,0276	2,5934	0,5692	142398	37101	55	65	65	20	27
32	0,9492	3,5035	1,1020	30372	5739	58	57	50	52	66
33	1,2265	12,6524	2,5436	2071	-862	31	13	9	78	84
34	0,9489	2,2005	0,4740	129600	34778	59	70	69	23	28
35	1,2567	8,2683	1,1559	20908	12058	29	30	47	63	46
36	0,9315	2,1319	0,4148	369505	92917	60	72	73	6	8
37	0,6956	3,5717	1,2401	-621	1273	77	56	45	84	79
39	1,5062	15,2857	3,0611	182332	43347	8	10	3	14	24
40	1,1047	7,0381	1,1030	75385	31009	44	35	49	31	30
41	0,8855	1,9490	0,2906	488660	155468	64	73	80	3	5
44	1,1426	8,1891	1,7408	355	843	36	31	24	83	81
45	1,1037	5,7936	1,3276	13347	7816	45	40	37	70	61
46	1,5377	17,9001	2,3734	89051	55264	3	4	12	25	20
47	1,4358	12,4973	1,3923	664763	396144	13	15	34	1	1
48	1,2983	9,0797	1,3318	45978	18976	21	22	35	44	34
49	1,3454	10,2826	1,7270	54062	16436	17	19	25	40	40
52	1,4298	13,8216	2,6174	2567	1660	14	11	8	77	75
55	1,2122	7,8430	1,9461	22229	8374	32	32	18	61	58
56	1,2753	10,7150	1,8664	37813	11847	26	17	19	50	47
57	1,3544	11,4297	1,6996	25151	16200	16	16	29	54	42
58	1,7301	27,3243	5,7699	4594	2210	1	1	1	74	73
59	1,2968	8,7017	1,8293	254654	72523	22	24	21	9	12
61	1,3325	9,6893	1,7252	413836	191340	18	20	26	4	3
63	1,5910	18,0365	2,7397	336102	323333	2	2	6	7	2
64	1,2476	7,7140	1,8509	389777	122379	30	33	20	5	6
65	1,4688	13,4521	2,8150	638080	159762	11	12	5	2	4
66	0,7622	1,5586	0,2162	193874	45389	73	77	81	11	23

Quadro 6.1 – Resultados obtidos, por indicador (continuação).

Link	Indicadores					Posições Hierárquicas				
	Congestionamento		Confiab.	Vulnerabilidade		Congestionamento		Confiab.	Vulnerabilidade	
	V/C	CI	ICE	NRI	NRI-m	V/C	CI	ICE	NRI	NRI-m
67	0,7622	1,5580	0,3430	154401	13587	74	78	75	19	45
68	1,2842	8,6352	1,7106	159554	59019	24	25	27	18	17
69	1,1024	5,3493	1,7032	23728	3438	47	47	28	57	69
70	1,1024	5,3481	1,3019	23728	10126	48	48	39	58	52
71	1,1093	5,4648	1,2484	24377	10595	41	45	44	55	51
72	1,1093	5,4667	1,3214	24356	10749	42	44	38	56	49
73	1,1243	5,7075	1,3313	40239	16386	39	42	36	47	41
74	1,1243	5,7057	1,2002	39048	18963	40	43	46	49	35
75	1,0478	4,5778	1,5274	71192	9421	53	53	31	34	54
76	1,5062	15,2989	2,4926	182332	67981	6	9	10	12	14
77	1,5062	15,3013	2,6758	182332	56737	7	7	7	13	18
78	1,5062	15,3029	1,5607	182332	115645	9	6	30	15	7
79	1,5062	15,3000	3,0153	182332	39652	10	8	4	16	26
80	1,0763	6,5480	1,2833	71713	18795	51	37	42	32	37
81	1,3109	9,0115	1,8066	266457	78062	20	23	22	8	11
82	1,5377	17,9032	2,4262	89648	54304	4	3	11	24	21
83	1,5377	17,8987	1,9773	88264	62948	5	5	16	26	16
84	0,8434	2,5658	0,5967	59547	10652	69	66	62	37	50
85	0,7206	1,8332	0,4402	3232	1622	75	74	71	76	76
86	1,0939	5,3656	1,2894	3443	1093	49	46	41	75	80
87	0,6133	1,4487	0,3205	1276	754	82	81	79	81	82
88	0,6896	1,7119	0,3641	6319	3899	78	76	74	72	68
89	0,8060	2,3540	0,4740	22745	8447	70	68	68	60	57
90	0,9030	2,9843	0,5811	14165	8225	62	59	64	67	59
91	1,1036	5,2370	0,8459	70267	42296	46	50	56	35	25
92	1,0463	4,4532	1,0212	16013	8807	54	54	52	66	55
93	1,0102	2,4989	0,5834	85154	17829	56	67	63	27	39
94	0,8749	2,8115	0,4868	77923	33988	67	61	67	30	29
95	1,1064	5,3340	0,9371	42514	18451	43	49	54	45	38
96	0,7988	2,3083	0,4252	17303	8008	71	69	72	65	60
97	0,7186	1,8287	0,3396	41828	20125	76	75	76	46	33
98	0,7887	2,1818	0,4636	46632	14898	72	71	70	43	43
99	0,8775	2,7655	0,5512	30161	11030	65	63	66	53	48
100	0,8775	2,7707	0,9177	13752	3017	66	62	55	68	71
101	0,9136	3,0168	0,7577	13522	6152	61	58	59	69	64
102	1,0830	4,9407	1,1554	71336	18924	50	51	48	33	36
103	0,8902	2,8200	0,6700	19758	8472	63	60	61	64	56
104	0,6518	1,3233	0,1563	236503	68592	79	82	82	10	13

Foram ainda calculados os quartis para os postos em cada hierarquia, criando os agrupamentos apresentados no Quadro 6.2, base para as análises por quartis presentes em cada análise comparativa realizada.

Quadro 6.2 – Agrupamentos de links com base em quartis.

Agrupamento	Descrição
H1	Links com postos inferiores ao primeiro quartil: postos de 1 a 21
H2	Links com postos entre o primeiro e segundo quartis: postos de 22 a 42
H3	Links com postos entre o segundo e terceiro quartis: postos de 43 a 63
H4	Links com postos superiores ao terceiro quartil: postos de 64 a 84

6.2 Análise comparativa: indicadores de congestionamento

São dois os indicadores de congestionamento utilizados, o V/C e o CI. Por se tratarem de indicadores derivados de um mesmo atributo de desempenho, espera-se que haja coerência entre os resultados apresentados por um e por outro. Dessa forma, as hierarquias produzidas deveriam ser semelhantes.

Algumas das principais características estatísticas do conjunto de indicadores dos links analisados são apresentadas no Quadro 6.3.

Quadro 6.3 – Características dos links analisados, quanto a V/C e CI.

Estatística	V/C	CI
Média	1,1020	7,0289
Desvio Padrão	0,2889	5,2125
Coefficiente de Variação (CV)	0,2622	0,7416

O Coeficiente de Variação é uma medida da variabilidade da amostra em relação à média. Não há um consenso quanto à sua interpretação, com diferentes autores recomendando que escalas específicas sejam utilizadas conforme a aplicação (Garcia, 1989; Mohallem, 2008). No entanto, na bibliográfica analisada é recorrente a referência a uma escala proposta por Pimentel-Gomes (1985, *apud* Garcia, 1989 e Mohallem, 2008), onde CV abaixo de 10% seria baixo, entre 10 e 20% seria médio; entre 20 e 30% seria alto; e acima de 30% seria muito alto. A variabilidade, por esse padrão, seria alta (V/C) ou muito alta (CI). O que pode ser afirmado, de fato, é que a dispersão dos valores

de CI é maior do que aqueles determinados para V/C. A média obtida para V/C, superior à unidade, sugere um conjunto de links em uma rede supersaturada. De fato, do conjunto de links selecionados, 67% estão supersaturados. Considerando-se toda a sub-rede de análise, cerca de 6% dos links tem $V/C > 1$, cobrindo alguns dos principais corredores arteriais da região.

A Figura 6.1 mostra um gráfico de dispersão com o indicador CI em função de V/C. Foi encontrado um bom ajuste para uma curva exponencial, com $R^2 = 0,9451$. Foi investigado ainda um ajuste linear, através de uma transformação logarítmica, com a Figura 6.2 apresentando o gráfico resultante.

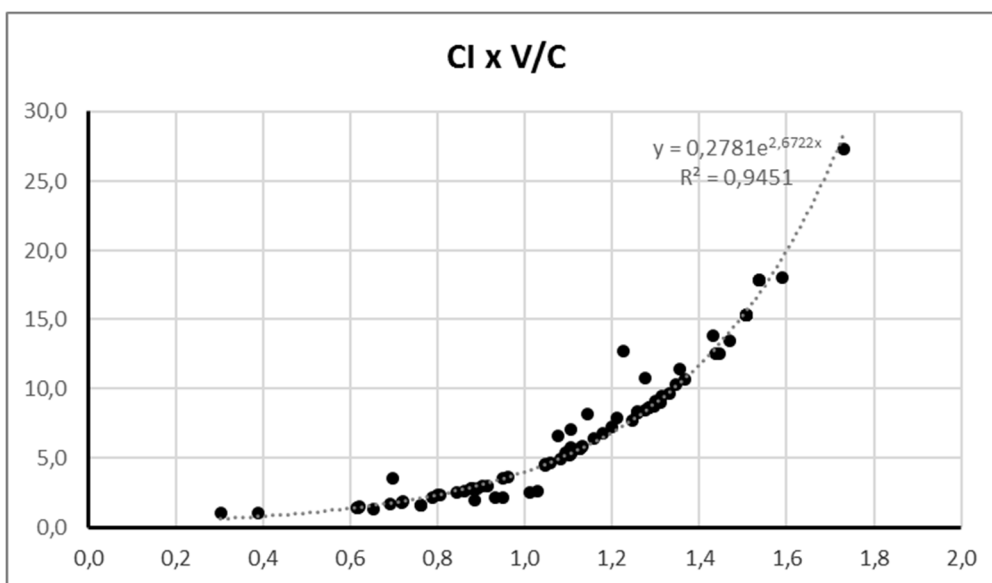


Figura 6.1 – Gráfico de dispersão: CI em função de V/C.

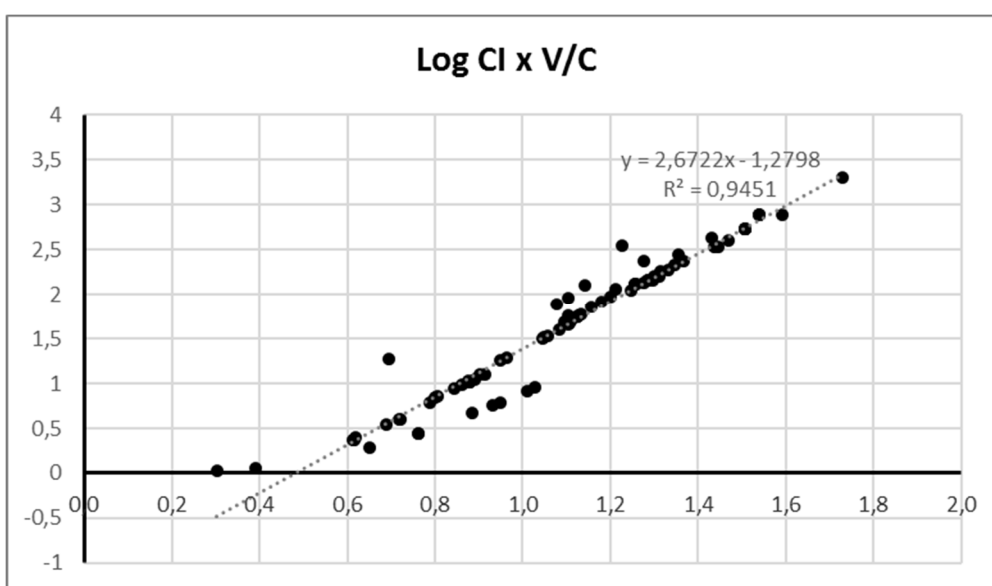


Figura 6.2 – Gráfico de dispersão: log CI em função de V/C.

O Quadro 6.4 apresenta os testes estatísticos realizados.

Quadro 6.4 – Análise de correlação entre V/C e CI

Estatística	Valor	Teste de significância	Valor	Valor-P
R ²	0,9451	Estatística F	1411,6248	4,3 E-32
r Pearson (CI)	0,9045	Estatística t	19,2067	4,3 E-32
r Pearson (log CI)	0,9722	Estatística t	37,5868	1,84 E-53
r _s Spearman	0,9783	Estatística t	42,7289	8,28 E-58

O elevado R² sugere que há uma forte relação entre CI e V/C, com a variável V/C explicando aproximadamente 95% do valor obtidos para CI. A Estatística F mostra que há significância estatística, mesmo para um nível de significância (n.s.) de 1% (F_c = 6,9544).

O coeficiente de correlação de Pearson, aplicado para CI e V/C, seja para os valores absolutos de CI, seja para a transformação logarítmica, mostra correlação muito alta (ver Quadro 4.6). A Estatística t de Student mostra significância estatística para n.s. = 1% (t_c = 2,6371).

O coeficiente de correlação de postos de Spearman, aplicado sobre as hierarquias resultantes dos indicadores CI e V/C confirma a correlação muito alta e a Estatística t de Student igualmente mostra significância estatística para n.s. = 1%.

Analisando-se os 10 primeiros postos nas hierarquias produzidas a partir de cada um dos indicadores percebe-se que o conjunto de links é idêntico, com alguma modificação na ordenação.

Foi realizada ainda uma análise dividindo-se as hierarquias V/C e CI em agrupamentos com base em quartis (ver Quadro 6.2), de forma a verificar a maior ou menor semelhança quanto à ordenação dos links dentro das hierarquias. Observou-se que 95% dos links no agrupamento H1 de cada hierarquia são coincidentes e que 71% dos links em H4 são também coincidentes, o que mostra grande semelhança na ordenação por um ou outro indicador de congestionamento, já que, aleatoriamente, a coincidência esperada seria de 25%. Verificou-se ainda que nenhum link pertencente a H1 em uma das hierarquias pertence a H4 na outra, o que mostra, mais uma vez, a semelhança entre as relações, já que nenhum link entre os primeiros postos de uma relação está entre os últimos da outra.

A representação gráfica dos resultados obtidos (Figuras 5.5 e 5.6, Capítulo 5) mostra que os corredores destacados por um e outro indicadores são os mesmos, embora se perceba um maior contraste entre os resultados obtidos por CI, em virtude de sua maior dispersão, evidenciada pelo maior CV, conforme apresentado no Quadro 6.1.

Pelo exposto, considera-se que os resultados obtidos para V/C e CI são coerentes e correlacionados.

