



INDICADORES PARA HIERARQUIZAÇÃO DE LIGAÇÕES EM REDE VIÁRIA URBANA COM BASE EM DESEMPENHO

Eduardo Leal de Oliveira

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Transportes.

Orientador: Walter Porto Junior

Rio de Janeiro

Maio de 2012

INDICADORES PARA HIERARQUIZAÇÃO DE LIGAÇÕES EM REDE VIÁRIA
URBANA COM BASE EM DESEMPENHO

Eduardo Leal de Oliveira

DISSERTAÇÃO 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 MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA DE TRANSPORTES.

Examinada por:

Prof. Walter Porto Junior, Dr.-Ing.

Prof. Licínio da Silva Portugal, D.Sc.

Prof. Oswaldo Cavalcanti da Costa Lima Neto, Dr.-Ing.

Prof. José Agostinho Anachoreta Leal, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL
MAIO DE 2012

Oliveira, Eduardo Leal de

Indicadores para Hierarquização de Ligações em Rede Viária Urbana com Base em Desempenho / Eduardo Leal de Oliveira. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2012.

XV, 149 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Walter Porto Junior

Dissertação (Mestrado) – UFRJ/COPPE/Programa de Engenharia de Transportes, 2012.

Referências Bibliográficas: p. 141-145.

1. Congestionamento de Tráfego. 2. Rede Viária. 3. Hierarquização de Ligações. I. Porto Junior, Walter. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia de Transportes. III. Título.

DEDICATÓRIA

À minha mulher Letícia e meus filhos Priscilla, André, Pedro, Matheus e Paulo.

AGRADECIMENTOS

Pelo incentivo que motivou este empreendimento, à minha mulher Letícia Reis Alves Junqueira e meu irmão Fabrício Leal de Oliveira.

Ao Professor Walter Porto Junior pela orientação. Sua dedicação e conselhos em muito contribuíram para a eventual qualidade deste trabalho.

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

Aos professores Licínio da Silva Portugal, José Agostinho Anachoreta Leal e Oswaldo Cavalcanti da Costa Lima Neto pela participação na banca de defesa.

À minha irmã Taís Leal de Oliveira pela ajuda na revisão do texto.

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

A todo o pessoal do PET: funcionários, professores e colegas.

Aos meus pais, Amarílio e Elda.

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

INDICADORES PARA HIERARQUIZAÇÃO DE LIGAÇÕES EM REDE VIÁRIA URBANA COM BASE EM DESEMPENHO

Eduardo Leal de Oliveira

Maio/2012

Orientador: Walter Porto Junior

Programa: Engenharia de Transportes

Este trabalho estuda e procura identificar os principais indicadores de desempenho relacionados à fluidez do tráfego encontrados na literatura, analisando-os e classificando-os segundo os aspectos e atributos relacionados ao desempenho de redes viárias: Abrangência, Congestionamento, Confiabilidade, Vulnerabilidade, Risco e Flexibilidade. Para tal, cada indicador é descrito e discutido, sendo apresentada metodologia de cálculo para seus índices representativos. Com vistas à realização de um Estudo de Caso, é selecionado um conjunto de indicadores dentre os analisados, de forma a cobrir os aspectos de desempenho de rede e permitir um exemplo comparativo. O Estudo de Caso apresentado ao final é aplicado à uma sub-rede da Cidade do Rio de Janeiro, com a apresentação de hierarquias derivadas da aplicação dos indicadores selecionados e comentados os diferentes resultados obtidos. Os estudos mostram que as hierarquias resultantes são coerentes com os aspectos focados por cada indicador, conforme previsto.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

RANKING INDEXES FOR LINKS IN URBAN ROAD NETWORKS WITH A
PERFORMANCE ORIENTED APPROACH

Eduardo Leal de Oliveira

May/2012

Advisor: Walter Porto Junior

Department: Transportation Engineering

The purpose of this work is to identify and study the main indexes regarding traffic flow as found in the literature, analysing and classifying them in respect to the following aspects and attributes related to network performance: Scope, Congestion, Reliability, Vulnerability, Risk and Flexibility. To that end, each index is described and discussed, as well as the mathematical and computational methodology on which they are based. In order to build a Case Study, a group of indexes was selected from the whole set studied, covering the main aspects of network performance, allowing for a comparative example. The Case Study, then, is applied to a subarea network of the City of Rio de Janeiro, and the different rankings derived from the selected indexes application are presented, followed by a discussion of the results. Finally, the studies show that the resulting rankings are consistent to the main aspects focused by each index, as expected.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Relevância e Justificativa do Tema.....	1
1.2	Objetivos	4
1.3	Estrutura do Trabalho	4
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
2.1	Considerações Iniciais.....	6
2.2	Desempenho de Rede.....	8
2.3	Congestionamento	9
2.4	Confiabilidade.....	18
2.5	Vulnerabilidade e Risco	25
2.6	Flexibilidade	28
2.7	Rede Viária e modelagem	28
2.8	Síntese da Revisão Bibliográfica	31
3	INDICADORES – ANÁLISE E CLASSIFICAÇÃO	33
3.1	Delimitação da Análise	33
3.2	Descrição dos Indicadores Levantados	35
3.2.1	Indicadores do HCM – Nível de Serviço (NS) e Relação Volume sobre Capacidade (V/C)	35
3.2.2	Índice de Congestionamento (CI)	38
3.2.3	Índice de Robustez da Rede – NRI.....	40
3.2.4	Índice de Robustez da Rede-modificado – NRI-m	43

3.2.5	Índice de Robustez de Viagens em Rede – NTR.....	44
3.2.6	Índice de Importância – II.....	45
3.2.7	Índice de Exposição – IE	46
3.2.8	Índice de Vulnerabilidade com Base em Célula – IVBC.....	47
3.2.9	Índice de Custo Marginal sob Congestionamento – ICMC	49
3.2.10	Índice de Risco de Nicholson – IRN.....	52
3.2.11	Índice de Vulnerabilidade de Erath (IVE)	55
3.3	Análise Comparativa dos Indicadores Levantados	56
3.3.1	Principais Aspectos para Comparação	57
3.3.2	Análise de Cada Indicador Quanto aos Atributos e Aspectos Enumerados	62
3.3.3	Sumário Comparativo dos Indicadores Levantados	76
4	PREPARAÇÃO PARA O ESTUDO DE CASO.....	81
4.1	Seleção da Rede de Estudo	81
4.2	Seleção do Software de Modelagem	85
4.3	Seleção dos Indicadores para o Estudo de Caso	88
4.4	Metodologia para Determinação dos Indicadores Seleccionados.....	93
5	ESTUDO DE CASO.....	104
5.1	Determinação da Matriz de Viagens para o Estudo de Caso	104
5.2	Metodologia de Processamento	109
5.3	Alocação da Matriz da Hora de Pico sobre a Rede Viária.....	110
5.4	Determinação dos Valores dos Índices.....	113
5.4.1	Determinação da Relação V/C e do Índice de Congestionamento (CI)...	113

5.4.2	Determinação do Índice ICMC2.....	117
5.4.3	Seleção dos <i>Links</i> para os Demais Indicadores e para a Análise Comparativa.....	120
5.4.4	Determinação do Índice NRI.....	122
5.4.5	Determinação do Índice II.....	124
5.4.6	Determinação do Índice NRI-m.....	127
5.5	Conclusões do Estudo de Caso.....	129
6	CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES.....	135
6.1	Conclusões.....	135
6.2	Recomendações.....	140
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	141
	GLOSSÁRIO.....	146
	ANEXO.....	149

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – A implicação das tendências atuais nas redes de transporte.....	7
Figura 2.2 – Classificação do Congestionamento.....	21
Figura 2.3 – Matriz de risco – combinação de probabilidade e consequência.....	31
Figura 2.4 – Representação gráfica de um segmento de rede.....	33
Figura 3.1 – Exemplo ilustrativo da seleção de links críticos com base na relação V/C.....	46
Figura 4.1 – Rede de simulação para o Estudo de Caso.....	86
Figura 4.2 – Determinação da hierarquia segundo a Relação Volume/Capacidade – V/C.....	96
Figura 4.3 – Determinação da hierarquia segundo o Índice de Congestionamento - CI.....	97
Figura 4.4 – Determinação da hierarquia segundo o Índice de Robustez da Rede – NRI.....	99
Figura 4.5 – Determinação da hierarquia segundo o Índice de Robustez da Rede – modificado – NRI-m.....	101
Figura 4.6 – Determinação da hierarquia segundo o Índice de Importância - II.....	103
Figura 4.7 – Determinação da hierarquia segundo o Índice de Custo Marginal sob Congestionamento – Método 2 – ICMC2.....	105
Figura 5.1 – Fluxograma integrado para a determinação das hierarquias para os indicadores selecionados.....	112
Figura 5.2 – Tela com parâmetros para a alocação base no TransCAD.....	113
Figura 5.3 – Rede carregada com matriz da hora de pico da manhã 2003, em UCP.....	114
Figura 5.4 – Representação gráfica do índice V/C.....	118

Figura 5.5 – Representação gráfica do índice CI.....	119
Figura 5.6 – Representação gráfica do índice ICMC2.....	121
Figura 5.7 – Links selecionados em destaque na rede de estudo.....	124
Figura 5.8 – Representação gráfica do índice NRI para os <i>links</i> selecionados.....	126
Figura 5.9 – Representação gráfica do índice II para os links selecionados	128
Figura 5.10 – Representação gráfica do índice NRI-m para os links selecionados....	131