6.3 Análise comparativa: indicadores de vulnerabilidade

Assim como no caso do congestionamento, foram dois os indicadores de vulnerabilidade analisados, no presente caso, o NRI e o NRI-m. Pelos mesmos motivos, espera-se que haja coerência entre os resultados apresentados por um e por outro indicador, com hierarquias produzidas sendo semelhantes. Alguns autores associam o indicador de centralidade BC à vulnerabilidade (von Ferber et al., 2012; Cats e Jenelius, 2014), tendo esse sido o principal motivo para sua utilização como indicador auxiliar na seleção dos links para a análise mais detalhada (ver item 4.3.2, no Capítulo 4). Dessa forma, julgou-se relevante verificar se há correlação entre esse indicador de centralidade e os indicadores de vulnerabilidade testados. As análises realizadas são similares às aquelas realizadas para os indicadores de congestionamento.

Algumas das principais características estatísticas do conjunto de indicadores dos links analisados são apresentadas no Quadro 6.5.

Quadro 6.5 – Características dos links analisados, quanto a NRI, NRI-m e BC.

Estatística	NRI	NRI-m	BC
Média	99.434	38.799	1,2662
Desvio Padrão	134.487	63.719	1,2560
Coeficiente de Variação (CV)	1,3525	1,6423	0,9919

O CV é, portanto, muito alto para os três indicadores com a maior dispersão sendo encontrada para NRI-m e a menor para BC. A média encontrada para NRI-m é bem inferior do que a encontrada para NRI, o que era esperado, tendo em vista que ambos os indicadores medem minutos acrescentados ao tempo de viagem e que o NRI-m é baseado em redução de capacidade de um link enquanto que o NRI parte da interrupção total dos mesmos links.

6.3.1 Comparação entre NRI e NRI-m

A Figura 6.3 mostra gráfico de dispersão com ajuste linear para NRI-m em função de NRI. O Quadro 6.6 apresenta os testes estatísticos realizados.

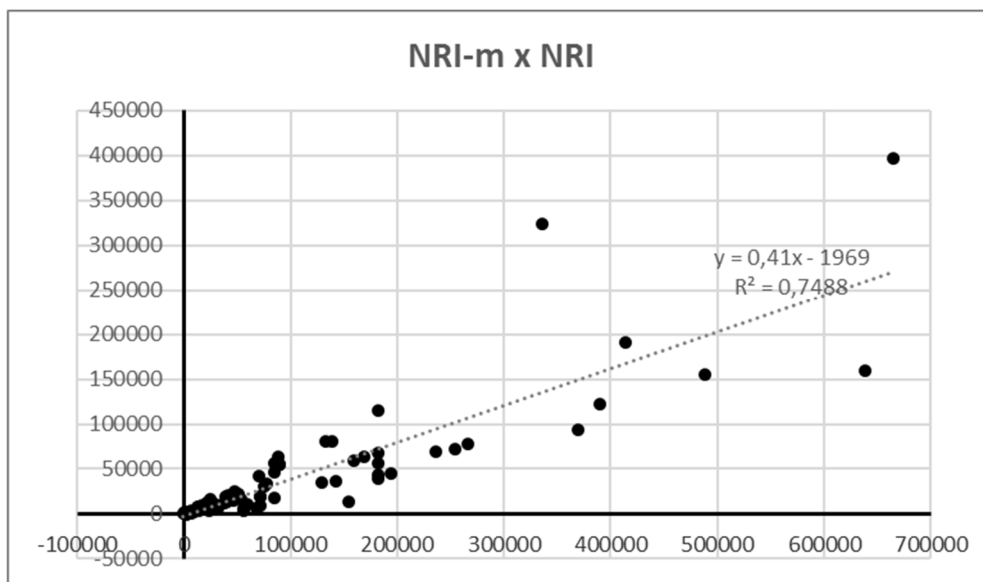


Figura 6.3 – Gráfico de dispersão: NRI-m em função de NRI.

Quadro 6.6 – Análise de correlação entre NRI e NRI-m

Estadística	Valor	Teste de significância	Valor	Valor P
R ²	0,7488	Estatística F	244,4331	2,53 E-26
r Pearson	0,8653	Estatística t	15,6356	2,53 E-26
r _s Spearman	0,9236	Estatística t	21,8231	6,66 E-36

O Quadro 6.6 apresenta um R² que pode ser considerado alto, e que sugere forte relação entre NRI-m e NRI, com a variável NRI explicando aproximadamente 75% dos valores obtidos para NRI-m. A Estatística F mostra significância estatística para n.s. inferior a 1%.

O coeficiente de correlação de Pearson, aplicado para NRI e NRI-m mostra correlação alta (ver Quadro 4.6). A Estatística t de Student mostra significância estatística para n.s. inferior a 1%.

O coeficiente de correlação de postos de Spearman, aplicado sobre as hierarquias resultantes dos indicadores NRI e NRI-m mostra correlação muito alta e a Estatística t de Student igualmente mostra significância estatística para n.s. inferior a 1%.

A análise baseada em quartis (ver Quadro 6.2) mostra coincidência de 76% dos links nas hierarquias derivadas de NRI e NRI-m, tanto em H1 quanto em H4. A análise mostra ainda que não há links pertencentes a H1 em uma das hierarquias que pertençam a H4 na outra.

A representação gráfica dos resultados obtidos (Figuras 5.14 e 5.15, Capítulo 5) mostra igualmente semelhança entre um e outro indicador, com os mesmos corredores destacados, embora o resultado gráfico obtido a partir de NRI-m evidencie mais um corredor específico (Leme/Copacabana – Botafogo).

Os resultados mostram que os resultados obtidos para NRI e NRI-m são coerentes e correlacionados, apesar das diferenças de procedimentos para a determinação desses indicadores.

6.3.2 Comparação entre BC e os indicadores NRI e NRI-m

Verificada a correlação entre os indicadores de vulnerabilidade testados, buscou-se avaliar se BC poderia ser utilizado como indicador *proxy* de vulnerabilidade. Para tal, foram feitos testes de correlação de BC com NRI e NRI-m. As Figuras 6.4 e 6.5 mostram os gráficos de dispersão com o ajuste linear obtido, enquanto que os Quadros 6.7 e 6.8 apresentam os testes estatísticos realizados.

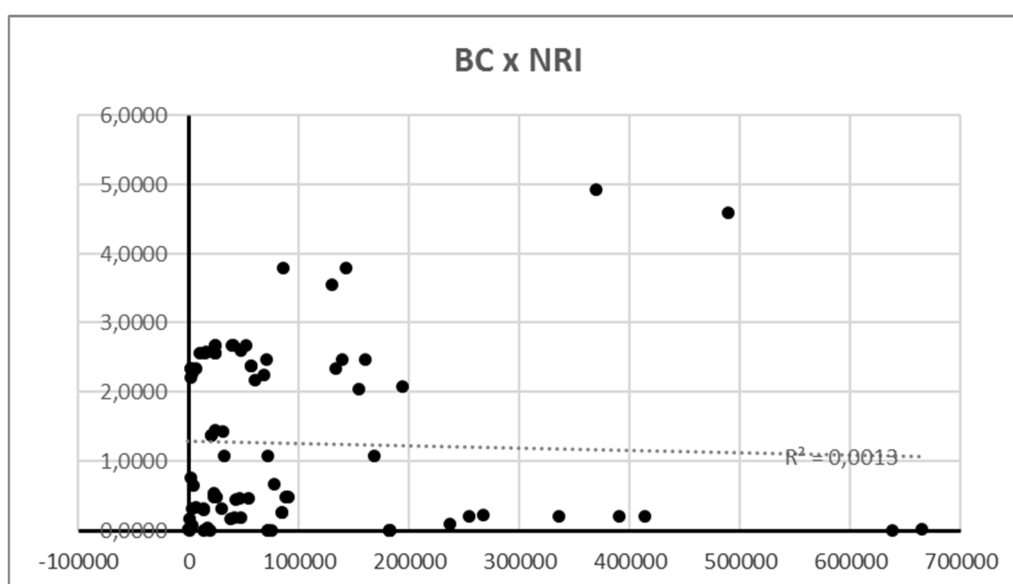


Figura 6.4 – Gráfico de dispersão: BC em função de NRI.

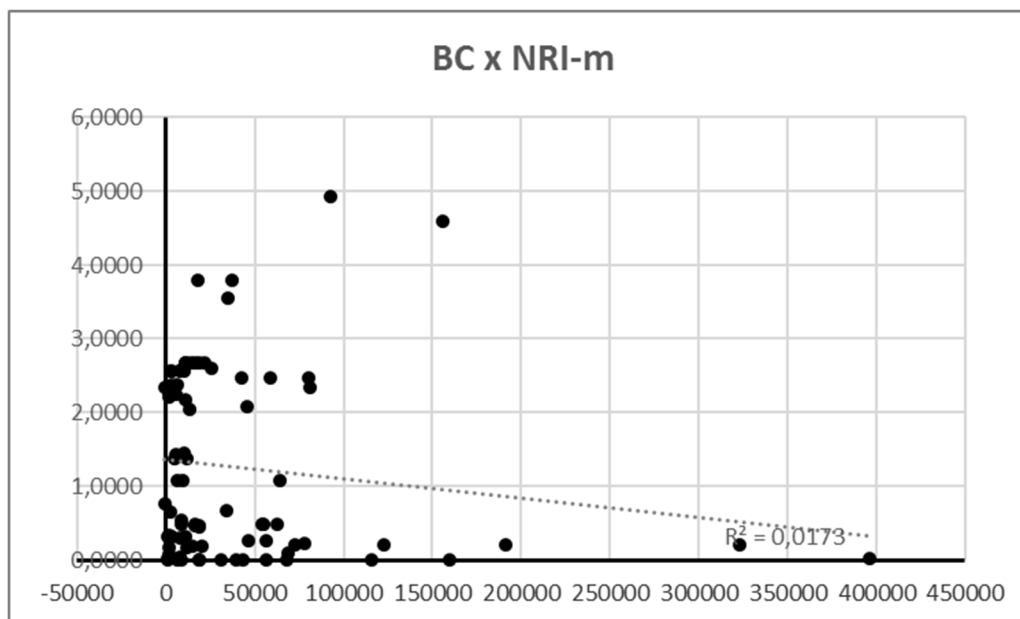


Figura 6.5 – Gráfico de dispersão: BC em função de NRI-m.

Quadro 6.7 – Análise de correlação entre NRI e BC

Estadística	Valor	Teste de significância	Valor	Valor P
R ²	0,0013	Estatística F	0,1067	0,74
r Pearson	-0,0365	Estatística t	-0,3309	0,74
r _s Spearman	-0,0878	Estatística t	-0,7983	0,43

Quadro 6.8 – Análise de correlação entre NRI-m e BC.

Estadística	Valor	Teste de significância	Valor	Valor P
R ²	0,0017	Estatística F	0,1396	0,23
r Pearson	-0,1314	Estatística t	-1,2003	0,23
r _s Spearman	-0,1148	Estatística t	-1,0469	0,30

Os gráficos de dispersão já indicam, visualmente, que não há correlação entre os indicadores de vulnerabilidade e BC. Os R² encontrados são muito baixos, com explicação de BC pelas variáveis NRI e NRI-m sempre inferior a 1%. A Estatística F mostra ainda não haver significância estatística no resultado obtido, ou seja, é possível que mesmo essa baixa correlação seja fortuita.

Os coeficientes de correlação de Pearson obtidos mostram correlação desprezível (ver Quadro 4.6) e negativa. A Estatística t para ambos os casos não mostrou significância o que confirma a baixa probabilidade de que haja correlação.

A análise dos coeficientes de correlação de postos de Spearman confirma os resultados obtidos a partir de Pearson e a Estatística t igualmente não mostra significância, o que confirma que, mesmo no que diz respeito às posições na hierarquia, a probabilidade de que haja correlação é baixa.

Digno de nota ainda é o fato de que tanto r quanto r_s têm valores negativos, o que é inesperado, uma vez que não há motivos para se crer que indicadores de vulnerabilidade tenham correlação inversa a indicadores de centralidade. Esse fato reforça a impressão de que não haja correlação e de que os coeficientes de correlação sejam próximos a zero.

A análise baseada em quartis (ver Quadro 6.2), comparando-se a hierarquia derivada de BC com as derivadas de NRI e NRI-m, mostra coincidências que variam entre 14% e 38%, não muito distantes da probabilidade de 25% esperada para resultados aleatórios. Os testes realizados foram os mesmos realizados para a comparação de NRI e NRI-m, ou seja, H1 x H1, H4 x H4 e H1 x H4.

Pelo exposto, conclui-se que BC não é um indicador *proxy* adequado de vulnerabilidade, ao menos para redes de maior complexidade e com a configuração e características da rede usada nesta aplicação.

6.3.3 Pertinência dos indicadores auxiliares BC e Carregamento na pré-seleção de links para a análise da vulnerabilidade

A dificuldade de cálculo dos indicadores de vulnerabilidade para todos os links de uma rede levou a um procedimento de seleção dos links potencialmente mais críticos, descrito no item 4.3.2 do Capítulo 4. A adoção dos indicadores auxiliares BC e Carregamento para a pré-seleção de links para a análise mais detalhada teve como objetivo diminuir a probabilidade de que links importantes para a vulnerabilidade ficassem fora dessa seleção.

Para verificar a pertinência da utilização de BC e Carregamento, analisaram-se as hierarquias produzidas a partir dos indicadores de vulnerabilidade e contabilizaram-se os links pertencentes aos agrupamentos H1 e H2 (ver Quadro 6.2) que não teriam sido selecionados caso não se tivesse utilizado os indicadores auxiliares. O Quadro 6.9 apresenta os resultados obtidos para três casos, sempre se considerando nas hierarquias de NRI ou NRI-m: a) links pertencentes a H1; b) links pertencentes a H2; e links pertencentes a H1 ou H2. A coluna “Indicador Auxiliar” mostra o indicador responsável pela inclusão dos links na pré-seleção.

Quadro 6.9 – Links críticos quanto à vulnerabilidade selecionados a partir de BC ou Carregamento.

Agrupamento	Quantidade de links	Participação [%]	Indicador Auxiliar
H1	0	0,0	Só BC
	1	3,8	Só Carregamento
	5	19,2	BC e Carregamento
	6	23,1	Total
H2	2	6,5	BC
	2	6,5	Só Carregamento
	5	16,1	BC e Carregamento
	9	29,0	Total
H1 ou H2	2	4,2	Só BC
	3	6,3	Só Carregamento
	10	20,8	BC e Carregamento
	15	31,3	Total

Pelo Quadro 6.9, percebe-se 31,3% dos links pertencentes aos agrupamentos H1 ou H2 das hierarquias de NRI ou NRI-m só foram selecionados em virtude da inclusão de BC e Carregamento. Isso significa que, dos 48¹³ links que pertencem aos dois primeiros agrupamentos das hierarquias de vulnerabilidade segundo NRI ou NRI-m, 15 não seriam identificados, não fosse pela introdução dos indicadores auxiliares. Analisando-se exclusivamente H1, ou seja, os links mais críticos segundo a vulnerabilidade, 6 (23.1%) dos 26 links só estão incluídos devido ao critério de pré-seleção adotado. De forma mais significativa, 3 entre os 10 links mais críticos também não seriam identificados.

Sendo assim, conclui-se pela pertinência da inclusão dos indicadores BC e Carregamento no critério de pré-seleção, parte da Estrutura Metodológica proposta.