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1 – Reação do usuário ao congestionamento.....	21
Quadro 3.1 – Classificação dos Indicadores NS e V/C.....	67
Quadro 3.2 – Classificação do Índice de Congestionamento – CI.....	68
Quadro 3.3 – Classificação do Índice de Robustez da Rede – NRI.....	69
Quadro 3.4 – Classificação do Índice de Robustez da Rede Modificado – NRI-m.....	70
Quadro 3.5 – Classificação do Índice de Viagens em Rede – NTR.....	72
Quadro 3.6 – Classificação do Índice de Importância – II.....	73
Quadro 3.7 – Classificação do Índice de Exposição – IE.....	74
Quadro 3.8 – Classificação do Índice de Vulnerabilidade com Base em Célula - IVBC.....	75
Quadro 3.9 – Classificação do Índice de Custo Marginal sob Congestionamento - ICMC.....	77
Quadro 3.10 – Classificação do Índice de Risco de Nicholson – IRN.....	78
Quadro 3.11 – Classificação do Índice de Vulnerabilidade de Erath.....	79
Quadro 3.12 – Comparação entre os indicadores analisados por atributo e aspecto considerado.....	80
Quadro 3.13 – Classificação dos indicadores quanto aos atributos principais.....	82
Quadro 4.1 – Descrição dos campos de interesse da tabela representativa da rede do PDTU 2005.....	85
Quadro 4.2 – Zonas de Tráfego na região do Estudo de Caso.....	87
Quadro 4.3 – Classificação dos indicadores quanto aos atributos principais – com destaque para os indicadores selecionados.....	94
Quadro 5.1 – Distribuição horária das viagens por modo.....	108
Quadro 5.2 – Fatores de equivalência de diversos tipos de veículos em unidades	

de carro de passeio [UCP].....	109
Quadro 5.3 – Composição do tráfego de veículos de viagens motorizadas e fatores de conversão para UCP – ano de 2003.....	110
Quadro 5.4 – Descrição da tabela resultante do processo de alocação do TransCAD.....	115
Quadro 5.5 – Indicadores V/C e CI para os 50 <i>links</i> mais congestionados segundo a relação V/C.....	117
Quadro 5.6 – Indicador ICMC2 para os 50 <i>links</i> de maior índice.....	120
Quadro 5.7 – <i>Links</i> selecionados para comparativo entre indicadores.....	123
Quadro 5.8 – Indicador NRI para os <i>links</i> selecionados.....	125
Quadro 5.9 – Indicador II para os <i>links</i> selecionados.....	128
Quadro 5.10 – Indicador NRI-m para os <i>links</i> selecionados.....	130
Quadro 5.11 – Classificação dos Indicadores quanto aos atributos principais – Indicadores do Estudo de Caso.....	132
Quadro 5.12 – Indicadores e posições hierárquicas correspondentes.....	133
Quadro 5.13 – Indicadores por código de cores ordenados por V/C.....	134
Quadro 5.14 – Indicadores por código de cores ordenados por NRI.....	135

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 2.1 – Demanda confrontada à capacidade viária.....	11
Gráfico 2.2 – Demanda e Preço. Curvas de volume para viagens.....	15
Gráfico 2.3 – Efeito do crescimento da renda e mobilidade.....	15
Gráfico 2.4 – Função típica de utilidade de horário.....	24
Gráfico 2.5 – Variação do tempo de viagem em função do fluxo de tráfego em um arco.....	26
Gráfico 2.6 – Variação do tempo de viagem em função do fluxo de tráfego e da variação da capacidade em um arco.....	27
Gráfico 2.7 – Média e variância do tempo de viagem em função do grau de saturação do tráfego (V/C).....	27
Gráfico 3.1 – Velocidade e tempo em link sob congestionamento (função BPR).....	40

1 INTRODUÇÃO

1.1 Relevância e Justificativa do Tema

Diversos problemas podem levar à ineficiência de uma rede viária de transportes urbanos. No caso do Brasil, essa ineficiência pode ser decorrente de sua própria dimensão e disparidades socioeconômicas, ou mesmo de restrições orçamentárias, entre outras dificuldades. Observa-se, com frequência, que os investimentos em infraestrutura viária têm sido insuficientes para a demanda, para a manutenção do nível de desempenho do sistema. De fato, as instituições que administram o trânsito o fazem como se a ampliação da infraestrutura viária, por si só, resolvesse o problema do congestionamento de tráfego. Na realidade o que ocorre é o estímulo ao uso do automóvel particular, grande vilão dos congestionamentos (PORTO JR., 2010). Há ainda o agravante de questões administrativas que prejudicam o acompanhamento e controle do processo de aplicação dos recursos orçamentários desde a elaboração do projeto, do edital de licitação e do controle de qualidade na execução das obras até a manutenção das vias durante sua vida útil. Não é, portanto, rara a ocorrência de deterioração precoce da infraestrutura.

Em consequência, nas regiões metropolitanas brasileiras, verificam-se ocorrências freqüentes de congestionamentos, principalmente durante as viagens pendulares. Essa situação vem se agravando, o que torna relevante o estudo de ferramentas para sua mitigação.

Em todo caso, mesmo em redes sem ocorrência de congestionamentos, diversos fatores podem comprometer seu desempenho. Qualquer via componente de uma rede de transporte está sujeita à interdição em um ou mais de seus segmentos, seja em decorrência de eventos naturais, seja pela ação do homem. Como exemplo, pode-se citar ocorrências aleatórias difíceis de serem previstas, como acidentes no trânsito, manifestações públicas, além de eventuais bloqueios para serviços de manutenção,

construção ou realização de comemorações especiais. Além disso, algumas cidades são mais vulneráveis às conseqüências de alterações periódicas de eventos naturais, como é o caso do Rio de Janeiro. Por suas características geográficas acidentadas, com baía, lagos, encostas de serras e morros, está sujeita a enchentes e deslizamentos de terra, principalmente no verão. Nessas ocasiões é comum que ramos de sua rede viária fiquem total ou parcialmente interrompidos.

SULLIVAN *et al.* (2010) chamam a atenção para o fato de que catástrofes naturais ou antropogênicas, embora possam ter grande impacto na fluidez do tráfego, são relativamente infreqüentes e, portanto, afeitas a estudos relativos a medidas de emergência sob diferentes cenários. Eventos de menor porte, ocorrendo no dia-a-dia, interrompem cotidianamente ligações na rede viária ou comprometem sua capacidade, podendo, ao longo do tempo ter profundo impacto no fluxo de tráfego, não devendo ter sua importância desprezada.

Segundo JENELIUS *et al.* (2006), o estudo da vulnerabilidade de sistemas em rede vem ganhando maiores proporções recentemente, em decorrência da crescente interconexão da economia (globalização) e se torna mais evidente que interações e interdependências entre sistemas podem ser representadas e tratadas pela teoria dos grafos. A confiabilidade do sistema de transportes, a regularidade, segurança, custo e tempo de viagem, seriam seus aspectos mais valorizados (SIKA, 2000 apud JENELIUS *et al.*, 2006).

Diversos trabalhos recentes vêm buscando indicadores que permitam avaliar o desempenho de redes viárias e sua vulnerabilidade a eventos que venham a interromper uma ou mais ligações. Ainda que os principais indicadores propostos estejam intimamente ligados com o conceito de acessibilidade, diferentes abordagens têm sido propostas, com alguns autores buscando avaliar o desempenho de ligações (*links*) na rede como um todo (JENELIUS *et al.*, 2006; SCOTT *et al.*, 2006; SAFIROVA

et al., 2007; ZHANG e LOMAX, 2007; UKKUSURI e YUSHIMITO, 2009; SULLIVAN *et al.*, 2010), enquanto outros preferem subdividir a rede em regiões ou zonas e avaliar a importância de cada ligação contextualizada na acessibilidade da zona na qual se insere (CHANG e NOJIMA, 2001; SOHN, 2006; SOHN, 2010).

A hierarquização dos ramos de uma rede a partir de indicadores permitiria a identificação dos *links* críticos para o desempenho do sistema viário. É importante salientar que o investimento em novas vias alternativas àquelas identificadas como críticas nem sempre resolveria ou mitigaria o problema de desempenho, podendo mesmo agravá-lo, atraindo um fluxo maior de veículos de passeio e congestionando o novo segmento criado. A adoção de políticas alternativas, como a implantação de vias exclusivas para ônibus ou de transportes de massa seria mais aconselhável, uma vez que esses sistemas são mais eficientes quanto à capacidade de transporte de passageiros por veículo e quanto à área de ocupação viária. Em consequência, a intensidade e frequência de congestionamentos seriam reduzidas.

A melhoria da mobilidade urbana envolve uma série de atividades como por exemplo, planejar, projetar, monitorar. Assim, para que investimentos sejam bem aplicados é fundamental o conhecimento das condições de infraestrutura e desempenho do tráfego, os quais podem ser interpretados a partir de uma hierarquização de *links* (ou ramos) críticos da rede viária, ou seja, aqueles que mais impactam seu desempenho.

Assim, problemas recorrentes de uma rede viária podem ser tratados com apoio de indicadores específicos, tais como:

- Identificação de ligações críticas que mereçam esquemas alternativos de tráfego para lidar com eventuais incidentes;
- Identificação de problemas localizados de fluidez de tráfego que mereçam um tratamento específico para aumento de capacidade viária ou incentivo para adoção de modos de transporte de maior capacidade;

- Hierarquização de investimentos em uma rede viária priorizando as ligações mais relevantes para o desempenho.

A presente Dissertação analisa os principais indicadores de desempenho encontrados na literatura, notadamente aqueles relacionados à fluidez do tráfego rodoviário, comentando a sua aplicabilidade na realidade do trânsito local. Sendo o transporte individual o principal componente dos congestionamentos, este será o foco do estudo de caso apresentado.

1.2 Objetivos

O objetivo da presente dissertação é investigar os indicadores existentes para a hierarquização de *links* (ligações, ramos) de uma rede viária urbana, sob a ótica do transporte individual e do desempenho, notadamente quanto à fluidez do tráfego. Mais especificamente, a dissertação visa o seguinte:

- Identificar e comparar os indicadores adotados em procedimentos de hierarquização de trechos ou segmentos de rede rodoviária, sugeridos pela literatura especializada, com foco na fluidez do tráfego e no desempenho da rede viária;
- Delimitar um segmento da malha viária da cidade do Rio de Janeiro para Estudo de Caso com o propósito de exemplificar e avaliar os resultados da hierarquização;
- Sugerir a aplicação dos indicadores analisados.

1.3 Estrutura do Trabalho

A presente dissertação é apresentada em seis capítulos. Este primeiro capítulo apresenta os problemas de ineficiência de uma rede viária de transporte urbana, notadamente quanto à fluidez do tráfego, e os objetivos da presente pesquisa.

O capítulo 2: “Revisão Bibliográfica” define desempenho de uma rede de transporte e discute conceitos como, por exemplo: acessibilidade, vulnerabilidade, risco, confiabilidade, congestionamento e capacidade viária, entre outros aspectos. Esse capítulo forma o arcabouço conceitual para o desenvolvimento do estudo.