6.4 Análise comparativa: Congestionamento x Confiabilidade

De forma similar às análises comparativas realizadas anteriormente, é investigado neste item e nos próximos dois seguintes a existência de correlação entre os resultados obtidos a partir de indicadores baseados em atributos de desempenho distintos.

¹³ Como há algumas divergências entre a posição na hierarquia de cada link em função do indicador de vulnerabilidade utilizado (NRI ou NRI-m), o número de links que pertencem a um determinado agrupamento segundo NRI ou NRI-m é um pouco maior do que a quarta parte do total de links analisados.

No presente item, são comparados os resultados obtidos a partir dos indicadores de congestionamento (V/C e CI) e de confiabilidade (ICE). As principais estatísticas do conjunto de indicadores de confiabilidade dos links analisados podem ser visualizadas no Quadro 6.10; as características do conjunto de indicadores de congestionamento podem ser vistas no Quadro 6.3, apresentado anteriormente.

Quadro 6.10 – Características dos links analisados, quanto a ICE.

Estadística	ICE
Média	1,3432
Desvio Padrão	0,9197
Coefficiente de Variação (CV)	0,6847

A Figura 6.6 mostra o gráfico de dispersão para ICE em função de V/C, onde foi encontrado um bom ajuste para uma curva exponencial, com $R^2 = 0,8186$. A Figura 6.7 mostra a transformação logarítmica de forma a tornar a relação linear. Em seguida, a Figura 6.8 mostra o gráfico de dispersão com ICE em função de CI, também com um bom ajuste ($R^2 = 0,8302$). O CV pode ser considerado como muito alto, próximo ao encontrado para o indicador de congestionamento CI e bem superior ao encontrado para o indicador V/C.

Os Quadros 6.11 e 6.12 resumizam os testes estatísticos realizados.

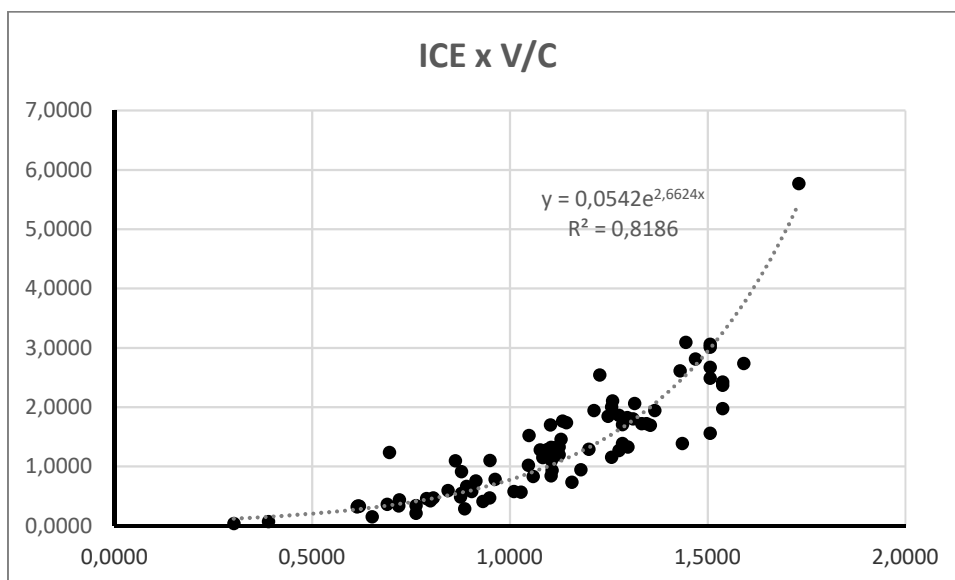


Figura 6.6 – Gráfico de dispersão: ICE em função de V/C.

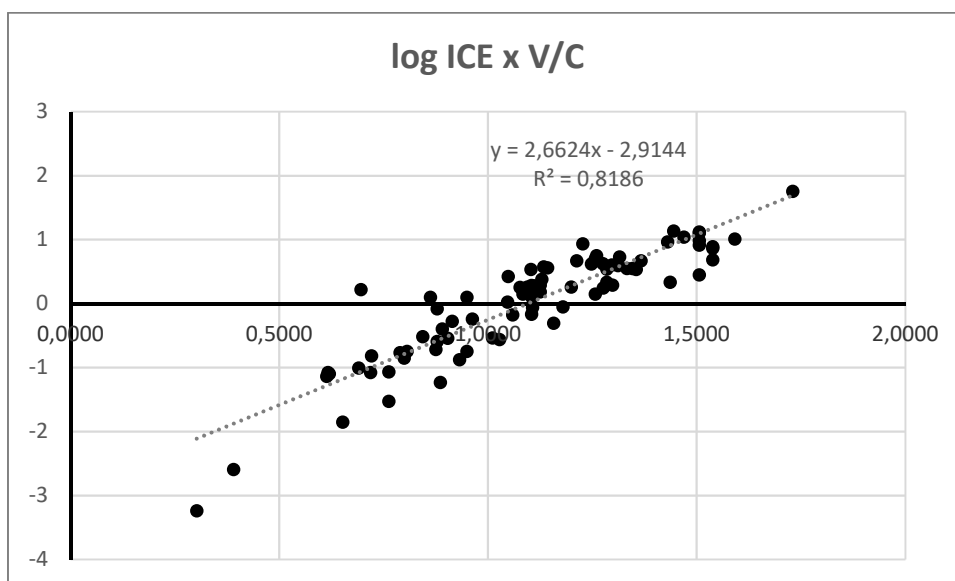


Figura 6.7 – Gráfico de dispersão: log ICE em função de V/C.

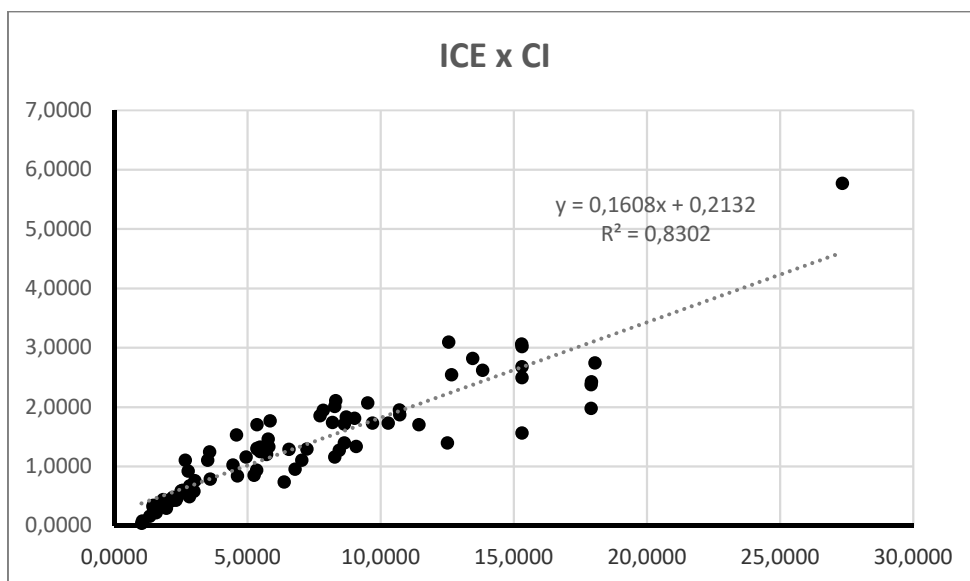


Figura 6.8 – Gráfico de dispersão: log ICE em função de CI.

Quadro 6.11 – Análise de correlação entre ICE e V/C.

Estadística	Valor	Teste de significância	Valor	Valor P
R ²	0,8186	Estatística F	370,0397	4,66 E-24
r Pearson (ICE)	0,8455	Estatística t	14,3402	4,66 E-24
r Pearson (log ICE)	0,9048	Estatística t	19,2391	3,86 E-32
r _s Spearman	0,9074	Estatística t	19,5467	1,32 E-32

Quadro 6.12 – Análise de correlação entre ICE e CI.

Estatística	Valor	Teste de significância	Valor	Valor P
R ²	0,8302	Estatística F	400,9211	2,55 E-33
r Pearson	0,9112	Estatística t	20,0262	2,55 E-33
r _s Spearman	0,9340	Estatística t	23,6787	2,05 E-38

Os coeficientes R² encontrados sugerem forte relação entre ICE e os indicadores de congestionamento, tanto V/C quanto CI com mais de 80% de poder explicativo para os valores obtidos para ICE. A Estatística F mostra significância estatística para n.s. inferior a 1%.

Os coeficientes de Pearson mostram correlações altas ou muito altas (ver Quadro 4.6) entre o indicador de confiabilidade e os de congestionamento. A Estatística t aplicada às comparações mostra sempre significância para n.s. inferior a 1%.

Os coeficientes de correlação de postos de Spearman observados confirmam correlação muito alta também para as hierarquias derivadas dos indicadores, com significância para n.s. inferior a 1%.

A análise dos 10 primeiros postos na hierarquia mostra uma coincidência de 60% dos links, comparando-se qualquer dos indicadores de congestionamento com o ICE.

A análise baseada em quartis mostra coincidência de 67% ou 76% dos links em H1 (ver Quadro 6.2), e de 81% ou 86% dos links em H4, dependendo do indicador de congestionamento considerado. Nenhum link pertencendo a H1 em uma das hierarquias pertence a H4 em outra.

A Figura 6.9 coloca, lado a lado, a representação gráfica dos resultados produzidos pelos indicadores de congestionamento (CI) e de confiabilidade (ICE). Verifica-se grande semelhança entre os dois gráficos. De fato, os mesmos corredores são enfatizados, com alguma diferença de importância, conforme pode ser visto pela espessura relativa dos links. Tratam-se predominantemente de links com função arterial primária ou secundária, não estando as vias expressas incluídas entre os links críticos. Percebe-se que a topologia parece ter alguma influência, uma vez que parte dos links mais críticos está situada em região menos conectada. No entanto, links em vias expressas, com poucas alternativas, como os representativos de túneis conectando a sub-rede à Zona Norte e a São Conrado, não estão entre os mais críticos, mostrando não ser este um fator decisivo.

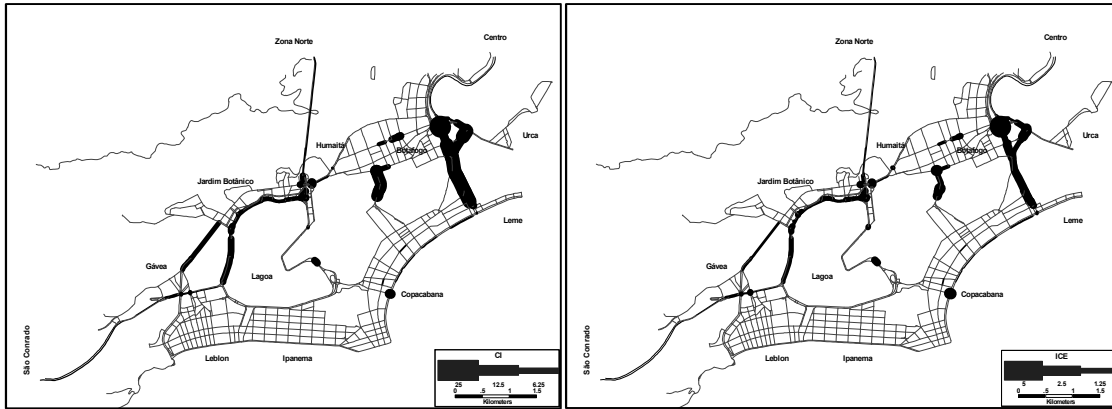


Figura 6.9 – Representação gráfica da importância dos links selecionados segundo os indicadores CI (à esquerda) e ICE (à direita).

Dessa forma, tudo indica haver uma correlação entre os indicadores de congestionamento e o indicador de confiabilidade testados. De fato, no item 4.2.2 (Capítulo 4) já foi observado que o cálculo de ICE (Equação 4.2) incorpora relação semelhante ao indicador CI, o que pode explicar a correlação encontrada.

6.5 Análise comparativa: Congestionamento x Vulnerabilidade

Neste item são comparados os resultados obtidos a partir dos indicadores de congestionamento (V/C e CI) e de vulnerabilidade (NRI e NRI-m). A comparação é feita pareando-se indicadores de diferentes atributos, o que resulta em quatro conjuntos de resultados estatísticos. Primeiramente é comparado NRI com os indicadores V/C e CI e, depois são feitas as comparações a partir de NRI-m, seguindo o mesmo procedimento.

As Figuras 6.10 e 6.11 mostram os gráficos de dispersão para NRI em função dos V/C e CI, respectivamente. Não foram encontrados bons ajustes para nenhuma das duas relações. Os Quadros 6.13 e 6.14 sumarizam os testes estatísticos realizados.

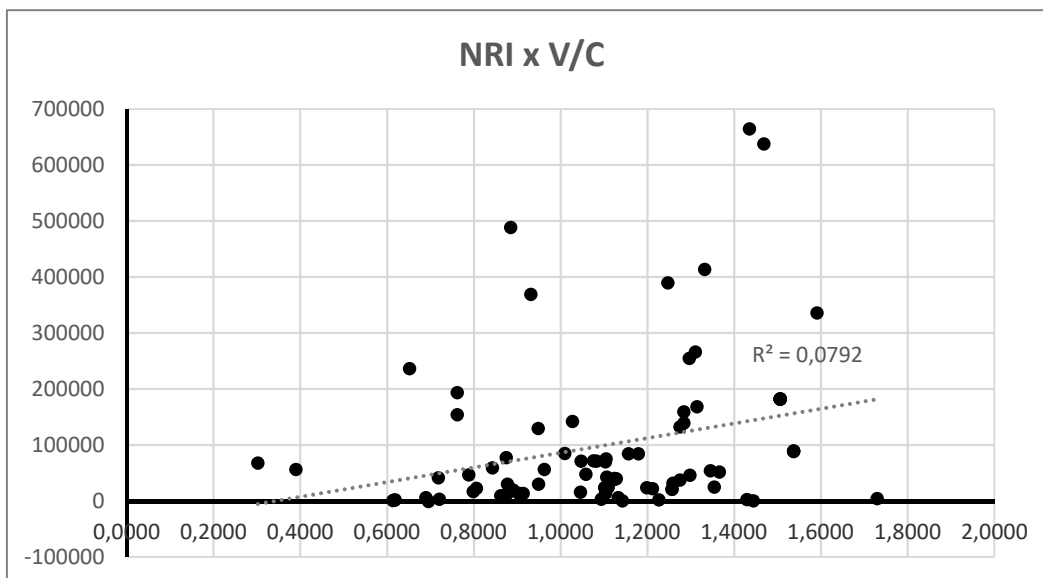


Figura 6.10 – Gráfico de dispersão: NRI em função de V/C.