O capítulo 3: “Indicadores – Análise e Classificação” descreve os indicadores encontrados na revisão bibliográfica e que são relacionados à fluidez do tráfego. São fixados critérios e aspectos que embasam uma classificação e análise comparativa dos indicadores identificados.

O capítulo 4: “Preparação Para o Estudo de Caso” situa o Estudo de Caso, apresentando a rede para o estudo e o software de modelagem de transporte utilizado. Nesse capítulo são ainda selecionados os indicadores utilizados no Estudo de Caso e apresentada a metodologia para sua determinação, em função dos recursos disponíveis.

O capítulo 5: “Estudo de Caso” apresenta o desenvolvimento do estudo de caso, a aplicação da metodologia de determinação dos indicadores selecionados e os resultados obtidos. Em sequência é apresentada uma análise dos resultados obtidos, apoiada na comparação entre os indicadores utilizados no estudo.

O capítulo 6: “Conclusões e Recomendações” apresenta um resumo do trabalho realizado, conclusões obtidas e recomendações de estudos complementares que permitiriam suprir eventuais lacunas deixadas na presente pesquisa, ampliar sua abrangência e aprofundar os temas discutidos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Considerações Iniciais

Na revisão bibliográfica sobre indicadores de desempenho de redes urbanas, são apresentados a conceituação de Rede Viária Urbana e princípios básicos de sua modelagem necessários para a determinação e aplicação dos indicadores identificados na literatura.

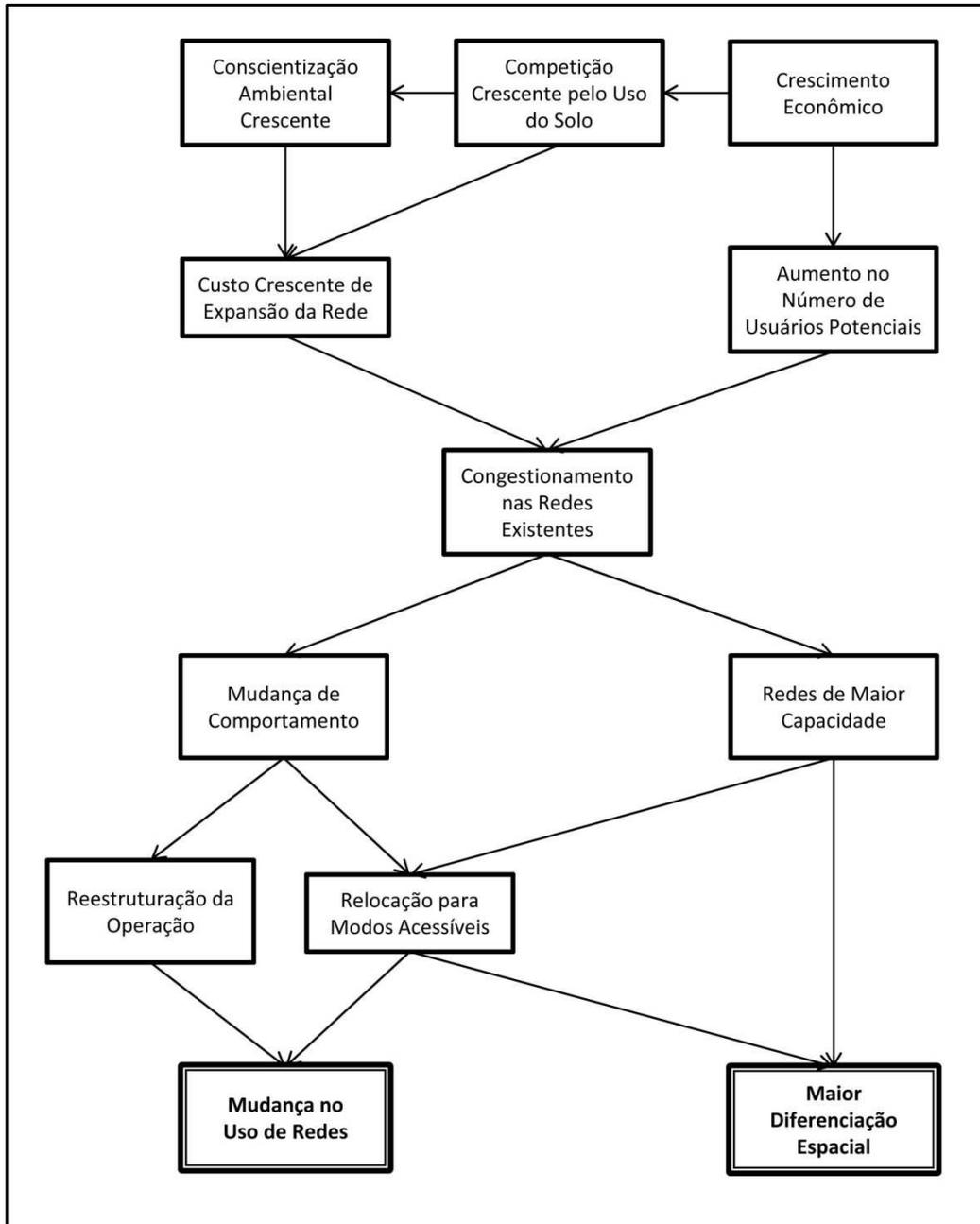
Tendo em vista a multiplicidade de indicadores de desempenho encontrados, são definidas suas principais características e vertentes, bem como os critérios de classificação existentes e seus parâmetros, com o objetivo de montar um arcabouço teórico para o desenvolvimento do estudo.

Assim, é discutida uma série de conceitos como, por exemplo: vulnerabilidade, risco, confiabilidade, congestionamento capacidade viária, entre outros aspectos de interesse do estudo.

O desenvolvimento econômico provoca aumento nas atividades socioeconômicas e culturais, o que implica necessariamente a um correspondente aumento na intensidade dos deslocamentos urbanos. Com isso, observam-se também aumentos no valor e na densidade de uso do solo. Esse fato repercute no crescimento da densidade e da área de ocupação urbana e, conseqüentemente, no aumento dos congestionamentos do tráfego, induzindo o aumento dos custos de transporte e a ampliação da rede viária.

FEITELSON e SALOMON (2000) ilustram, no fluxograma da figura 2.1, o encadeamento dessas conseqüências no desenvolvimento da mobilidade urbana. O aumento da capacidade viária tem custo progressivamente maior, principalmente em áreas densamente ocupadas. A demanda por investimentos exige uma definição de critérios para a seleção dos trechos viários a serem priorizados por seu maior

potencial em facilitar a mobilidade urbana e de apresentar maior retorno econômico durante sua vida útil.



Fonte: FEITELSON e SALOMON (2000)

Figura 2.1: A implicação das tendências atuais nas redes de transporte

Pode ser observado, pelo exposto nos itens apresentados a seguir, que os conceitos de vulnerabilidade, confiabilidade e risco estão intimamente relacionados. Assim, a

fronteira entre uma e outra dimensão de análise não se encontra bem definida na literatura, com os conceitos variando de autor a autor de tal forma que há uma superposição de definições. Assim, uma rede confiável seria pouco vulnerável, e conseqüentemente, apresentaria um risco reduzido.

2.2 Desempenho de Rede

Segundo o dicionário Aurélio (FERREIRA, A. B. H., 1987), desempenhar seria “exercer, executar; *desempenhar uma função, um cargo*” ou “representar, interpretar: *desempenhar um papel*” ou ainda “cumprir, executar: *desempenhou-se bem da melindrosa tarefa*”. Desempenho seria “ato ou efeito de desempenhar(-se)” ou “execução de um trabalho, atividade, empreendimento, etc. que exige competência e/ou eficiência”. Ao transportar o conceito para uma rede de transportes, vários parâmetros podem ser considerados para avaliar o desempenho de uma rede, de acordo com a interpretação adotada para sua principal função. Algumas das principais funções da rede seriam:

- a) Oferecer nível de serviço adequado, principalmente no que se refere à fluidez do tráfego, com vias des congestionadas;
- b) Proporcionar confiabilidade em tempo e custo de viagem;
- c) Minimizar vulnerabilidade, ou seja, ser resiliente a eventos que possam afetar um ou mais de seus ramos;
- d) Ser flexível, oferecendo rotas alternativas entre pares de origem e destino;
- e) Proporcionar acessibilidade igualitária no que diz respeito a tempo e custo entre todas as zonas de uma região;

Dentre as funções citadas, o presente estudo se restringe àquelas ligadas à fluidez do tráfego, não sendo analisados indicadores de desempenho estritamente ligados à acessibilidade.

O HCM (2000), principal referência no que tange a estudos de tráfego no Brasil, apresenta várias medidas de desempenho para rodovias, dentre elas a velocidade de fluxo, a densidade do fluxo e o atraso ou *delay*. A densidade do fluxo de tráfego é definida como o número de veículos ocupando uma extensão de via ou faixa de tráfego em determinado instante e o atraso tratado no HCM é aquele que se refere ao tempo perdido 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 (*LOS* ou *NS*) que classifica a via ou conjunto de vias rodoviárias em seis níveis, de A a F, cada qual com seu fluxo de serviço, à exceção do nível F (congestionado), para o qual, devido à sua instabilidade, é difícil estimar uma taxa de fluxo.

Buscou-se identificar outros indicadores de desempenho na literatura, classificando-os quanto aos atributos de desempenho considerados e realizando uma análise comparativa apoiada em estudo de caso. Os principais atributos considerados são apresentados nos itens subseqüentes.

2.3 Congestionamento

O congestionamento é parte da rotina diária, principalmente em ambientes urbanos. Sua principal causa é o efeito decorrente de insuficiência de capacidade de escoamento de tráfego em trechos da rede viária existente, mas também pode ser decorrente de obras viárias, acidentes e outras obstruções. Essa insuficiência pode ser recorrente, reproduzida nos horários de pico de viagens pendulares, quando são normalmente limitados em tempo. Pode ainda ser dependente do clima e da sazonalidade, podendo ocorrer em fins-de-semana e em feriados (CERWENKA e

MEYER-RUHLE, 2009). A capacidade pode também ser afetada aleatoriamente, em decorrência de obras viárias, acidentes e outras obstruções.

Em termos simples, congestionamento de tráfego surge quando há mais pessoas (ou veículos) tentando usar um determinado recurso de transporte, em um período específico de tempo, do que o dado recurso pode lidar em níveis considerados aceitáveis de atraso ou conveniência (MEYER, 1997); ou seja, a demanda por transporte supera a capacidade de transportar, considerando-se determinado nível de conveniência ou serviço. STOPHER (2004), em termos mais simples, propõe que o congestionamento surge quando o volume de entrada (demanda) supera a capacidade de saída (capacidade da via).

Segundo ORTÚZAR e WILLUMSEN (2001, apud CASAS, 2003) o congestionamento ocorre quando os níveis de demanda se aproximam da capacidade determinada de tal forma que o tempo para percorrê-la aumenta consideravelmente quando comparado à média observada em condições de baixa demanda. ZHANG e LOMAX (2007) descrevem o fenômeno como decorrente de uma densidade crescente do tráfego até uma densidade máxima onde os veículos estão 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 e suas características. Associa ainda o congestionamento à relação Volume de Tráfego (V) sobre a Capacidade (C), como se segue:

- 1) *Via Saturada* quando estiver próxima de atingir a unidade: $(V/C) \sim 1$;
- 2) *Via Supersaturada* quando ultrapassar a unidade : $(V/C) > 1$.

O estudo realizado pelo IPEA e a ANTP (1998) classifica o congestionamento em três níveis, quais sejam:

- 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* : $(V/C) \geq 1$.

Pode-se classificar o congestionamento em recorrente ou não-recorrente, ou seja, há congestionamentos rotineiros, normalmente nos horários de pico das grandes cidades, e que se repetem no dia-a-dia. O Gráfico 2.1 mostra a evolução da demanda ao longo de um dia útil e uma linha representativa da capacidade da via. Como a demanda excede a capacidade em alguns horários, haverá congestionamento recorrente, a cada dia útil, durante parte do dia.

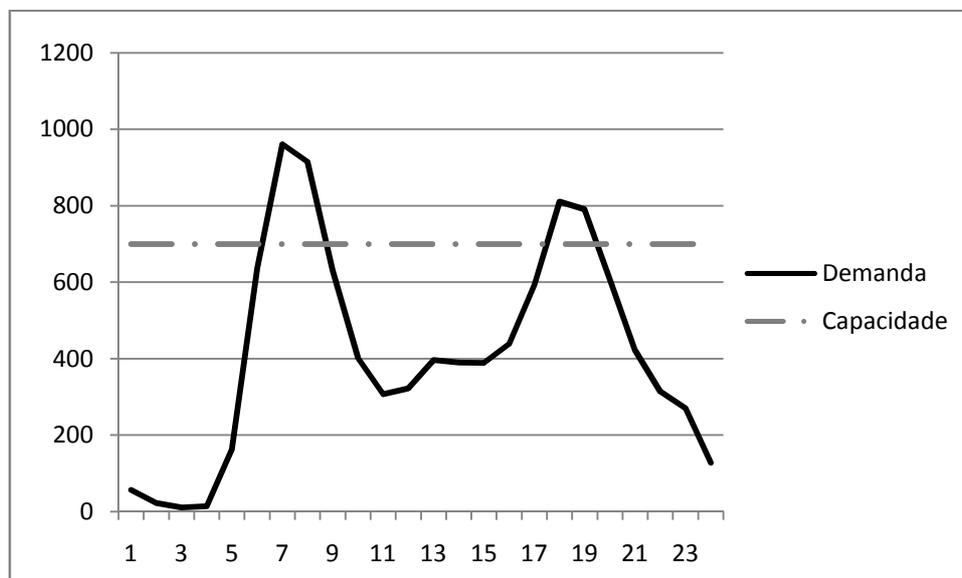


Gráfico 2.1: Demanda confrontada à capacidade viária – exemplo típico.

Há no entanto congestionamentos não-recorrentes, provocados por eventos aleatórios tais como acidentes, eventos climáticos naturais e obras viárias (BREMNER *et al.*, 2004). SCHRANK e LOMAX (2002, *apud* TAYLOR, 2008) sugerem que 55% dos custos de congestionamento nos EUA podem ser atribuídos a quebra de veículos e acidentes de tráfego; A UK HIGHWAYS AGENCY (2002) sugere que incidentes de tráfego respondem por 25% do congestionamento em vias troncais britânicas; CHARLES (2005) estima que 50% do congestionamento em grandes cidades da

Austrália podem ser atribuídos a incidentes de tráfego tais como os citados anteriormente. TAYLOR (2008) conclui que considerável parcela do tempo perdido e custos decorrentes de congestionamentos urbanos se devem a incidentes tais como quebra de veículos, acidentes, obras em vias, bloqueios de faixa entre outros. A natureza aleatória dos incidentes quer por questões espaciais ou temporais tende a acentuar o impacto operacional do congestionamento em prejuízo das atividades econômicas e sociais aumentando a incerteza do tempo de viagem. Portanto, a prevenção de efeitos de congestionamento deve levar em conta não apenas os congestionamentos rotineiros, mas também o efeito de eventuais incidentes que possam bloquear total ou parcialmente as vias, com a conseqüente redução da capacidade.

Tanto o congestionamento recorrente como o não recorrente surge em trechos em que há um estrangulamento (*bottleneck*), ou redução da capacidade. No caso de congestionamento recorrente, o estrangulamento é normalmente provocado por falha do projeto viário, e a viabilidade de sua correção, pela adaptação do projeto viário, deve ser investigada (STOPHER, 2004). No caso do não recorrente, a redução de capacidade pode se dar como conseqüência de um evento provocado por fatores endógenos, como um acidente de trânsito ou por fatores exógenos, como um desastre natural.

2.3.1 Efeito do congestionamento

Como efeito direto do congestionamento tem-se um aumento no tempo de viagem decorrente da redução da velocidade média além de uma menor confiabilidade neste tempo dada a instabilidade do regime de tráfego. Há ainda um aumento no custo operacional veicular, também decorrente da redução da velocidade. Além dos aumentos nos custos de tempo de viagem e de operação veicular, tem sido estudado o aumento nas emissões de poluentes devido aos congestionamentos e o custo ambiental daí derivado (IPEA/ANTP, 1998; SALOMON e MOKHTARIAN, 1997;

STOPHER, 2004), o que contribui para a relevância de medidas visando à mitigação de congestionamentos. Ainda que eventualmente poucas ligações em uma rede sofram o efeito de congestionamento, as conseqüências podem ser substanciais, dado o significativo aumento no tempo de viagem e custo associado (ERATH *et al.*, 2010). A importância crescente dos custos ambientais tem levado a esforços de internalização dos custos ambientais na Europa, com a quantificação dos efeitos do tráfego sobre o clima (COMMISSION OF THE EUROPEAN COMMUNITIES, 2008). O congestionamento de tráfego produz mais poluição atmosférica, mais ruído, além de consumir mais energia do que o tráfego não congestionado (SALOMON e MOKHTARIAN, 1997), o que contribui para a crescente preocupação com medidas mitigadoras. SAFIROVA *et al.* (2006) chama atenção para o fato de que os custos de congestionamento são geralmente calculados em nível de *link* (ou ligação) desprezando as externalidades e o impacto na rede de transportes. Os custos marginais podem capturar a magnitude das externalidades, merecendo análise para um projeto de política de transportes (NEWBERRY, 1990 *apud* SAFIROVA *et al.*, 2006).

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 em declínio 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. Chama a atenção ainda para o fato de que os congestionamentos tendem a se concentrar nas *freeways* e que os congestionamentos em *freeways* não são a medida mais adequada para se medir o impacto na população. ZHANG e LOMAX (2007) chamam a atenção para diferenças entre o congestionamento restrito ao centro da cidade e aquele entre áreas de atividade mais distantes entre si ou entre zonas residenciais e o centro da cidade. O congestionamento restrito ao centro

abrangeria uma área relativamente pequena, impondo pequena penalidade de tempo ao usuário, e de fácil solução através de meios de transporte alternativos. O congestionamento entre áreas mais distantes imporia um tempo de viagem maior e uma menor confiabilidade, portanto penalizando mais o usuário.

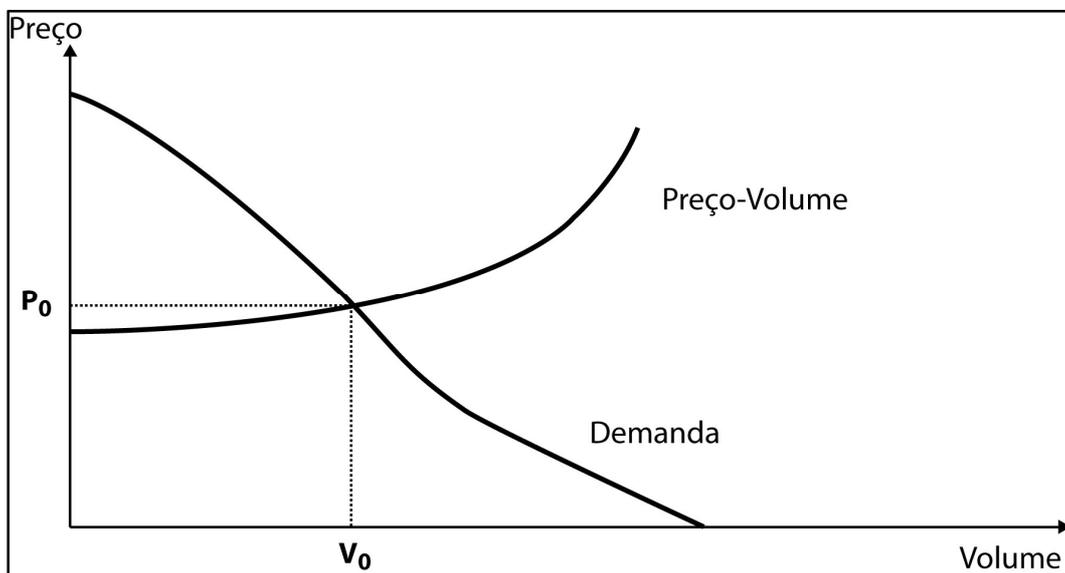
SALOMON e MOKHTARIAN (1997) vêem o congestionamento como o resultado da dependência crescente do automóvel pelo usuário urbano sem preocupação com as externalidades decorrentes. DEPUY (1999) discute o tema da dependência, e relaciona alguns dos principais fatores explicativos:

- a) O efeito “clube” – o proprietário de automóvel passa a pertencer a um “clube” fictício, que lhe permite uma maior autonomia, através do uso do transporte individual.
- b) O efeito da frota – quanto maior a frota de automóveis, maior a oferta de serviços de manutenção, aumentando a segurança do usuário de automóvel.
- c) O efeito da rede de transporte – embora sujeito a congestionamentos, o proprietário de automóvel tende a ter maior acessibilidade em função de sua autonomia de escolha entre todas as possibilidades de rota disponível pela oferta de rotas alternativas na ampla rede rodoviária, o que resulta em benefício relativo aos não proprietários.
- d) Combinação dos efeitos – resulta em uma maior acessibilidade em relação aos modos concorrentes, com maior autonomia e flexibilidade, além de segurança pelo acesso a serviços de manutenção.