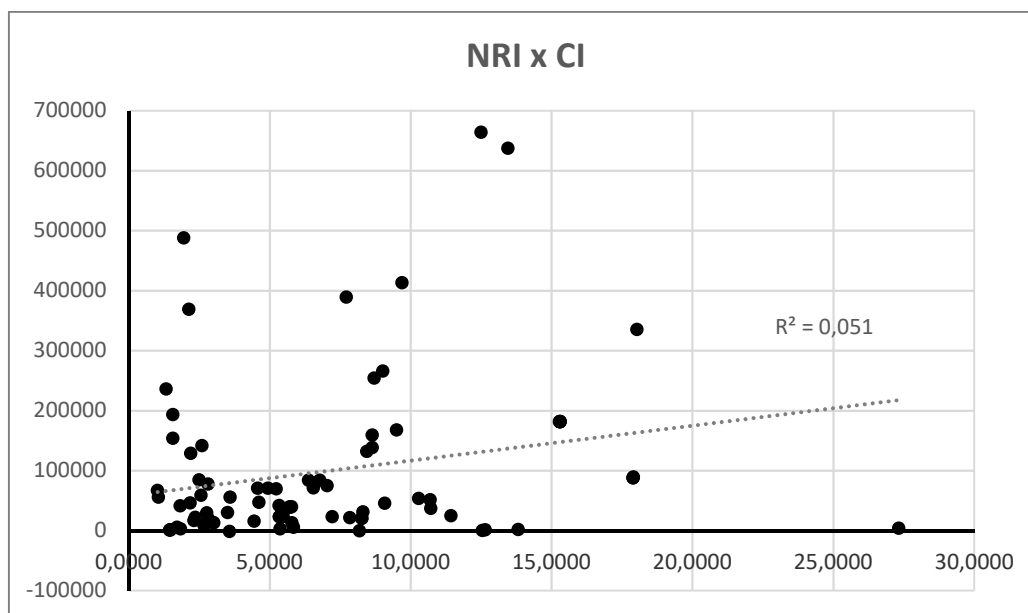


Figura 6.11 – Gráfico de dispersão: NRI em função de CI.

Quadro 6.13 – Análise de correlação entre NRI e V/C.

Estadística	Valor	Teste de significância	Valor	Valor P
R ²	0,0792	Estatística F	7,0530	9,51 E-03
r Pearson	0,2814	Estatística t	2,6557	9,51 E-03
r _s Spearman	0,3354	Estatística t	3,2235	1,82 E-03

Quadro 6.14 – Análise de correlação entre NRI e CI.

Estatística	Valor	Teste de significância	Valor	Valor P
R ²	0,0510	Estatística F	4,4067	0,0389
r Pearson	0,2259	Estatística t	2,0995	0,0389
r _s Spearman	0,2404	Estatística t	2,2427	0,0276

Os coeficientes R² observados mostram baixa correlação entre NRI e os indicadores de congestionamento, ambos com poder explicativo inferior a 10% para os valores obtidos para NRI. A Estatística F confirma as baixas correlações encontradas para n.s. inferiores a 5%.

Os coeficientes de Pearson mostram correlações desprezíveis (ver Quadro 4.6). As Estatísticas t observadas mostram significância para n.s. inferior a 5%.

Os coeficientes de postos de Spearman mostram correlação baixa (NRI x V/C) e desprezível (NRI x CI), para as hierarquias derivadas dos indicadores, com significância para n.s. inferior a 5%.

A análise dos 10 primeiros postos nas hierarquias mostra uma coincidência de 10% para a comparação NRI x V/C, próximo ao resultado aleatório esperado de 12%. Para a comparação NRI x CI a coincidência foi de 20%.

A análise baseada em quartis (ver Quadro 6.2) mostra uma coincidência de 52% ou 48% para H1 e 38% ou 33% para H4, conforme o indicador de congestionamento (V/C ou CI, respectivamente). O resultado aleatório seria de 25%, o que sugere que as coincidências em H1 não seriam aleatórias. A coincidências de links pertencentes a H1 em uma relação e a H4 em outra varia entre 14% e 29%, não muito distante da aleatoriedade.

As Figuras 6.12 e 6.13 mostram os gráficos de dispersão para NRI-m em função dos V/C e CI, respectivamente. Da mesma forma que na análise de NRI, não foram encontrados bons ajustes para nenhuma das duas relações. Os Quadros 6.15 e 6.16 resumizam os testes estatísticos realizados.

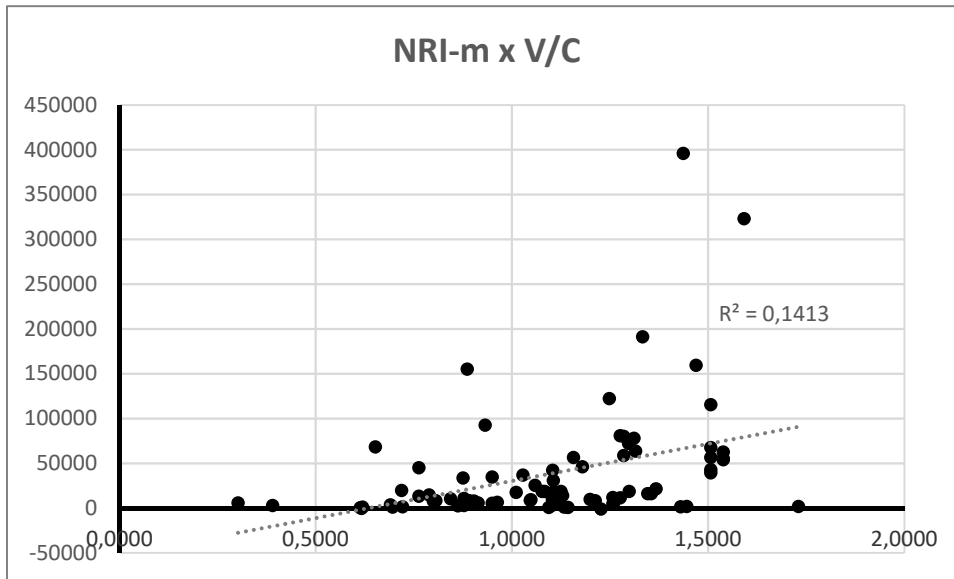


Figura 6.12 – Gráfico de dispersão: NRI-m em função de V/C.

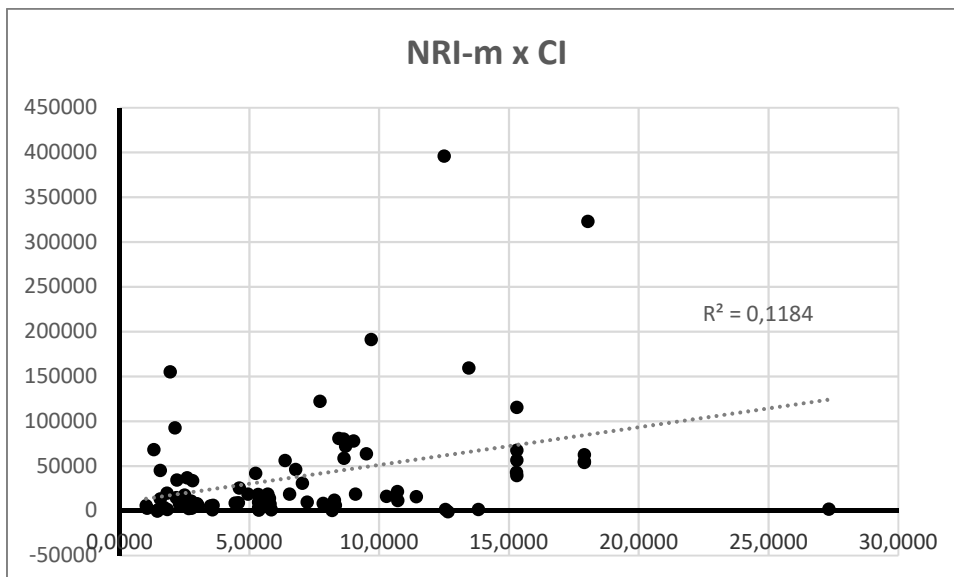


Figura 6.13 – Gráfico de dispersão: NRI-m em função de CI.

Quadro 6.15 – Análise de correlação entre NRI-m e V/C.

Estadística	Valor	Teste de significância	Valor	Valor P
R^2	0,1413	Estatística F	13,4932	4,26 E-04
r Pearson	0,3759	Estatística t	3,6733	4,26 E-04
r_s Spearman	0,4505	Estatística t	4,5689	1,71 E-05

Quadro 6.16 – Análise de correlação entre NRI-m e CI.

Estatística	Valor	Teste de significância	Valor	Valor P
R ²	0,1184	Estatística F	11,0127	1,35 E-03
r Pearson	0,3441	Estatística t	3,3186	1,35 E-03
r _s Spearman	0,3591	Estatística t	3,4839	7,96 E-04

Os coeficientes R² observados mostram baixa correlação entre NRI-m e os indicadores de congestionamento, ambos com poder explicativo inferior a 15% para os valores obtidos para NRI-m. A Estatística F confirma as baixas correlações encontradas para n.s. inferior a 1%

Os resultados observados para os coeficientes de Pearson e para o coeficiente de postos de Spearman evidenciam baixas correlações (ver Quadro 4.6), com significância confirmada pela Estatística t para n.s. inferior a 1%.

A análise dos 10 primeiros postos nas hierarquias mostra o mesmo resultado obtido na análise de NRI: 10% de coincidência para a comparação NRI-m x V/C e 20% para a comparação NRI-m x CI.

A análise baseada em quartis (ver Quadro 6.2) também se assemelha aos resultados obtidos para o NRI, com coincidência de 57% ou 52% para H1 e 42% ou 33% para H4, conforme o indicador de congestionamento (V/C ou CI, respectivamente). As coincidências entre links pertencentes a H1 na hierarquia de um indicador e H4 na referente a outro variam entre 10% e 19% um pouco inferiores a resultados aleatórios.

A Figura 6.14 coloca, lado a lado, representação gráfica dos indicadores CI e NRI para os links selecionados, como testemunhas dos atributos Congestionamento e Vulnerabilidade. Percebe-se que os corredores mais críticos do ponto de vista da vulnerabilidade diferem significativamente daqueles derivados do congestionamento. De fato, os links mais críticos quanto à vulnerabilidade são aqueles pertencentes a corredores arteriais e expressos que conectam regiões distintas, com destaque para aqueles links que pertencem à linha de corte mínimo, ou seja, que fazem parte de seções que, com o seccionamento de um número reduzido de links desconecta uma região da rede. Assim, a topologia da rede parece ser relevante, com os links críticos se situando em regiões menos conectadas. Já os links críticos quanto ao congestionamento realçam gargalos de capacidade na rede, não necessariamente links pertencentes a seções de corte mínimo.

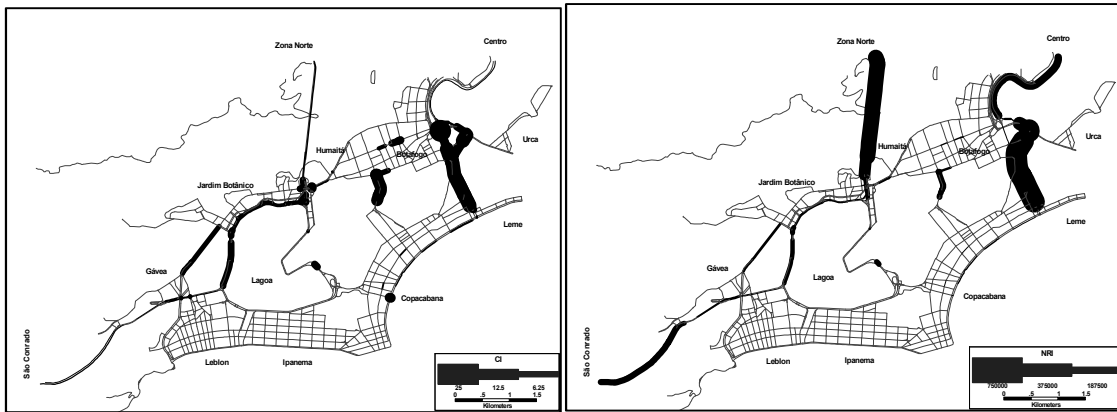


Figura 6.14 – Representação gráfica da importância dos links segundo os indicadores CI (à esquerda) e NRI (à direita).

É visível, portanto, que a correlação entre os indicadores de vulnerabilidade e congestionamento testados é baixa ou muito baixa o que evidencia a natureza distinta dos atributos de desempenho que representam.

6.6 Análise comparativa: Confiabilidade x Vulnerabilidade

Aqui são realizadas comparações dos resultados obtidos a partir do indicador de confiabilidade (ICE) com os resultados obtidos a partir de cada um dos indicadores de vulnerabilidade (NRI e NRI-m).

As Figuras 6.15 e 6.16 mostram os gráficos de dispersão para NRI e NRI-m, respectivamente, em função de ICE. Similarmente ao verificado para a comparação com indicadores de congestionamento, não foram encontrados bons ajustes para nenhuma das duas relações. Os Quadros 6.17 e 6.18 resumizam os testes estatísticos realizados.

A análise visual dos gráficos de dispersão já sugere que não há correlação entre o indicador de confiabilidade e os indicadores de vulnerabilidade. De fato, os R^2 encontrados são baixos, mostrando um poder explicativo dos valores de NRI e NRI-m em torno de 2% a partir da variável ICE. A Estatística F mostra ainda uma baixa significância estatística para o resultado obtido, podendo mesmo essa baixa correlação encontrada ser fortuita.

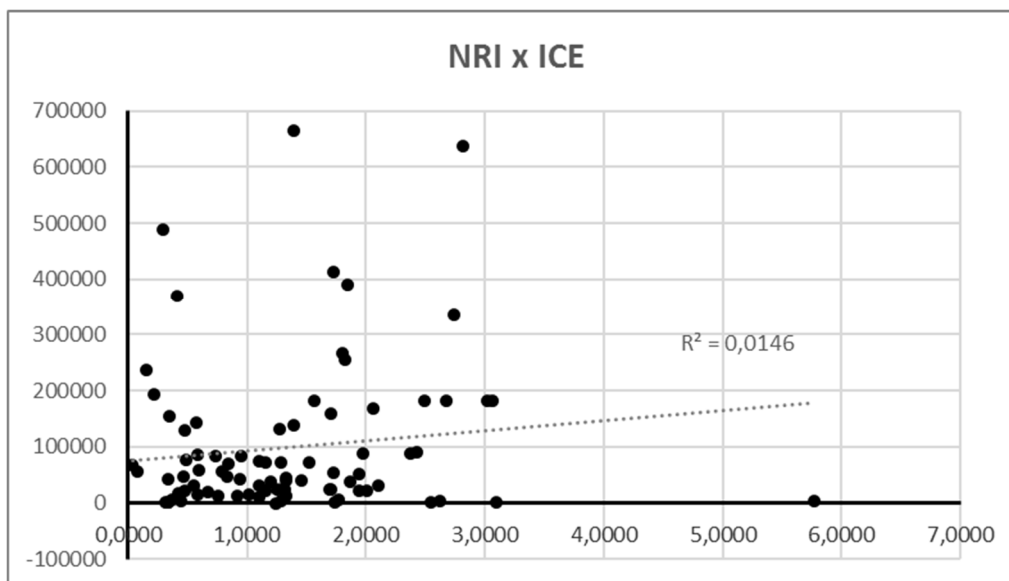


Figura 6.15 – Gráfico de dispersão: NRI em função de ICE.