A possibilidade de integração entre os diversos modos poderia reduzir a dependência do automóvel, que seria utilizado de forma mais racional.

Admitindo-se que a decisão de realizar uma viagem derive da necessidade de se deslocar para um destino particular (ETTEMA *et al.*, 1993, apud CASAS, 2003) para a realização de uma atividade (STOPHER e MEYBURG, 1976, *apud* STOPHER, 2004), dada uma viagem na qual se observe congestionamento, as reações a este evento

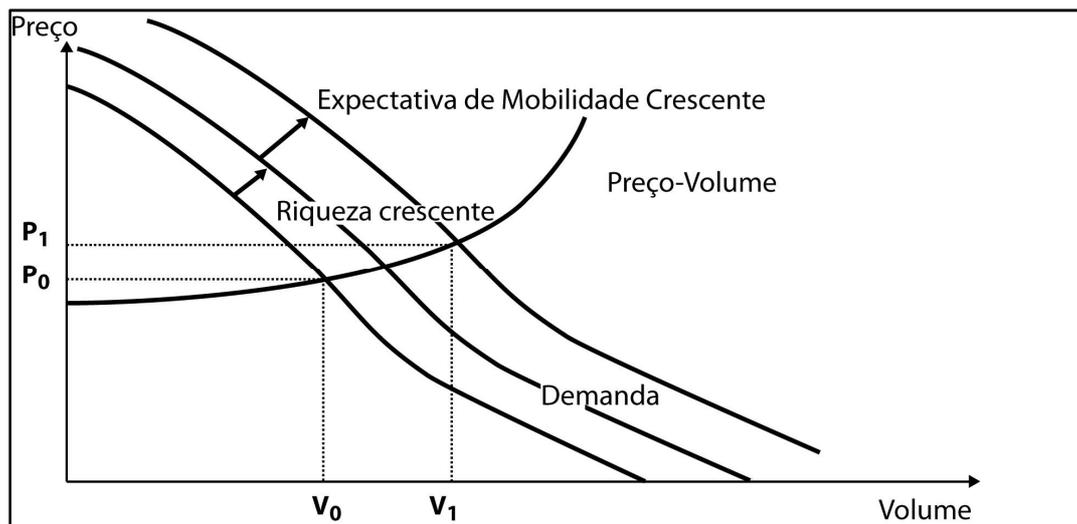
seriam afetadas pela existência ou não de alternativas de acesso. Isso implica em que a acessibilidade tenha um efeito na reação de cada indivíduo ao congestionamento (CASAS, 2003). STOPHER (2004), parte da teoria econômica para buscar uma possível origem para os congestionamentos. O gráfico 2.2 apresenta uma curva da demanda com o volume de viagens crescendo com a redução do preço – entendendo-se aqui preço como o custo generalizado da viagem – e uma curva preço-volume que demonstra a evolução do custo da viagem na medida em que aumenta o número de usuários do sistema. O ponto de interseção V_0, P_0 representaria o equilíbrio, e definiria o volume de viagens e o preço a ser experimentado.



Fonte: STOPHER (2004)

Gráfico 2.2: Demanda e Preço. Curvas de volume para viagens.

Admitindo-se que há uma busca constante pelo desenvolvimento econômico, ainda segundo STOPHER (2004), haveria uma tendência para aumento progressivo da renda *per capita*, e, como consequência, seria esperado um aumento da mobilidade e acessibilidade. Assim, haveria uma tendência para deslocamento da curva da demanda para cima e para a direita, como pode ser visto no gráfico 2.3 apresentado a seguir.



Fonte: STOPHER (2004)

Gráfico 2.3: Efeito do crescimento da renda e mobilidade.

Pode ser observado que o volume cresce de V_0 para V_1 e o preço (custo da viagem) cresce de P_0 para P_1 . Ou seja, há um volume crescente de viagens, ainda que o custo seja mais elevado, face ao aumento de renda. Consequentemente, haverá uma maior tendência ao congestionamento, dependendo do sistema viário subjacente.

2.3.2 Congestionamento – síntese

Sintetizando, pode-se classificar o congestionamento, pelas seguintes aspectos: frequência, localização e intensidade.

Quanto à frequência, o congestionamento pode ser recorrente, quando ocorre cotidianamente, principalmente nos horários de pico, ou não recorrente, quando ocorre aleatoriamente, geralmente devido a acidentes. Quanto aos recorrentes, estudos recentes indicam que são responsáveis por 45 a 75% dos custos de congestionamento, enquanto que os não recorrentes respondem por 25 a 55% dos mesmos custos (SCHRANK e LOMAX, 2002, *apud* TAYLOR, 2008; UK HIGHWAYS AGENCY, 2002; CHARLES, 2005)

Quanto à localização, os congestionamentos podem ser centrais ou periféricos. Os centrais são normalmente mais previsíveis e de solução mais simples, normalmente

ligada à substituição do transporte individual pelo coletivo. Os periféricos abrangem uma área maior e tendem a ser menos previsíveis, tornando o tempo de viagem mais instável, comprometendo portanto a confiabilidade (ZHANG e LOMAX, 2007).

Quanto à intensidade, os congestionamentos costumam ser referidos à relação entre volume e capacidade (V/C). Quanto maior o V/C, mais intenso o congestionamento.

Combinando-se as três classificações, os congestionamentos mais críticos seriam os recorrentes, fora da área central e com uma relação V/C máxima. Pelo outro lado, os menos críticos seriam aqueles não recorrentes, na área central e com uma relação V/C mais baixa, conforme ilustrado na figura 2.2

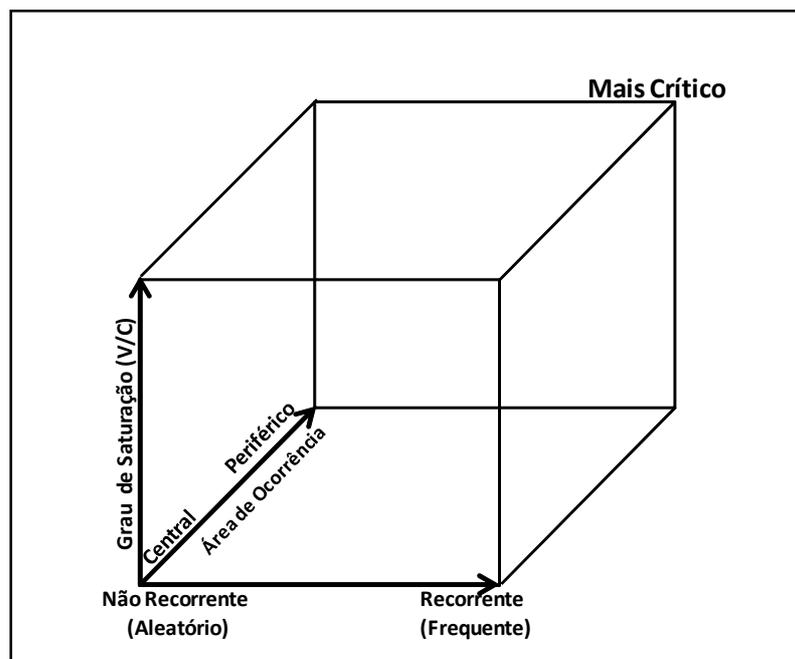


Figura 2.2: Classificação do Congestionamento

O congestionamento interfere com o padrão e qualidade de vida dos usuários do sistema de transportes. O congestionamento não recorrente provoca reações localizadas, no tempo e no espaço, de stress e desconforto além de prejuízos decorrentes do aumento do tempo de viagem. No caso do congestionamento recorrente, a reação do usuário pode ser dividida em dois grandes grupos: a aceitação, ou adaptação às novas condições e a mudança de hábitos na tentativa de

recuperar o padrão de conforto perdido. O quadro 2.1 sumariza as reações dos usuários em face ao congestionamento recorrente.