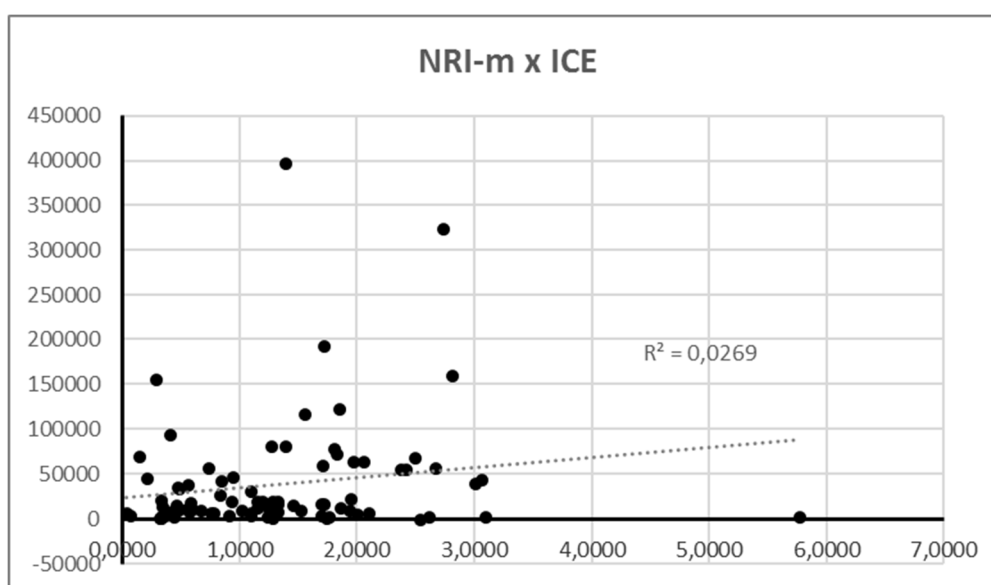


Figura 6.16 – Gráfico de dispersão: NRI-m em função de ICE.

Quadro 6.17 – Análise de correlação entre NRI e ICE.

Estadística	Valor	Teste de significância	Valor	Valor P
R ²	0,0146	Estatística F	1,2149	0,273
r Pearson	0,1210	Estatística t	1,1039	0,273
r _s Spearman	0,1195	Estatística t	1,0902	0,279

Quadro 6.18 – Análise de correlação entre NRI-m e ICE.

Estatística	Valor	Teste de significância	Valor	Valor P
R ²	0,0269	Estatística F	2,2668	0,136
r Pearson	0,1640	Estatística t	1,5057	0,136
r _s Spearman	0,1811	Estatística t	1,6672	0,0993

Os coeficientes de correlação de Pearson obtidos mostram correlação desprezível (ver Quadro 4.6), com a Estatística t não mostrando significância, o que não permite afirmar que mesmo a baixa correlação encontrada não seja fortuita.

A análise dos coeficientes de correlação de postos de Spearman mostra correlação desprezível, com a Estatística t igualmente não mostrando significância ainda que com n.s. = 10%.

A análise dos 10 primeiros postos na hierarquia mostra uma coincidência de 20%, tanto na comparação ICE x NRI quanto na comparação ICE x NRI-m, relativamente próximo do que seria esperado para a aleatoriedade (12%).

A análise baseada em quartis mostra, para H1, no entanto, uma coincidência de 43% e 48% (NRI e NRI-m, respectivamente), superior aos 25% esperados caso fosse fruto de aleatoriedade. Para H4, por outro lado, a coincidência é de 29%, valor próximo da aleatoriedade. Quando comparados H1 de um indicador com H4 de outro, o nível de coincidência ficou entre 14% e 29%.

A Figura 6.17 coloca, lado a lado, representação gráfica dos indicadores ICE e NRI para os links selecionados, como testemunhas dos atributos Confiabilidade e Vulnerabilidade. Os comentários feitos no item anterior, quando comparados os gráficos derivados dos indicadores CI e NRI se aplicam aqui, uma vez há muita semelhança entre os resultados de ICE e CI, coerente com as correlações encontradas entre os indicadores de congestionamento e confiabilidade. Portanto, percebe-se que, no gráfico de NRI se destacam os links pertencentes a corredores expressos e arteriais que pertencem a linhas de corte mínimo enquanto que os links críticos quanto à confiabilidade situam-se em gargalos de capacidade da rede.

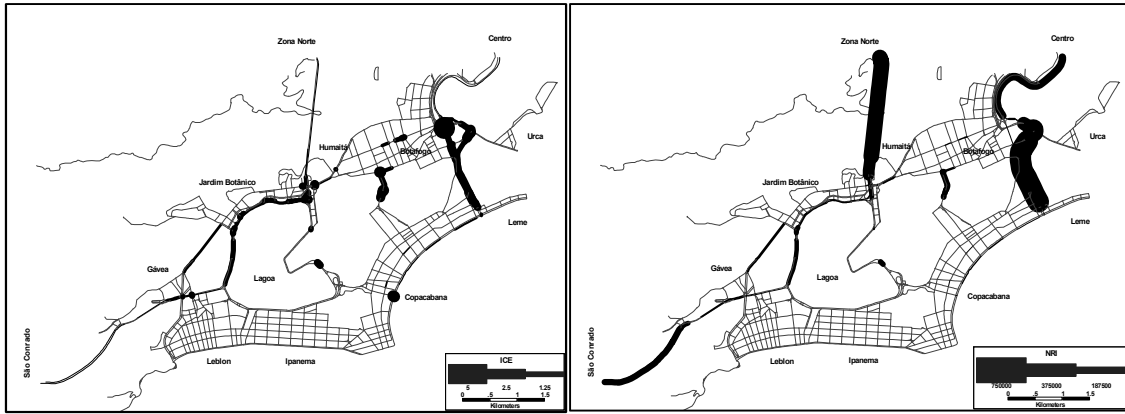


Figura 6.17 – Representação gráfica da importância dos links segundo os indicadores ICE (à esquerda) e NRI (à direita).

Pelo observado, tanto na representação gráfica quanto nos testes estatísticos, inexistente ou há correlação muito baixa entre os indicadores de confiabilidade e de vulnerabilidade testados o que evidencia a natureza distinta dos atributos de desempenho que representam.

6.7 Análise de resultados: síntese

A comparação entre indicadores do mesmo atributo mostrou, como esperado, evidência de correlação. É interessante notar que mesmo para duas abordagens de mensuração da vulnerabilidade com diferença significativa (a obstrução completa ou parcial de um link), foi encontrada correlação importante entre os resultados obtidos para os indicadores e maior ainda para a hierarquia resultante. De fato, tanto no caso do congestionamento quanto no da vulnerabilidade a correlação entre as hierarquias derivadas dos indicadores é nítida como mostram os coeficientes de Spearman, superiores a 0,90.

O Quadro 6.19 mostra o sumário dos coeficientes de correlação encontrados para a comparação entre indicadores de um mesmo atributo, congestionamento e vulnerabilidade.

Quadro 6.19 – Análise de correlação entre indicadores de um mesmo atributo

Atributos	Indicadores	R ²	r	r _s
Congestionamento	CI x V/C	0,9451	0,9722 (log CI)	0,9783
Vulnerabilidade	NRI-m x NRI	0,7488	0,8654	0,9236

A comparação entre indicadores de atributos diferentes, resumida no Quadro 6.20, indica grande correlação entre os indicadores de congestionamento e confiabilidade. Já a comparação entre os indicadores destes dois atributos com os de vulnerabilidade, indica correlação muito baixa ou inexistente.

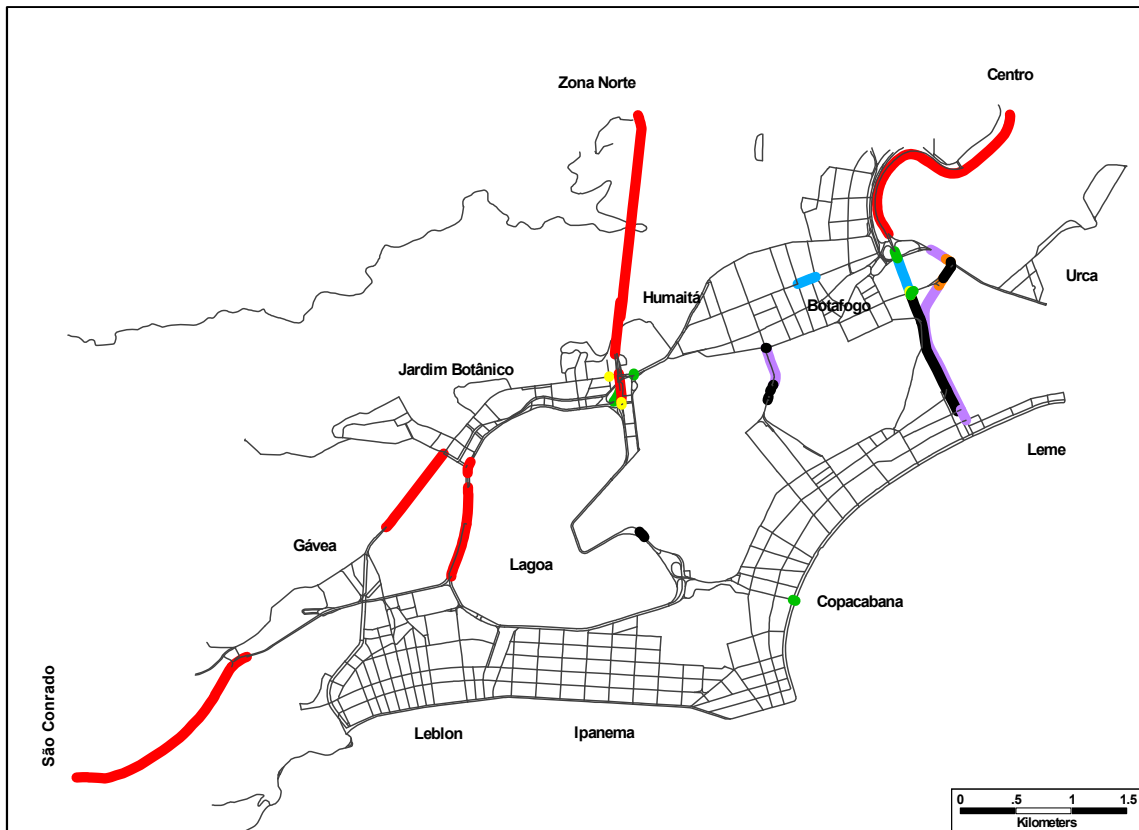
Quadro 6.20 – Análise de correlação entre indicadores de diferentes atributos.

Atributos	Indicadores	R ²	r	r _s
Confiabilidade x Congestionamento	ICE x V/C	0,8186	0,9048 (log ICE)	0,9074
	ICE x CI	0,8302	0,9112	0,9340
Vulnerabilidade x Congestionamento	NRI x V/C	0,0792	0,2814	0,3354
	NRI x CI	0,0510	0,2259	0,2404
	NRI-m x V/C	0,1413	0,3759	0,4505
	NRI-m x CI	0,1184	0,3441	0,3591
Vulnerabilidade x Confiabilidade	NRI x ICE	0,0146	0,1210	0,1195
	NRI-m x ICE	0,0269	0,1640	0,1811

A Figura 6.18 mostra os links presentes no quarto superior de quaisquer das hierarquias dos três atributos (agrupamento H1, Quadro 6.2). A escala de cores é:

- Azul – presente apenas na hierarquia referente ao atributo Congestionamento;
- Amarelo – presente apenas na hierarquia referente ao atributo Confiabilidade;
- Vermelho – presente apenas na hierarquia referente ao atributo Vulnerabilidade;
- Verde – presente nas hierarquias referentes aos atributos Congestionamento e Confiabilidade;
- Violeta – presente nas hierarquias referentes aos atributos Congestionamento e Vulnerabilidade;
- Laranja – presente nas hierarquias referentes aos atributos Confiabilidade e Vulnerabilidade;
- Preto – presente nas hierarquias referentes aos três atributos.

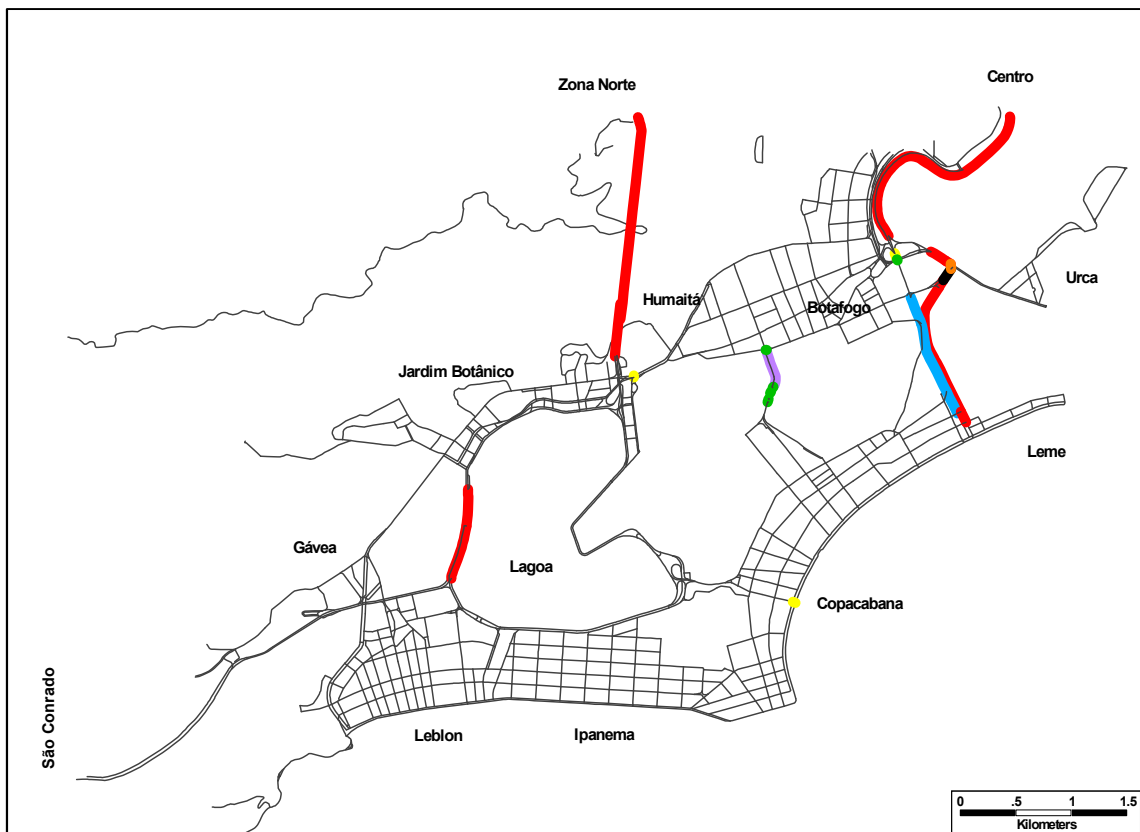
Como já discutido anteriormente, é evidente o destaque dos links representativos das vias expressas que conectam a sub-rede analisada ao Centro, à Zona Norte e à Zona Oeste, através de São Conrado. Os túneis internos à sub-rede aparecem em H1 nos três atributos.