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

2.4 Confiabilidade

Um dos atributos valorizados pelo usuário de uma rede de transporte é a confiabilidade do desempenho desta rede. Segundo FERREIRA (1987), confiabilidade seria a qualidade relativa à confiança, como a segurança que se pode ter na reprodutibilidade de determinado procedimento, já BELL (2000) define uma rede confiável como aquela cujos custos de viagem são aceitáveis mesmo quando os usuários são pessimistas quanto ao seu estado. Em estudos de transportes, o conceito de confiabilidade envolve a confiança que se tem no funcionamento adequado do sistema de transportes, geralmente associado à previsibilidade do tempo de viagem. Segundo BATES *et al.* (2001), diversos estudos qualitativos e comportamentais relacionados a viagens concluíram que a pontualidade e a confiabilidade são atributos valorizados pelos usuários, afetando sua percepção e escolha de modo de transporte. Afirmam que em algumas situações, os usuários valorizam mais a redução na variabilidade do que a própria redução do tempo de viagem. No entanto, é reduzido o esforço em atribuir valor à essa variabilidade quando se compara às pesquisas relacionadas ao valor da redução do tempo médio de viagem. A confiabilidade pode se referir a outros fatores que não o tempo, como o

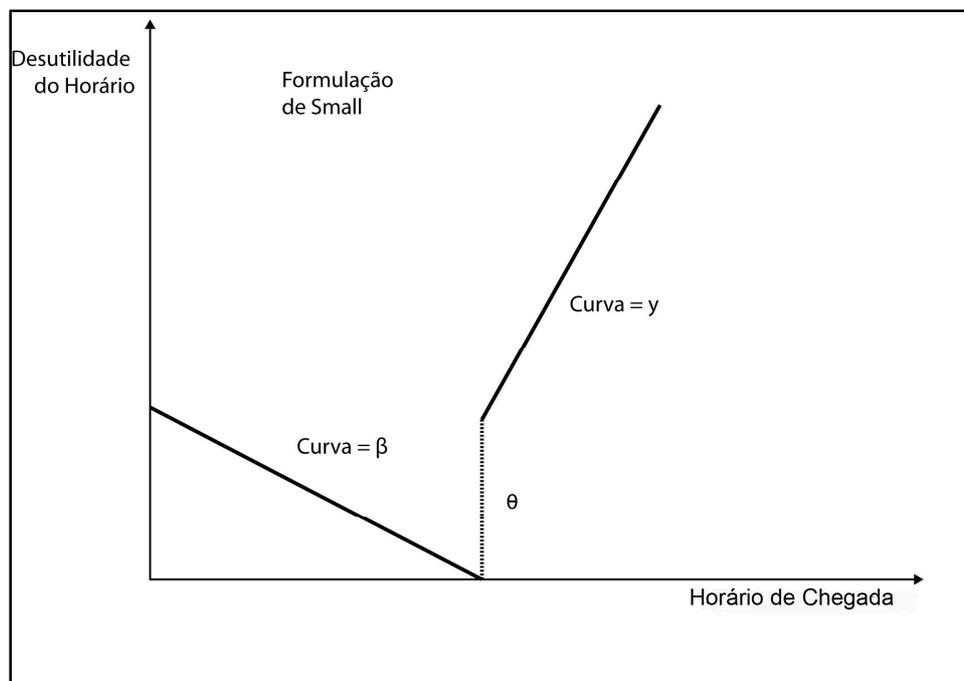
grau de conforto. Um exemplo seria a probabilidade de viajar sentado. Vale salientar que o tempo é sem dúvida o fator mais importante, ou a confiança de que se atingirá o destino em determinada hora, com uma pequena variabilidade.

Uma viagem compreende diversas etapas, e seria possível considerar a confiabilidade relacionada a cada uma delas, como tempo de espera, tempo dentro de veículo, etc. Ainda segundo BATES *et al.* (2001), é comum a convergência dos conceitos de confiabilidade e de pontualidade por parte dos usuários do sistema de transporte, que tendem a considerar não confiáveis modos de transporte que consistentemente tenham um tempo de viagem acima do esperado – sendo portanto impontuais – mesmo quando a variabilidade do tempo tende a ser pequena. BATES apresenta duas possíveis explicações das causas de a confiabilidade ser importante para os usuários.

A primeira é a de que os usuários ao selecionar uma alternativa de viagem, ponderam sobre as conseqüências da não confiabilidade, tais como atrasos em compromissos, perda de eventuais conexões e mesmo a possibilidade de chegar cedo demais ao destino. A segunda é que a não confiabilidade, por si só, é indesejável independentemente de suas conseqüências, provocando uma situação de *stress* e desconforto. Assim, pode-se propor um modelo de escolha que acrescente aos componentes usuais de custos generalizados de transporte (tarifa, tempo, etc.) um componente relativo à confiabilidade que pode ser o desvio padrão (ou variância) da distribuição do tempo de viagem de cada alternativa ou ainda uma variável *dummy* que represente a pontualidade ou não do meio de transporte.

O gráfico 2.4 mostra a curva representativa da desutilidade resultante da não confiabilidade. Sendo o eixo das abscissas a representação do tempo de chegada ao destino, a curva β mostra a queda da desutilidade desde uma chegada muito cedo até uma chegada exatamente no horário, quando a desutilidade tem o valor nulo. A curva γ reflete a evolução da desutilidade decorrente da chegada após o horário

determinado. O gráfico sugere que a chegada após o horário tem uma desutilidade maior do que a chegada antecipada (NOLAND e SMALL, 1995, *apud* BATES, 2001).



Fonte: BATES (2001)

Gráfico 2.4: Função típica de utilidade de horário.

A possibilidade de ocorrência de congestionamentos concorre para reduzir a confiabilidade em uma rede de transportes, uma vez que os tempos de viagens são de difícil previsão em ligações congestionadas. O estabelecimento do horário de início de viagem com base no horário desejado para chegada ao destino será portanto dificultado, o que poderá ser representado por uma função de utilidade.

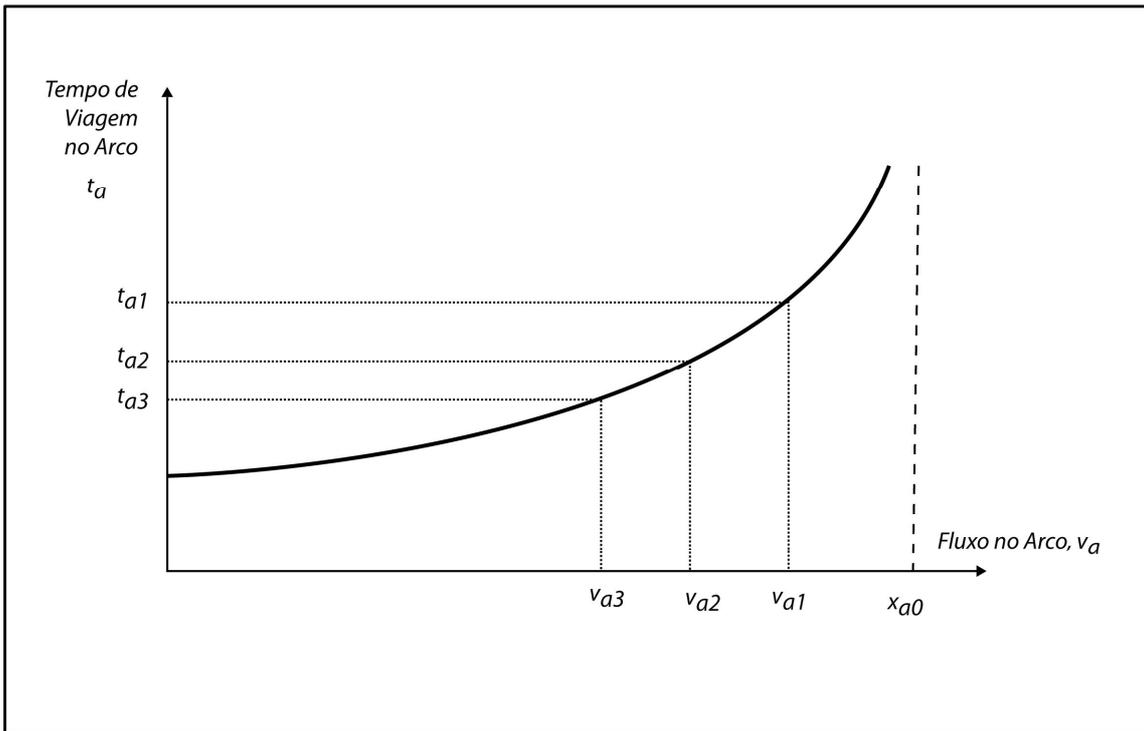
Além do ponto de vista direto do usuário, a confiabilidade de uma rede é ponto de importância no planejamento de redes de transportes. Áreas submetidas a catástrofes como terremotos, enchentes, ataques terroristas podem se beneficiar de uma rede confiável para que a linha de suprimentos se mantenha operativa e veículos de emergência possam circular. Além de ser desejável se projetar a infraestrutura de forma a que possa suportar eventos extraordinários, dentro do que for economicamente aceitável, é importante que a rede se mantenha operacional quando parte desta infraestrutura falhe (BELL, 2000). A rede de transporte deve ainda

acomodar os eventos rotineiros, além dos desastres naturais, mantendo um nível de serviço adequado a despeito da deterioração da infraestrutura (CHEN *et al.*, 2002). O conceito de confiabilidade, neste caso, estaria diretamente relacionado ao de vulnerabilidade.

CHEN *et al.* (2002) salienta a importância da confiabilidade quando afirma que a estabilidade de uma rede de transporte reflete a qualidade do serviço que ela oferece a seus usuários.

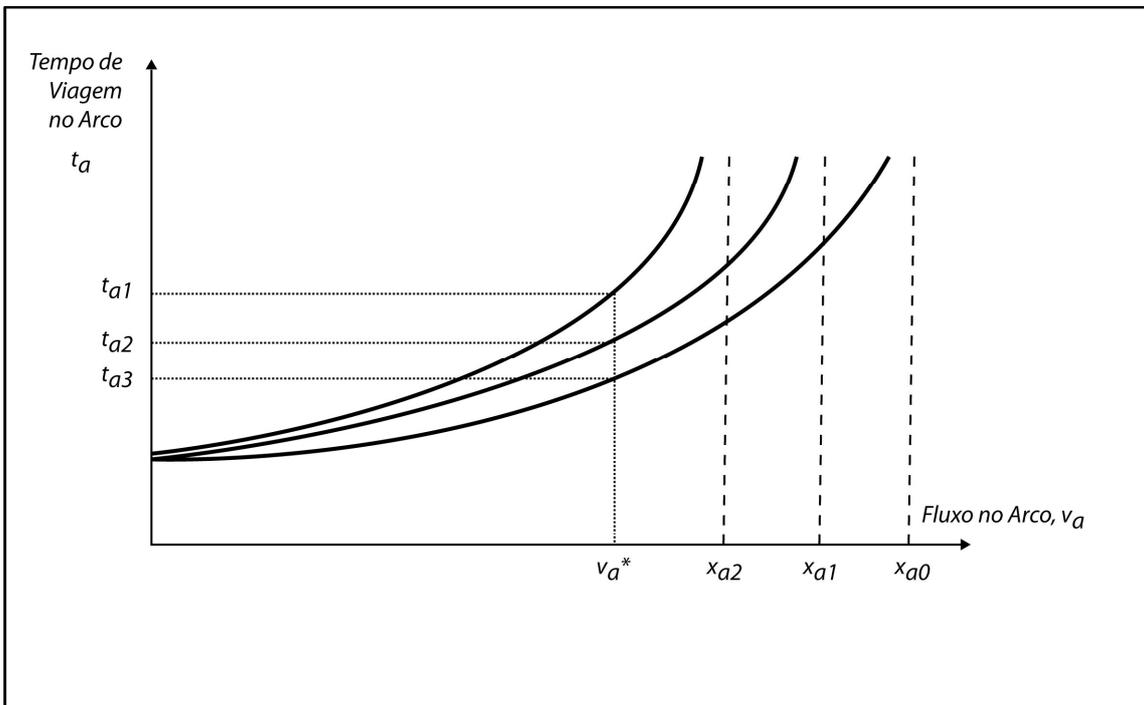
2.4.1 Fontes da não-confiabilidade

NICHOLSON e DU (1997) sugerem que a não-confiabilidade provém de duas fontes: variações no fluxo e variações na capacidade. Tal como outros autores já citados, consideram a inconstância do tempo como principal fator de não-confiabilidade, e os dois gráficos (2.5 e 2.6), apresentam o tempo de viagem em um arco (ou *link*) como função do fluxo de tráfego nesse *link* e respectiva capacidade. No gráfico 2.5, um arco tem capacidade x_{a0} , um fluxo v_{ai} e um tempo de viagem t_{ai} . O tempo varia em torno de t_{a2} entre os limites t_{a3} a t_{a1} correspondentes ao fluxo que varia entre v_{a3} e v_{a1} . O gráfico 2.6, apresentado em seguida, mostra diferentes curvas de variação do tempo de viagem, para diferentes capacidades. O tempo novamente varia em torno t_{a2} entre t_{a3} a t_{a1} , de acordo com a capacidade que varia em torno de x_{a1} entre os valores limites de x_{a2} e x_{a0} mantendo-se o fluxo constante em v_a^* . O foco da pesquisa em confiabilidade tem sido em reduzir a variabilidade da capacidade, já que a variabilidade do fluxo de tráfego depende de demandas individuais de difícil administração (NICHOLSON, 2003).



Fonte: NICHOLSON (2003)

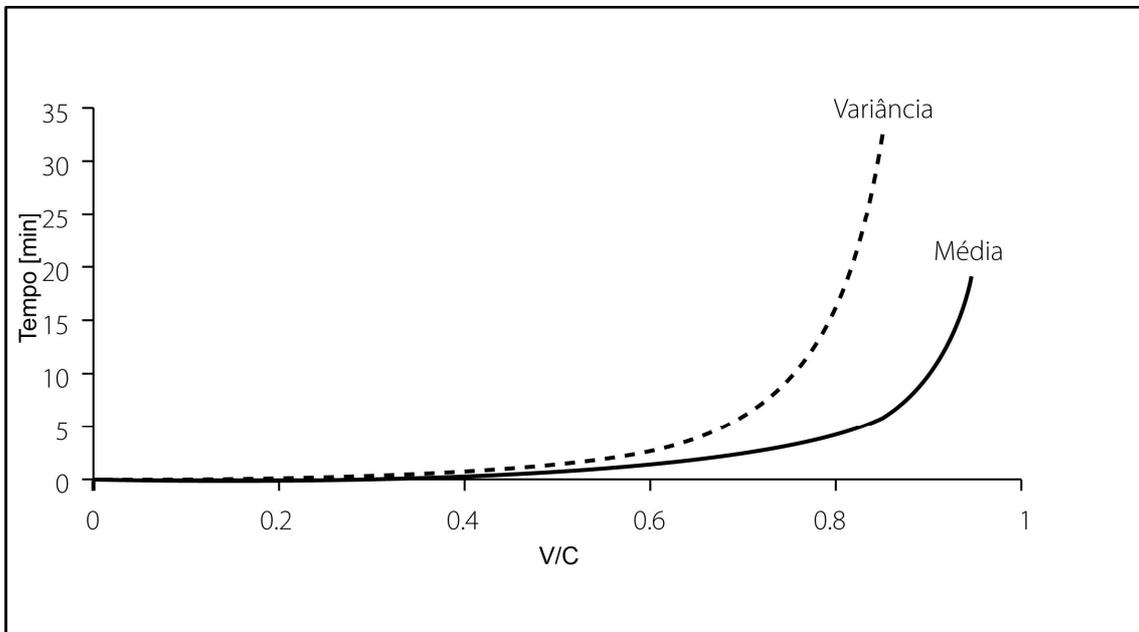
Gráfico 2.5: Variação do tempo de viagem em função do fluxo (volume) de tráfego em um arco.



Fonte: NICHOLSON (2003)

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

NICHOLSON (2003) apresenta ainda um gráfico com o tempo médio de viagem e a variância do tempo como função da intensidade do tráfego ou relação tráfego sobre a capacidade (V/C).



Fonte: NICHOLSON (2003)

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

O gráfico 2.7 mostra que o tempo médio de viagem cresce de forma mais acentuada quando a intensidade do tráfego excede a 80%, e que a variância, por sua vez, tem crescimento mais intenso a partir de 60%. De acordo com NICHOLSON (2003) é por esse motivo que se costuma estimar a capacidade de um sistema como 80% de sua capacidade teórica. Se fosse desejado garantir a confiabilidade do sistema, a capacidade considerada deveria ser então 60% da teórica. No entanto, seria difícil manter essa capacidade reserva de 40% de forma a garantir a confiabilidade do sistema, já que os baixos tempos de viagem estimulariam o aumento do fluxo, tornando o investimento possivelmente inócuo (FERNALD, 1999; STOPHER, 2004; NICHOLSON, 2003).

2.4.2 Impacto do desempenho de uma ligação sobre a confiabilidade da rede

Segundo BELL (2000), CHEN *et al.* (2002), BERDICA (2002) a confiabilidade da rede tem pelo menos duas dimensões. A primeira está relacionada à conectividade da rede, e considera suficiente a garantia da existência de uma rota entre cada par de origem e destino para a rede ser considerada confiável. Seria a confiabilidade na conectividade. Essa dimensão tem característica binária: considera os arcos que compõem a rede como interrompidos ou em plena capacidade, não levando em consideração possíveis reduções de capacidade. Essa abordagem pode ser adequada para situações extremas como desastres naturais, mais pode não ser recomendável na rotina diária, onde é mais freqüente o desempenho insatisfatório de alguns segmentos viários do que sua total interdição.

A segunda admite que a falha em um ou mais ligações pode provocar um nível de serviço inaceitável, com tempos de viagem muito elevados ou muito variáveis, tornando difícil para o usuário atingir seu destino no tempo programado. Esta segunda dimensão pode ser referida como confiabilidade de desempenho. CHEN *et al.* (2002) e BERDICA (2002) definem a confiabilidade de tempo de viagem como sendo a probabilidade que uma viagem entre determinado par de origem e destino se dê em um tempo determinado.

CHEN *et al.* (2002) e BERDICA (2002), definem ainda uma terceira dimensão que referida como a confiabilidade de capacidade que seria a probabilidade de que a capacidade máxima de uma rede seja maior ou igual a determinado nível de demanda quando a capacidade dos seus *links* é submetida a variações aleatórias.

O impacto da falha em uma ligação, seja sua interdição total ou parcial, seja um nível de serviço inadequado, como por exemplo um congestionamento, vai depender de uma série de fatores tais como:

- Rotas alternativas aceitáveis;

- Capacidade ociosa nas rotas alternativas;
- Informação adequada tanto quanto à extensão do problema na infraestrutura viária quanto às alternativas existentes.

BATES (2001), ASAKURA e KISHAWADANI (1991, *apud* CHEN *et al.*, 2002), propõem um coeficiente de variação do tempo de viagem como indicador para a confiabilidade no que diz respeito ao desempenho de uma rede de transporte em sua rotina diária.

2.4.3 Efeitos da não confiabilidade sobre o usuário

Sendo a confiabilidade da rede um fator influente para decisões tomadas pelos usuários do sistema de transporte, a não confiabilidade pode interferir no comportamento em qualquer das quatro etapas clássicas de transporte (NICHOLSON, 2003):

- A viagem pode ser cancelada – interferência na geração de viagens;
- A viagem pode ser adiada – interferência na distribuição temporal de viagens;
- O destino pode ser alterado – interferência na distribuição espacial de viagens;
- O modo de transporte pode ser alterado – interferência na repartição modal;
- A rota da viagem pode ser alterada – interferência na alocação de viagens.

2.5 Vulnerabilidade e Risco

BERDICA (2002) define a vulnerabilidade de uma rede rodoviária como a suscetibilidade a incidentes que podem reduzir consideravelmente a capacidade de oferecer serviço dessa rede. Define a capacidade de oferecer serviço (*serviceability*) como a possibilidade de usar um determinado *link*, rota ou rede rodoviária em um determinado período de tempo. JENELIUS *et al.* (2006, 2011) apresentam conceito semelhante, quando falam da importância da determinação das ligações críticas, que tornariam uma rede mais vulnerável a incidentes. Um incidente seria um evento capaz

de, direta ou indiretamente, interromper ou reduzir a capacidade de oferecer serviço de um determinado *link*, rota ou rede rodoviária.

NICHOLSON (2003) identifica dois conceitos distintos para vulnerabilidade, apresentados a seguir.

D'ESTE e TAYLOR (*apud* NICHOLSON, 2003) definem vulnerabilidade como a probabilidade de severas condições adversas ocorrerem em decorrência da degradação de um pequeno número de *links* da rede. Eles diferenciam a *vulnerabilidade de conexão* da *vulnerabilidade de acesso*. A primeira considera dois nós em uma rede; se a perda ou degradação de um ou mais links na rede acarretar em aumento significativo do custo de transporte, então a conexão entre esses nós é dita vulnerável. A segunda considera a qualidade de acesso de um nó a todos os outros da rede; se a perda ou degradação de um ou mais links na rede acarretar em substancial redução na acessibilidade (segundo algum índice de acessibilidade) então este nó é dito vulnerável.