Código de cores: Azul: Congestionamento; Amarelo: Confiabilidade; Vermelho: Vulnerabilidade; Verde: Congestionamento e Confiabilidade; Violeta: Congestionamento e Vulnerabilidade; Laranja: Confiabilidade e Vulnerabilidade; Preto: os três atributos.

Figura 6.18 – Representação gráfica dos links pertencentes ao quarto superior das hierarquias dos três atributos de desempenho analisados.

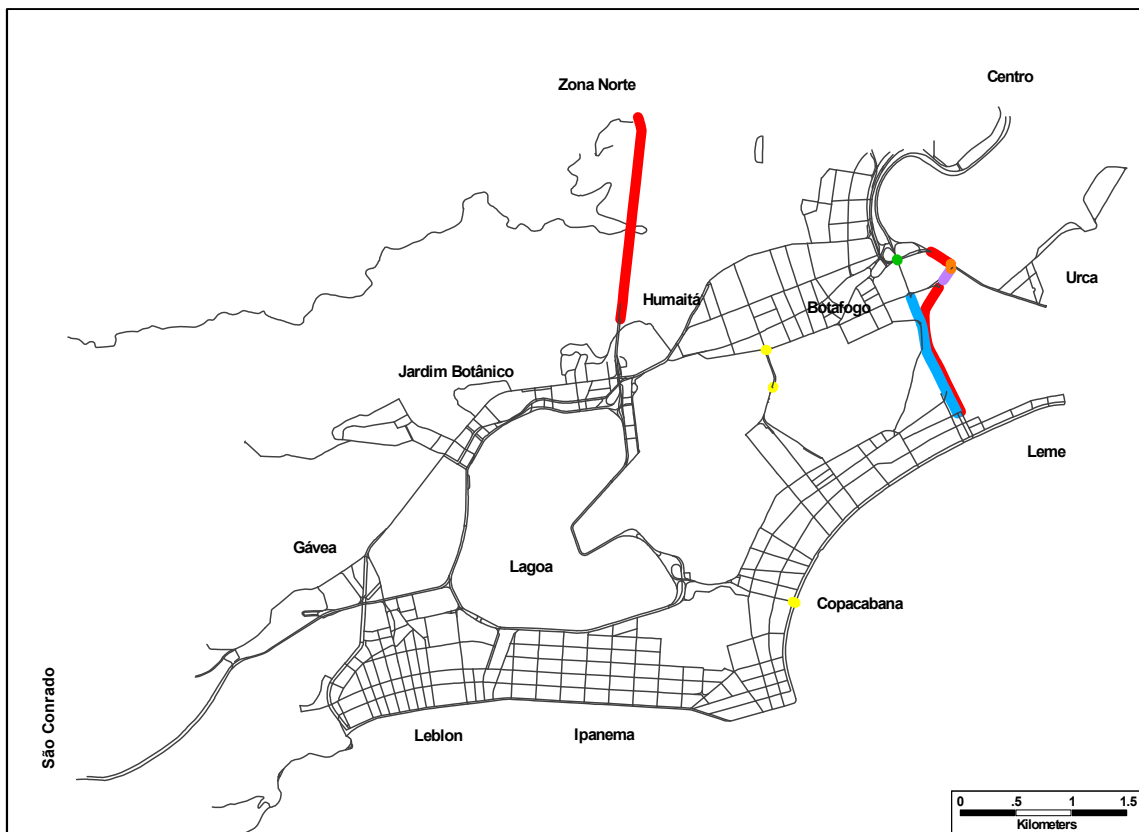
Realizando o mesmo tipo de análise apenas para os links pertencentes aos primeiros dez postos das hierarquias dos três atributos, percebe-se que as vias expressas que conectam a sub-rede ao Centro e à Zona Norte continuam se destacando para os indicadores de vulnerabilidade. Os links representativos dos túneis internos à sub-rede permanecem ainda na relação, como pode ser visto na Figura 6.19, que segue o mesmo código de cores apresentado anteriormente.



Código de cores: Azul: Congestionamento; Amarelo: Confiabilidade; Vermelho: Vulnerabilidade; Verde: Congestionamento e Confiabilidade; Violeta: Congestionamento e Vulnerabilidade; Laranja: Confiabilidade e Vulnerabilidade; Preto: os três atributos.

Figura 6.19 – Representação gráfica dos links pertencentes aos dez primeiros postos das hierarquias dos três atributos de desempenho analisados.

Concluindo as análises, a Figura 6.20 destaca apenas os links posicionados nos cinco primeiros postos das hierarquias. Percebe-se aí a predominância das cores azul, amarelo e vermelho, que representam links em uma única hierarquia, com a diferença entre os atributos ficando mais evidente.



Código de cores: Azul: Congestionamento; Amarelo: Confiabilidade; Vermelho: Vulnerabilidade; Verde: Congestionamento e Confiabilidade; Violeta: Congestionamento e Vulnerabilidade; Laranja: Confiabilidade e Vulnerabilidade; Preto: os três atributos.

Figura 6.20 – Representação gráfica dos links pertencentes aos cinco primeiros postos das hierarquias dos três atributos de desempenho analisados.

Em resumo, a análise dos resultados obtidos na aplicação mostra diferenças entre os resultados apresentados pelos três atributos, com grande correlação entre os indicadores de congestionamento e confiabilidade, e com baixa ou muito baixa correlação entre os resultados apresentados pelos indicadores de vulnerabilidade e os dos demais atributos. O Capítulo 7, a seguir, resgata os objetivos e hipóteses estabelecidas para a Tese e apresenta as conclusões que podem ser extraídas da pesquisa realizada.

7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

7.1 Conclusões

A identificação de links críticos para o desempenho de uma rede viária é fundamental para que investimentos que visem a sua melhoria sejam bem direcionados. Hierarquias obtidas a partir de indicadores de desempenho permitem, assim, que se estabeleça um *ranking* de links segundo sua importância, que pode ser utilizado como suporte para tomadas de decisão quanto a prioridades de investimento.

O foco principal da presente pesquisa foi, portanto, a elaboração de uma estrutura metodológica que permitisse identificar links críticos para o desempenho de uma rede viária para os atributos Congestionamento, Confiabilidade e Vulnerabilidade, a partir de indicadores adequados. Percebem-se, na bibliografia analisada, lacunas quanto à conceituação desses atributos; no que diz respeito a análises envolvendo mais de um atributo; e, ainda, no que diz respeito a procedimentos para a aplicação desses conceitos na hierarquização de redes viárias complexas. Dessa forma, a redução dessas lacunas foi o objetivo geral da presente Tese. Considera-se que este objetivo foi atingido, bem como os objetivos gerais e específicos, como pode ser visto nos parágrafos seguintes.

A revisão bibliográfica apresentada no Capítulo 2 mostra que o atributo Congestionamento tem seu conceito bem consolidado, não havendo grandes divergências entre os autores pesquisados. O mesmo não acontece no caso da Confiabilidade e Vulnerabilidade. De fato, vários autores sugerem que a vulnerabilidade seria um aspecto da confiabilidade, e não um atributo distinto. Foram propostas, então, definições mais precisas para um e outro atributo, baseadas na análise crítica da bibliografia e que afirmam que Confiabilidade e Vulnerabilidade são atributos distintos de desempenho. De fato, conclui-se que, conceitualmente, o atributo Confiabilidade está relacionado à incerteza quanto ao tempo e custo de viagem, decorrente da flutuação cotidiana na demanda e oferta. Vulnerabilidade, por sua vez, está relacionada ao impacto de eventos esporádicos capazes de comprometer a capacidade de um link ou grupo de links e, conseqüentemente, reduzir o desempenho da rede viária. Vale ressaltar, ainda, que desastres naturais, uma preocupação atual em função das alterações climáticas, podem ter mitigadas suas conseqüências a partir de planos que levem em consideração análises de vulnerabilidade da rede viária, o que torna ainda mais relevante a distinção desse atributo.

Conceituados os atributos, foi proposta uma estrutura metodológica factível de ser aplicada a uma rede complexa ainda que com restrição de recursos financeiros e de tempo. Essa estrutura, da forma como foi proposta, pode ser utilizada em estudos como ferramenta não só de identificação dos links mais críticos para o desempenho, mas também para a priorização de investimentos, tendo em vista que tem como resultado um ranqueamento dos links que compõem a rede. Adicionalmente, inova no sentido em que são utilizados mais de um atributo de investimento, proporcionando uma análise sob diferentes óticas de desempenho. Vale ressaltar que, embora sejam propostos indicadores específicos para os atributos tratados, a estrutura não está limitada a esses indicadores, que poderão ser substituídos por outros que, eventualmente, sejam considerados mais adequados a projetos específicos. A aplicação da estrutura metodológica proposta em uma rede de alta complexidade, representativa da Região Metropolitana do Rio de Janeiro (RMRJ), confirmou sua aplicabilidade e praticidade, tendo sido produzidas, com sucesso, hierarquias para os três atributos analisados.

A partir de extensa revisão bibliográfica, foram analisados indicadores de desempenho para os três atributos de interesse e selecionados aqueles mais adequados para a estrutura metodológica proposta, que atendessem simultaneamente a aderência à conceituação formulada e que pudessem efetivamente ser utilizados na prática.

Para o atributo Congestionamento foram selecionados os indicadores V/C, que corresponde à relação entre o volume de tráfego e a capacidade e o CI, ou Índice de Congestionamento, que mede a relação entre o tempo observado e o tempo esperado para as condições de fluxo livre. Dessa maneira, foi testado um indicador que relaciona diretamente a demanda e a oferta (V/C) e outro relacionado às relações entre tempos de viagem em condições congestionadas e em fluxo livre. Os resultados obtidos para cada um dos indicadores a partir da aplicação realizada mostraram grande correlação tanto quanto aos valores absolutos obtidos quanto às hierarquias derivadas. O poder explicativo de V/C, para os resultados de CI, é próximo a 95%, e o coeficiente de correlação dos postos obtidos nas hierarquias é ainda superior, com $r_s = 0,98$. Esses resultados permitem sugerir que V/C seria um indicador de congestionamento mais adequado, dado ser mais difundido e rotineiramente calculado em estudos de tráfego, além de calculado também rotineiramente por softwares de planejamento de transportes.

No que diz respeito ao atributo Confiabilidade, apenas um indicador foi encontrado na bibliografia capaz de ser utilizado de forma rotineira em simulações, aqui denominado de ICE, o índice de confiabilidade proposto por Eliasson (2006, 2007, 2009). O ICE

estima um coeficiente de variação a partir da razão entre o desvio padrão e o tempo médio de viagem.

Já para o atributo Vulnerabilidade, foram testados dois indicadores, o Índice de Robustez da Rede – NRI (Scott et al., 2006) e o Índice de Robustez da Rede – NRI-m, de forma a verificar semelhanças e diferenças entre os indicadores que medem o efeito da interrupção completa de um link (NRI) e o da redução da capacidade, ou interrupção parcial (NRI-m). O poder explicativo de NRI, para os resultados obtidos por NRI-m é próximo a 75%, o que, embora seja uma correlação alta, revela as diferenças metodológicas entre os dois indicadores. O coeficiente de correlação de postos, no entanto, chega a 0,92, o que mostra não haver diferenças significativas entre as hierarquias obtidas a partir de um ou outro indicador, na rede testada. O NRI-m, no entanto, tem uma vantagem em relação ao NRI: por não promover a interrupção total de links, não corre o risco de provocar a desconexão de parte da rede, o que promove distorções quando utilizado o NRI. Por sua vez, o NRI tem um procedimento mais simples do que o do NRI-m e pode ser utilizado quando o risco de desconexão de parte da rede possa ser descartado ou minimizado. Para os demais casos, recomenda-se a utilização do NRI-m.

Os resultados observados a partir da comparação de indicadores de um mesmo atributo (como foi o caso de Congestionamento e Vulnerabilidade) se mostraram coerentes, tendo sido encontrada evidência estatística de correlação, como esperado. No que se refere a indicadores de diferentes atributos, foi encontrada correlação baixa ou desprezível quando comparados indicadores de vulnerabilidade com os de congestionamento ou confiabilidade. No entanto, foi encontrada evidência estatística de correlação significativa entre os indicadores de congestionamento e confiabilidade, principalmente no que se refere às hierarquias produzidas. De fato, a comparação entre as hierarquias derivadas dos indicadores ICE (Confiabilidade) e V/C (Congestionamento) mostra um $r_s = 0,90$, o que indica que a hierarquia produzida a partir do indicador de congestionamento V/C, é muito semelhante àquela produzida a partir do indicador de confiabilidade ICE. Sendo o V/C, como já citado, um indicador mais difundido, poderia ser utilizado também como um *proxy* para a hierarquização dos links quanto à sua importância para a confiabilidade da rede.

Foram duas as hipóteses centrais testadas durante a presente pesquisa:

- “Congestionamento, Confiabilidade e Vulnerabilidade são atributos distintos.”

- “A hierarquia de links na rede viária quanto à sua importância para o desempenho da rede viária é única para cada um dos atributos testados e não correlacionadas entre si. ”

No que diz respeito à primeira hipótese, a análise da bibliografia mostrou que há consenso quanto ao conceito de Congestionamento, o que não ocorre com Confiabilidade e Vulnerabilidade, frequentemente tratadas uma como aspecto da outra. As análises dos resultados a partir da aplicação realizada sobre uma rede complexa, no entanto, mostram haver grande correlação entre os resultados obtidos a partir dos indicadores de confiabilidade e congestionamento, o que não ocorre entre os resultados obtidos a partir de vulnerabilidade quanto comparados aos dos demais atributos.

Assim, a presente Tese mostrou que, tanto a partir da análise conceitual quanto a partir dos resultados obtidos da aplicação, Vulnerabilidade deve ser considerada como um atributo distinto de Congestionamento e de Confiabilidade. Não se pode, no entanto, garantir que Vulnerabilidade seja um atributo totalmente independente de Congestionamento, pois foi encontrada correlação pequena entre esses atributos, porém com significância estatística. Já no que se refere à comparação Vulnerabilidade x Confiabilidade, não foi encontrada qualquer evidência significativa de correlação. O resultado, portanto, sugere que seria inadequado considerar-se o atributo Vulnerabilidade como um aspecto do atributo Confiabilidade ou vice-versa, contradizendo o que pode ser depreendido de alguns trabalhos como Bell (2000); Chen *et al.* (2002); e Clark e Watling (2005). Quanto à comparação entre Congestionamento e Confiabilidade, não se pode garantir que sejam atributos distintos, a partir dos resultados obtidos na aplicação realizada. Conceitualmente, há consenso na bibliografia de que sejam conceitos distintos, mas é possível que haja uma relação de causa e efeito entre os dois, tendo em vista a magnitude encontrada para a correlação entre os indicadores testados.

A segunda hipótese, relacionada às hierarquias derivadas de cada um dos atributos foi confirmada parcialmente, uma vez que foi encontrada correlação forte entre as hierarquias produzidas com base em indicadores de congestionamento e de confiabilidade. Não foi encontrada, no entanto, correlação importante entre as hierarquias derivadas do atributo Vulnerabilidade e as derivadas de Congestionamento e Confiabilidade, confirmando uma vez mais a evidência de que se tratam de atributos distintos e que merecem avaliações individualizadas. É digno de nota, no entanto, que as hierarquias produzidas a partir dos três atributos têm diferenças relevantes quando

são comparados os links no topo da ordenação, como pode ser visto na Figura 6.20, onde são apresentados de forma gráfica os cinco links mais críticos de cada hierarquia.

A principal contribuição da presente Tese é a proposição original de uma estrutura metodológica passível de ser utilizada para identificar e hierarquizar os links mais críticos para o desempenho sob diferentes óticas, em redes complexas, de forma prática, não tendo sido encontrado na bibliografia qualquer procedimento ou metodologia nesse sentido.

No que se refere particularmente à vulnerabilidade, é também proposto um procedimento inédito e original, baseado em pré-seleção de links mais críticos, não tendo encontrada proposição de metodologia similar ou que fosse aplicável a redes complexas, uma vez que as aplicações encontradas são voltadas a redes teóricas simples ou à utilização de indicadores *proxy*.

Complementarmente, no que se refere a *proxys* para a vulnerabilidade, o indicador BC, recomendado por von Ferber *et al.* (2012), e que poderia ser uma solução prática, mostrou-se inadequado, ao menos para redes complexas tais como a utilizada nesta pesquisa. De fato, a análise estatística dos resultados obtidos a partir da aplicação realizada não indica correlação entre vulnerabilidade e centralidade *betweenness* (medida por BC), seja no que se refere aos valores absolutos dos indicadores, seja nas hierarquias produzidas.

No campo teórico, são propostos conceitos claros para os três atributos tratados, em particular os atributos de Confiabilidade e Vulnerabilidade. A presente Tese mostra evidências de que estes, ao menos, sejam atributos distintos, o que não é consenso na bibliografia. É inédita também, ao menos com base na bibliografia pesquisada, a verificação da existência de correlação entre atributos de desempenho, com auxílio de ferramentas estatísticas e com base em extensa aplicação em rede complexa.

É original ainda a preocupação em nominar indicadores por atributo de desempenho tendo como preocupação central a sua aplicabilidade em rede complexa. A praticidade e adequação dos indicadores selecionados pôde ser verificada através da aplicação realizada. De fato, foram produzidas hierarquias de links com base nos indicadores de Congestionamento, Confiabilidade e Vulnerabilidade e que poderiam ser utilizadas para a priorização de investimentos em melhoria do desempenho da rede viária. Sendo a RMRJ uma das vinte maiores regiões metropolitanas do mundo (Nações Unidas, 2014), é razoável concluir que os indicadores de desempenho selecionados, bem como a

estrutura metodológica proposta sejam aplicáveis de forma genérica a outras redes viárias complexas.

Finalmente, os experimentos realizados mostraram evidências de que o atributo Vulnerabilidade dá origem a hierarquias que revelam links com maior importância estratégica, por pertencerem a rotas mais demandadas; ou para as quais as alternativas disponíveis são mais escassas ou ainda envolvem tempos ou custos significativamente mais elevados. Já as hierarquias originadas a partir dos atributos Congestionamento e Confiabilidade seriam mais relevantes para decisões de nível operacional uma vez que revelam links que impactam diretamente no tempo e custo de viagem em condições cotidianas e que são possíveis gargalos para o fluxo de tráfego. Essas evidências de que indicadores de Vulnerabilidade seriam mais indicados para análises estratégicas sugerem que deveriam ser mais utilizados no planejamento de transportes, especialmente quando da formulação de Planos Diretores, de planos de contingência para desastres (naturais ou antropogênicos) e na priorização de investimentos de médio e longo prazo.

7.2 Recomendações

Em resumo, a presente Tese confirmou seu objetivo principal com a proposição de uma estrutura metodológica para determinação e ordenação de links críticos para o desempenho viário, aplicável de forma prática a redes viárias complexas. Os três atributos de desempenho analisados foram conceituados com respaldo na bibliografia, tendo sido encontradas evidências de que Vulnerabilidade é de fato um atributo distinto de Congestionamento e Confiabilidade. Os resultados apresentados pelos indicadores de vulnerabilidade sugerem que seja essa uma abordagem adequada para a priorização de projetos estratégicos. Foram ainda encontradas semelhanças relevantes entre as hierarquias produzidas a partir dos atributos Congestionamento e Confiabilidade, apesar de, conceitualmente, os dois atributos representarem fenômenos distintos.

Adicionalmente, análises auxiliares desenvolvidas no decorrer da presente pesquisa apontaram para correlação fraca entre indicadores de congestionamento e de centralidade *betweenness* (coeficientes de Pearson e Spearman inferiores em módulo a 0,5), o que contraria, em parte, o estudo de Holme (2003), também voltado para redes complexas.

Sugere-se, assim, como sequência para a presente pesquisa:

- Investigar a utilização de indicadores de vulnerabilidade em redes de transporte público;
- Aprofundar a análise da utilização de indicadores de vulnerabilidade como base para a priorização de projetos, seja na elaboração de Planos Diretores de Transporte, seja em planos de contingência para desastres;
- Analisar a possível relação de causa e efeito entre os atributos Confiabilidade e Congestionamento, sugerida pelos altos coeficientes de correção observados;
- Aprofundar a investigação de correlação entre os indicadores de vulnerabilidade e centralidade;
- Investigar se há casos em que os indicadores de centralidade possam ser utilizados como *proxy* de vulnerabilidade (e em quais casos), tal como sugerido pelo trabalho de von Ferber et al. (2002);
- Investigar a correlação entre os indicadores de diferentes atributos, além da centralidade, em cenários onde a distribuição espacial das viagens seja mais uniforme, minimizando a influência da demanda;
- Investigar a utilização de algoritmos de corte mínimo, da Teoria dos Grafos, como critério adicional para a pré-seleção de links na estrutura metodológica proposta;
- Desenvolver estratégias para intervenções na rede viária de forma a reduzir os índices de vulnerabilidade, tais como a proposição de rotas e modos de transporte alternativos;
- Analisar comparativamente o impacto no desempenho da rede da utilização de hierarquias oriundas de diferentes atributos para a priorização de intervenções na rede viária;
- Verificar a possível influência da topologia da rede nos indicadores derivados de diferentes atributos e sua correlação;
- Verificar a possível influência da intensidade do carregamento nas hierarquias obtidas, usando como base uma mesma rede viária.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AFTABUZZAMAN, M., CURRIE, G. E SARVI, M., 2011. "Exploring the underlying dimensions of elements affecting traffic congestion relief impact of transit", *Cities*, v. 28, n. 1, pp. 36-44.

ANTP – ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTES PÚBLICOS, 2013, *Premissas para um plano de mobilidade urbana*, ANTP, São Paulo, SP, Brasil.

ANTP – ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTES PÚBLICOS, 2014, *Sistema de informações da mobilidade urbana – Relatório Geral 2012*, ANTP, Brasil

AUSTROADS, 2009, *Estimating road network congestion and associated costs*, In: Austroads research report, Sidney, Australia.

BATES, J., POLAK, J., JONES, P., JONES, P. E COOK, A., 2001, "The valuation of reliability for personal travel", *Transportation Research Part E*, v. 37, n. 2-3, pp. 191-229.

BELL, M. G. H., 2000, "A game theory approach to measuring the performance reliability of transport networks", *Transportation Research Part B*, v. 34, n. 6, pp. 533-545.

BERDICA, K., 2002, "An introduction to road vulnerability: what has been done, is done and should be done", *Transport Policy*, v. 9, n. 2, pp. 117-127.

BERTINI, R., 2005, *Congestion and its extent*. Disponível em <www.its.pdx.edu>. Acesso em: 10/11/2013.

BERTOLINI, L., LE CLERCQ, F., KAPOEN, L., 2005, "Sustainable accessibility: a conceptual framework to integrate transport and land use plan-making. Two test applications in the Netherlands and a reflection on the way forward", *Transport Policy*, v. 12, n. 3, pp. 207-220.

BOARNETT, M. G., KIM, E. J., PARKANY, E., 1998, "Measuring traffic congestion". *77th Annual meeting of the Transportation Research Board*, Washington, DC, USA.

BOCCHINI, P., FRANGOPOL, D. M., 2011, "A stochastic computational framework for the joint transportation network fragility analysis and traffic flow distribution under extreme events", *Probabilistic Engineering Mechanics*, v. 26, pp. 182-193.

BONO, F., GUTIÉRREZ, E., 2011, "A network-based analysis of the impact of structural damage on urban accessibility following a disaster: the case of the seismically damaged Port Au Prince and Carrefour urban road networks", *Journal of Transport Geography*, v. 19, n. 6, pp. 1443-1455.

BÖRJESSON, M., ELIASSON, J. E FRANKLIN, J. P., 2012, "Valuations of travel time variability in scheduling versus mean–variance models", *Transportation Research Part B*, v. 46, n. 6, pp. 855-873.

BRAESS, D., NAGURNEY, A., WAKOLBINGER, T., 2005, "On a paradox of traffic planning", *Transportation Science*, v. 39, pp. 446-450, tradução do original em alemão: "Über ein Paradoxen aus der Verkehrsplanung", *Unternehmensforschung*, v. 12, pp. 258-268.

BREMMER, D. *et al.*, 2004, "Measuring congestion: learning from operational data", *Transportation Research Record*, n. 1895, pp. 188-196.

CALIPER, 1996, *Travel Demand Modeling with TransCAD 3.0*, Newton, MA, USA.

CALIPER, 2013, *Travel Demand Modeling with TransCAD 6.0*, Newton, MA, USA.

CAMBRIDGE SYSTEMATICS, TEXAS TRANSPORTATION INSTITUTE, 2005, *Traffic congestion and reliability – trends and advanced strategies for congestion mitigation*, FHWA – Federal Highway Administration, Cambridge, MA, EUA.

CARRION, C., LEVINSON, D., 2012, "Value of travel time reliability: A review of current evidence", *Transportation Research Part A*, v. 46, n. 4, pp. 720-741.

CATS, O., JENELIUS, E., 2014, "Dynamic vulnerability analysis of public transport networks: mitigation effects of real-time information", *Networks and Spatial Economics* 14, 435-463.

CERWENKA, P., MEYER-RUHLE, O., 2009, "Are Congestion Costs External Costs?", *Traffic Engineering and Control*, v. 50, n. 6, pp. 275-280.

CHARLES, P., 2005, "Effective implementation of regional transport strategy: Traffic incident management case study", *WIT Transactions on the Built Environment*, n. 77, pp. 609–618.

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, A., ZHOU, Z., 2010, "The α -reliable mean-excess traffic equilibrium model with stochastic travel times", *Transportation Research Part B*, v. 44, n. 4, pp. 493-513.

CHEN, L., MILLER-HOOKS, 2012, "Resilience: An Indicator of Recovery Capability in Intermodal Freight Transport", *Transport Science*, v. 46, n. 1, pp. 109-123.

CLARK, S., WATLING, D., 2005, "Modelling network travel time reliability under stochastic demand", *Transportation Research Part B*, v. 39, n. 2, pp. 119-140.

COELHO, E. C., 2009, *Avaliação dos Níveis de Congestionamento em Vias Arteriais com a Utilização da Micro-Simulação*. Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

COLMAN, S. B., 2007, *Predicting the Duration of Congestion on Bay Area Freeways*. Disponível em: <www.ite.org>. Acesso em: 10/11/2013.

COMMISSION OF THE EUROPEAN COMMUNITIES, 2008, *Strategy for the Internalization of External costs - Technical annex*. Brussels, Belgium.

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: www.mech.kuleuven.be/cib/verkeer/dwn/pub/PJ2009B.pdf. Acesso em: 10/04/2013.

DEHGHANISANIJ, M., FLINTSCH, G. W., MCNEIL, S., 2013, "Vulnerability analysis of degrading roadway networks". In: *TRB 2013 Annual Meeting*, Transportation Research Board.

DEPUY, G., 1999, "From the 'magic circle' to 'automobile dependence': measurements and political implications", *Transport Policy*, v. 6, pp 1-17.

DEVARASSETTY, C., BURRIS, M., SHAW, W. D., 2012, "The value of travel time and reliability-evidence from a stated preference survey and actual usage", *Transportation Research Part A*, v. 46, n. 8, pp. 1227-1240.

DUCRUET, C., LUGO, I., 2013, "Structure and dynamics of transportation networks: models, methods and applications" In: *The SAGE Handbook of Transport Studies*. SAGE, pp. 347-364.

EISELE, B., SCHRANK, D., LOMAX, T., 2011, *TTI's congested corridors report*. Texas Transportation Institute, The Texas A&M University System, USA.

ELEFTERIADOU, L., SRINIVASAN, S., STEINER, R., TICE, P. E LIM, K., 2012, *Expanded transportation performance measures to supplement level of service (LOS) for growth management and transportation impact analysis*. Florida Department of Transportation, University of Florida, Florida, USA.

ELIASSON, J., 2006, "Forecasting Travel Time Variability". In: *Proceedings of the European Transport Conference*, Association for European Transport and contributors.

ELIASSON, J., 2007. "The relationship between travel time variability and road congestion". In: *Proceedings from the 11th World Conference on Transport Research*, University of Berkeley, USA.

ELIASSON, J., 2009 (não publicado), *The relationship between travel time variability and road congestion*. Centre for Transport Studies, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.

EMBARQ BRASIL, 2015, *DOTS Cidades – Manual de Desenvolvimento Urbano Orientado ao Transporte Sustentável*. EMBARQ, Brasil.

ENGELSON, L. AND FOSGERAU, M., 2011, "Additive measures of travel time variability", *Transportation Research Part B*, v. 45, n. 10, 1560-1571.

ERATH, A., *et al.*, 2010, "Vulnerability Assessment of the Swiss Road Network", *Transportation Research Record*, n. 2137, pp. 118-126.

Federal Highway Administration – FHWA, 2012, *The urban congestion report (ECR): documentation and definitions*. Disponível em: <ops.fhwa.dot.gov>. Acesso em: 8/8/2015.

FEITELSON, E., SALOMON, I., 2000, "The implications of differential network flexibility for spatial structures", *Transportation Research Part A*, v. 34, n. 6, pp. 459-479.

FERNALD, J. G., 1999, "Roads to Prosperity? Assessing the Link Between Public Capital and Productivity", *The American Economic Review*, v. 89, n. 3, pp 616-638.

FIGUEIREDO FILHO, D. B., SILVA JÚNIOR, J. A., 2009, "Desvendando os mistérios do coeficiente de correlação de Pearson", *Revista Política Hoje*, v. 18, n. 1, pp. 115-146.

FOSGERAU, M., KARLSTRÖM, A., 2010, "The value of reliability", *Transportation Research Part B*, v. 44, n. 1, pp. 38-49.

GARCIA, C. H., 1989, *Tabelas para classificação do coeficiente de variação*, Circular Técnica 171. Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais, Brasil.

GONÇALVES, J. A. M., PORTUGAL, L. S., NASSI, C. D., 2009, "Centrality indicators as an instrument to evaluate the integration of urban equipment in the area influence of a rail corridor", *Transportation Research Part A*, v. 43, n. 1, pp. 13-15.

GOOGLE, 2012. *Google maps*. Software, disponível em: <maps.google.com>. Acesso em: 10/11/2013.

GOOGLE, 2016. *Google maps*. Software, disponível em: <maps.google.com>. Acesso em: 7/8/2016.

GRANT, M., BOWEN B., DAY, M., WINICK, R., BAUER J., CHAVIS, A. E TRAINOR S., 2011, *Congestion management process: a guidebook*. In: Federal Highway Administration report FHWA-HEP-11-011, FHWA, EUA.

HANSEN, W. G., 1959, "How accessibility shapes land use", *Journal of the American Institute of Planners*, v. 25, n. 2, pp. 73-76.

HIGGINS, P., CAMPANERA J. M., 2011, "(Sustainable) Quality of life in English city locations", *Cities*, v. 28, n. 4, pp.290-299.

HOLME, P., 2003, "Congestion and centrality in traffic flow on complex networks", *Advances in Complex Systems*, v. 6, n. 2, pp. 163-176.

HUSDAL, J., 2004, *Reliability and vulnerability versus costs and benefits*. In: INSTR2004, the Second International Symposium on Transportation Network Reliability, Christchurch and Queenstown, NZ, 20-24 August 2004.

IBGE, 2010, *Sinopse do censo demográfico 2010*. Disponível em: <www.censo2010.ibge.gov.br/sinopse/index.php?dados=8>. Acesso em 28/6/2015.

INCT – INSTITUTO NACIONAL DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA, 2013, *Evolução da frota de automóveis e motos no Brasil – 2001-2012 (Relatório 2013)*. INCT Observatório das Metrôpoles, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

IPEA, ANTP, 1998, *Redução das deseconomias urbanas com a melhoria do transporte público: relatório síntese*. IPEA, São Paulo, SP, Brasil.

ITDP – INSTITUTE FOR TRANSPORTATION AND DEVELOPMENT POLICY, 2014, *TOD Standard*. ITDP, New York, NY, USA.

JENELIUS, E., 2009, “Network structure and travel patterns: explaining the geographical disparities of road network vulnerability”, *Journal of Transport Geography*, v. 17, n. 3, pp. 234-244.

JENELIUS, E., 2010, *Large-Scale Road Network Vulnerability Analysis*. Tese de Ph.D.. KTH 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, pp. 746-760.

JENELIUS, E., MATTSSON, L.-G., LEVINSON, D., 2011, “Traveller delay costs and value of time with trip chains, flexible activity scheduling and information”, *Transportation Research Part B*, v. 45, n. 5, pp. 789-807.

JENELIUS, E., PETERSEN T., MATTSSON, L., 2006, “Importance and exposure in road network vulnerability analysis”, *Transportation Research Part A*, v. 40, n. 7, pp 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. 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.

KNOOP, V., VAN ZUYLEN, H. E HOOGENDOORN, S., 2008, "The influence of spillback modelling when assessing consequences of blockings in a road", *European Journal of Transport and Infrastructure Research*, v. 8, n. 4, pp. 287-300.

KUMAR, A., PEETA, S., 2014, "Slope-based path shift propensity algorithm for the static traffic assignment problem", *International Journal for Traffic and Transport Engineering*, v. 4, n. 3, pp. 297-319.

KUZMYAK, J. R., 2012, *Land use and traffic congestion*. Arizona Department of Transport Research Center.

LI, M., 2008, *Robustness for road networks – a framework with combined DTA models*. Tese de Ph.D., Delft University of Technology, Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Transport and Planning Section, Delft, Países Baixos.

LI, Z., HENSHER, D. A., ROSE, J. M., 2010, "Willingness to pay for travel time reliability in passenger transport: a review and some new empirical evidence", *Transportation Research Part E*, v. 46, n. 3, pp. 384-403.

LINDLEY, J., 1987, "Urban freeway congestion: quantification of the problem and effectiveness of potential solutions", *ITE Journal*, v. January 1987, pp. 27-32.

LITMAN, T., DOHERTY, E., 2009, *Transportation cost and benefit analysis II – congestion costs*. Victoria Transport Policy Institute.

LITMAN, T., 2012a, *Smart congestion relief – comprehensive analysis of traffic congestion costs and congestion reduction benefits*. Victoria Transport Policy Institute. Disponível em: <www.vtpi.org>. Acesso em: 01/05/2013.

LITMAN, T., 2012b, *Rail Transit in America – a comprehensive evaluation of benefits*. Victoria Transport Policy Institute. Disponível em: <www.vtpi.org>. Acesso em: 29/09/2014.

LIU, M., FRANGOPOL, D. M., 2006, "Probability based bridge network performance evaluation", *Journal of Bridge Engineering*, v. September/October 2006, pp. 633-641.

LIU, M., MAY, T. E SHEPHERD, S., 2011, "On the fundamental diagram and supply curves for congested urban networks", *Transportation Research Part A*, v. 45, n. 9, pp. 951-965.

LOMAX, T., SCHRANK, D., TURNER, S. AND MARGIOTTA, R., 2003, *Selecting Travel Time Reliability Measures*. California Department of Transportation, Colorado Department of Transportation, Florida Department of Transportation, Kentucky Transportation Cabinet, Maryland State Highway Administration, Minnesota Department of Transportation, New York State Department of Transportation, Oregon Department of Transportation, Texas Department of Transportation, Virginia Department of Transportation, Federal Highway Administration, USA.

MCLEOD, D. S., MORGAN, G., 2011, *Florida's Performance Measures and Experience*. Florida Department of Transportation, FL, USA.

METROPOLITAN TRANSPORTATION COMMISSION - SAN FRANCISCO BAY AREA – MTC, 2008, *Congested Freeway Locations*. Disponível em: <www.mtc.ca.gov>. Acesso em: 10/11/2014.

MEYER, M. D., 1997, *A tool for alleviating traffic congestion and enhancing mobility*. US Department of Transportation Federal Highway Administration, Washington D.C.

MINISTÉRIO DAS CIDADES, 2015, *PlanMob – Caderno de referência para elaboração de Plano de Mobilidade Urbana*. Ministério das Cidades, Brasil.

MOHALLEM, D. F., 2008, *Avaliação do coeficiente de variação como medida da precisão em experimentos com frangos de corte*. Dissertação de M. Sc., Faculdade de Medicina Veterinária, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, Brasil.

MORÁN, C., 2010, *Relevance and reliability of area-wide congestion performance measures in road networks*. Tese de Ph.D., Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.

MORÁN, C. E BANG, K. -L., 2010, "Reliability of transport measures: Stockholm's case", *Transport 163*, v. TR2, pp. 85-91.

MUKAKA, M. M., 2012, "Statistics Corner: A guide to appropriate use of correlation coefficient in medical research", *Malawi Medical Journal*, v. 24, n. 3, pp. 69-71.

MURRAY, A. T., MATISZIW, T. C., GRUBESIC, T. C., 2008, "A Methodological Overview of Network Vulnerability Analysis", *Growth and Change*, n. 39, n. 4, pp. 573-592.

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, pp. 88-96.

NAÇÕES UNIDAS, 2014, *World Urbanization Prospects, the 2014 revision*. Department of Economic and Social Affairs. Disponível em: <esa.un.org/unpd/wup/>. Acesso em: 15/09/2016.

NAGELKERKE, N. J. D., 1991, "Miscellanea – A note on a general definition of the coefficient of determination", *Biometrika*, v. 78, n. 3, pp. 691-692.

NATIONAL COMPLETE STREETS COALITION, 2015, *Fundamentals*. Disponível em: <www.smartgrowthamerica.org/complete-streets>. Acesso em: 11/7/2015.

NETO, M. A. C., 2015, *A previsão como modelo de regressão*. Disponível em: <www.ie.ufrj.br/download>. Acesso em: 11/8/2016.

NICHOLSON, A., 2003, "Transport network reliability measurement and analysis", *Revista Transportes*, v. 11, pp. 49-62.

OECD/ECMT, 2007, *Managing Urban Traffic Congestion*. Organization for the Economic Co-operation and Development – OECD / European Conference of Ministers of Transport – ECMT.

OLIVEIRA, E. L., 2012. *Indicadores para hierarquização de ligações em rede viária urbana com base em desempenho*. Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

OLIVEIRA, E. L., PORTUGAL, L. S., PORTO JUNIOR, W., 2013, "Determinando links críticos em uma rede viária: indicadores de vulnerabilidade". In: *XXVII ANPET – Congresso Nacional de Pesquisa e Ensino e Transporte*. Belém do Pará, Brazil.

OLIVEIRA, E. L., PORTUGAL, L. S., PORTO JUNIOR, W., 2014a, "Determinando links críticos em uma rede viária: indicadores de vulnerabilidade e congestionamento". In: *18th Pan-American Conference (PANAM 2014)*. Santander, Espanha.

OLIVEIRA, E. L., PORTUGAL, L. S., PORTO JUNIOR, W., 2014b, "Determining critical links in a road network: vulnerability and congestion indicators", *Procedia – Social and Behavioral Sciences*, 162, pp 158-167.

OLIVEIRA, E. L., PORTUGAL, L. S., PORTO JUNIOR, W., 2016, "Indicators of reliability and vulnerability: similarities and differences in ranking links of a complex road system". *Transportation Research Part A*, v. 88, pp. 195-208.

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

PDTU, 2005b, *PDTU - Apresentação da pesquisa de Origem-Destino*, Governo do Estado do Rio de Janeiro. Disponível em <www.rj.gov.br/web/setrans/exibeconteudo?article-id=226287>. Acesso em: 5/02/2012.

PORTUGAL, L. S. E ARAÚJO, L. A., 2008, "Procedure to analyse the performance of urban networks in brazilian cities". *Journal of Urban Planning and Development*, v. 134, n. 3, pp. 119-128.

PUTH, M.-T., NEUHÄUSER, M., RUXTON, G. D., 2014, "Effective use of Pearson's product-moment correlation coefficient", *Animal Behaviour*, v. 93, pp. 183-189.

PUTH, M.-T., NEUHÄUSER, M., RUXTON, G. D., 2015, "Effective use of Spearman's and Kendall's correlation coefficients for association between two measured traits", *Animal Behaviour*, v. 102, pp. 77-84.

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

ROQUE, A. C., 2015, *Notas de aula, Curso de Probabilidade e Estatística II, USP Riberão Preto*. Disponível em <sisne.org/?page_id=154>. Acessado em: 11/8/2016.

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.

SAFIROVA, E., GILLINGHAM, K., HOUDE, S., 2007, "Measuring marginal congestion costs of urban transportation: Do networks matter?", *Transportation Research Part A*, v. 41, n. 8, pp. 734-749.

SALOMON, I., MOKHTARIAN, P., 1997, "Coping with Congestion: Understanding the Gap between Policy Assumptions and Behavior", *Transportation Research Part D*, Vol. 2, No. 2, pp. 107-123.

SCHRANK, D., LOMAX, T. E EISELE, B., 2011, *TTI's Urban mobility report*. Texas Transportation Institute, The Texas A & M University System.

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". In: *European Transport Conference*, Strasbourg, França.

SMALL, K. A., WINSTON, C., YAN, J., 2005, *Uncovering the distribution of Motorists' preferences for travel time and reliability*, University of Irvine. Disponível em: <www.socsci.uci.edu>. Acesso em: 14/8/14.

SMIT, R., 2006, *An examination of congestion in road traffic emission models and their application to urban road networks*. Tese de Ph.D., Griffith University, School of Environmental Planning, Faculty of Environmental Sciences, Australia.

SMIT, R., BROWN, A. L. E CHAN, Y. C., 2008, "Do air pollution emissions and fuel consumption models for roadways include the effects of congestion in the roadway traffic flow?", *Environmental Modelling and Software*, v. 23, n. 10-11, pp. 1262-1270.

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*, v. 11, n. 2, 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.

SURFACE TRANSPORTATION POLICY PROJECT – STPP, 2001, *Easing the burden – a companion of the Texas Transportation Institute's congestion study*. Surface Transportation Policy Project – STPP, Washington, DC, USA.

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>. Acesso em: 23/8/2015.

TAYLOR, B. D., 2002, "Rethinking Traffic Congestion", *Access*, v. 21, pp. 8-16.

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.

TAYLOR, M. A. P., SUSILAWATI, 2012, "Remoteness and accessibility in the vulnerability analysis of road networks", *Transportation Research Part A*, v. 46, n. 5, pp. 761-771.

TAYLOR, M. A. P., WOOLLEY, J. E. E ZITO, R., 2000, "Integration of the global positioning system and geographical information systems for traffic congestion studies", *Transportation Research Part C*, v. 8, n. 1-6, pp. 257-285.

TRANSPORT SCOTLAND, 2006, *Congestion data report 2006*. Disponível em: <www.transportscotland.gov.uk>. Acesso em: 8/8/2015.

TRANSPORTATION ASSOCIATION OF CANADA – TAC, 2006, *Performance measures for road networks: a survey of Canadian use*. Canada: Transport Canada.

TRANSPORTATION RESEARCH BOARD – TRB, 2000, *A Guidebook for performance-based transportation planning. NCHRP Report 446*. EUA: Transportation Research Board.

TRANSPORTATION RESEARCH BOARD – TRB, 2006, *Performance measures and targets for transportation asset management. NHCRP Report 551*. EUA: Transportation Research Board.

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

TSUBOTA, T., BHASKAR, A., CHUNG, E. E GEROLIMINIS, N., 2013, "Information provision and network performance represented by macroscopic fundamental diagram". Versão do autor para trabalho aceito para publicação em *Transportation Research*

Board 92nd annual meeting proceedings, Washington, D.C., USA. Disponível em: <eprints.qut.edu.au>. Acesso em: 10/11/2013.

UK HIGHWAYS AGENCY, 2002, *Incident management study*. UK Highways Agency. Disponível em: <www.highways.gov.uk/aboutus/1876.aspx>. Acesso em: 28/10/2011.

VAN LINT, J. W. C. E VAN ZUYLEN, H. J., 2005, "Monitoring and predicting freeway travel time reliability", *Transportation Research Record*, v. 1917, pp. 54–62.

VAN LINT, J. W. C, VAN ZUYLEN, H. J. E TU, H., 2008, "Travel time unreliability on freeways: Why measures based on variance tell only half the story", *Transportation Research Part A*, v. 42, n. 1, pp. 258-277.

VON FERBER, C, BERCHE, B., HOLOVATCH, T., HOLOVATCH, Y., 2012, "A tale of two cities – vulnerabilities of the London and Paris transit networks", *Journal of Transportation Security*, v. 5, n. 3, 199-216.

VICKREY, W. S., 1969, "Congestion theory and transport investment". *The American Economic Review*, v. 59, n. 2, pp. 251-260.

ZHANG, M., LOMAX, T., 2007, "Estimating Congestion Index at the Link Level with TransCAD GIS". In: *Plan, Build, and Manage Transportation Infrastructure in China 2008*, American Society of Civil Engineers.

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.