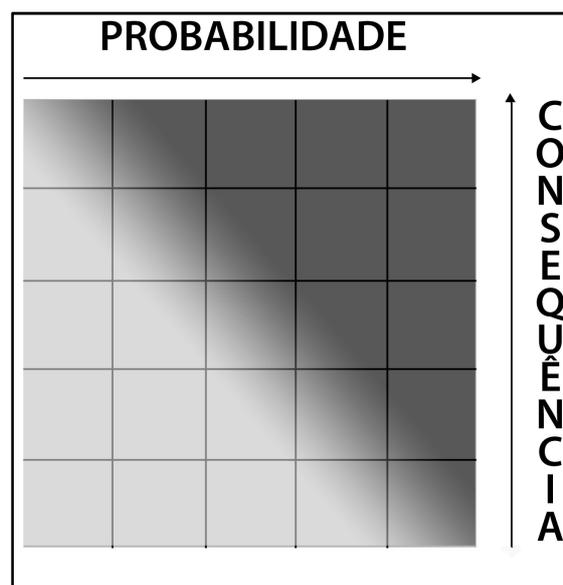
NICHOLSON e DU (*apud* NICHOLSON, 2003) incluem tanto a probabilidade quanto a consequência da degradação de uma ligação para avaliação da vulnerabilidade. Propõem a classificação dos *links* em três categorias, como se vê a seguir:

- a) *Links* fracos – seriam *links* com alta probabilidade de degradação de desempenho, mas cujas consequências dessa degradação não seriam altas. Ou seja, a perda de desempenho ocorreria com frequência, mas o desempenho em si não seria grandemente afetado;
- b) *Links* importantes – seriam links cujas consequências de degradação de desempenho seriam altas, embora a probabilidade de que isso aconteça seja baixa. Ou seja, a frequência de que esses *links* teriam perda de desempenho seria baixa, mas, quando isso ocorresse, as consequências seriam significativas;

- c) *Links* críticos – seriam *links* simultaneamente *fracos* e *importantes*, portanto os mais vulneráveis e que deveriam ter a prioridade de investimentos para minimizar essa vulnerabilidade.

Risco seria relacionado à vulnerabilidade, mas sua avaliação exigiria a estimativa da probabilidade de ocorrência de eventos e suas conseqüências prováveis, sendo portanto de mais difícil determinação. Para a determinação do risco, deveriam ser inicialmente elencados os fenômenos causais, como por exemplo, chuvas fortes; seus efeitos, por exemplo, enchentes; para em seguida buscar estimar a probabilidade de sua ocorrência e possíveis conseqüências, que incluem os custos, por exemplo, derivados de bloqueio de vias, com aumento do tempo de viagem, e investimentos necessários para os reparos necessários e retorno à normalidade (NICHOLSON, 2003). BERDICA (2002) define risco como uma composição da probabilidade de um incidente ocorrer e as conseqüências desse incidente. ERATH *et al.* (2010) complementa o conceito, acrescentando a probabilidade de ocorrência de falha na infraestrutura, o que, de certa forma, está implícito quando se fala de conseqüências. ERATH *et al.*, no entanto, não distingue os conceitos de vulnerabilidade e risco.

A figura 2.3 apresenta uma forma matricial de análise de risco.



Fonte: BERDICA (2002)

Figura 2.3: Matriz de risco – combinação de probabilidade e conseqüência.

Percebe-se, pelo exposto, que vulnerabilidade está diretamente relacionada à confiabilidade, na medida em que, quanto mais vulnerável for uma rede, menos confiável ela será.

2.6 Flexibilidade

Flexibilidade de uma rede de transportes pode ser definida como a facilidade que uma rede tem de se ajustar a mudanças nas circunstâncias e na demanda, seja na infraestrutura seja em operações. A conectividade de uma rede determina o número de opções disponíveis de uso de rotas alternativas para movimento entre nós, o que aumenta o nível de confiabilidade, já que a falha de um *link* não impede necessariamente a conexão entre nós (FEITELSON e SALOMON, 2000).

2.7 Rede Viária e modelagem

Segundo o TRANSPORTATION RESEARCH BOARD (1988), a modelagem da malha viária de uma região que se deseja estudar, é um dos aspectos mais importantes dentro do chamado modelo de quatro etapas, comumente empregado em planejamento de transportes. A representação do sistema para o estudo dos fluxos de veículos deve incluir as ruas, avenidas, vias expressas (*freeways*) e rodovias que compõem a malha viária regional.

A rede representativa do sistema viário é um grafo, onde os vértices são denominados nós e as arestas links (ligações ou ramos). Segundo ORTÚZAR e WILLUMSON (2011), viagem “é um movimento unidirecional de um ponto de origem a um ponto de destino”. Para a modelagem em uma rede, são criados nós especiais, denominados centróides, que concentram as origens e destinos de viagens de uma determinada zona em um único ponto, simplificando assim essa modelagem. Para conectar os centróides à rede viária são criados *links* especiais denominados conectores de centróides, que, diferentemente dos *links* regulares, não representam vias e sim ligações simbólicas para os pontos de acesso à rede viária, onde se dará a carga das

viagens geradas em uma determinada zona. A figura 2.4 a seguir apresenta uma parte de uma rede em detalhe com nós e *links* representados, bem como centróides e conectores.

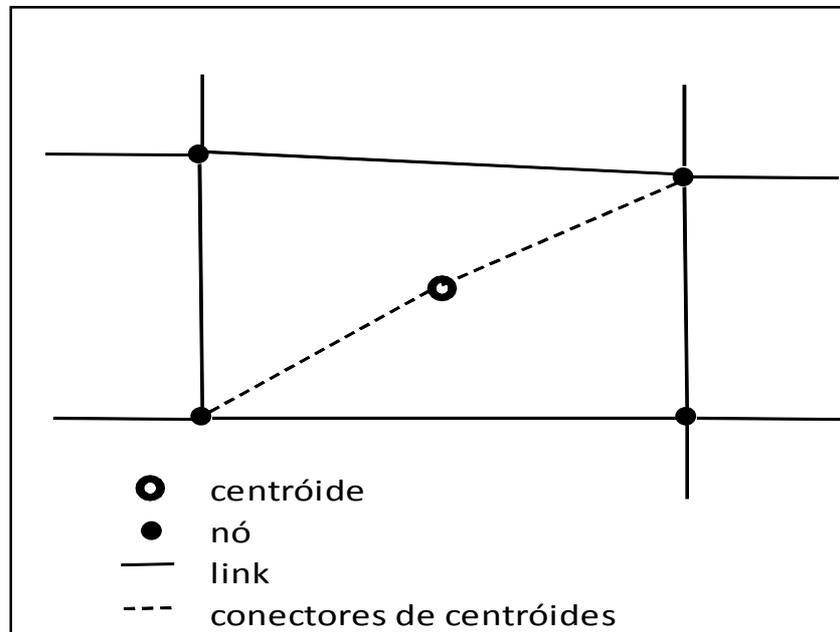


Figura 2.4: Representação gráfica de um segmento de rede

É preciso ficar atento para evitar que o modelo se torne muito complexo, sob pena de inviabilizar sua aplicação por dificuldades de obtenção de dados e de processamento desses dados, dentro do prazo previsto para a pesquisa ou projeto.

Quanto a esse aspecto, os pesquisadores BOVY e JANSEN (1983) confirmam, com base no mesmo argumento, a necessidade de estabelecer simplificações. Assim, deve ser encontrada uma solução de compromisso entre a simplicidade e o detalhamento indispensável para uma modelagem adequada.

2.7.1 Incerteza

Segundo CHEN *et al.* (2002) as incertezas são inevitáveis em problemas de engenharia. As fontes de incerteza podem derivar de fenômenos físicos que são inerentemente aleatórios ou a partir de imperfeições de modelagem. As primeiras são

inevitáveis enquanto que as segundas poderiam ser minimizadas com a adoção de modelos mais acurados.

Na modelagem de uma rede de transportes, ainda seguindo CHEN *et al.*(2002), as incertezas podem surgir das seguintes fontes:

- Variações nas capacidades dos arcos, ou *links*;
- Variações nas demandas por viagens;
- Imperfeições nos modelos de alocação de viagens;
- Incertezas nos parâmetros de estimativa do tempo de viagem.

2.7.2 Capacidade

Uma das principais atividades no planejamento de transportes é o estudo da demanda por viagens. Os estudos de demanda envolvem a determinação dos fluxos de tráfego em condições conhecidas (atuais), a partir de pesquisas específicas e a elaboração de modelos que busquem explicar o comportamento desse tráfego de forma a que seja possível a estimativa de demandas futuras sob diferentes cenários. Tendo em vista que o congestionamento de tráfego é fator de grande importância na estimativa dos tempos de viagem e, conseqüentemente, na escolha de rotas por parte dos usuários, a estimativa da capacidade das ligações que compõem a rede deve ser a mais acurada possível.

O meio comumente utilizado para estimar a capacidade de uma ligação rodoviária é a utilização do *Highway Capacity Manual* (HCM, 2000). O HCM, em conjunto com o é beneficiado por pesquisas permanentes conduzidas pelo *Transportation Research Bureau* dos EUA e é o padrão de fato para a estimativa de capacidade no Brasil, conforme pode ser observado no Manual de Estudos de Tráfego (DNIT, 2006). A metodologia do HCM exige, no entanto, um grande detalhamento de dados, o que é

factível para análises isoladas, mas frequentemente inviável para redes de transporte, que exigem uma abordagem mais simplificada, face ao grande número de ligações.

DHEENADAYALU *et al.* (2004) questionam a prática de se atribuir uma capacidade genérica a vias de porte semelhante, como forma de simplificar a tarefa de análise de uma rede rodoviária que pode conter milhares de *links*. Chamam a atenção para a importância das interseções semaforizadas a montante e a jusante e sua influência sobre ligações arteriais. Estudo de caso realizado em Baton Rouge, EUA, concluiu que há diferença significativa nos resultados da modelagem da demanda entre a determinação da capacidade por link pela metodologia completa do HCM e a aplicação de capacidades genéricas em função do tipo de via. Por outro lado, se incluída apenas a relação g/C (tempo efetivo de verde sobre o ciclo semafórico) e o número de faixas, por *link*, chega-se a resultados bastante próximos àqueles considerando todos os parâmetros do HCM. Ainda não se tem conhecimento de estudo que quantifique os benefícios e custos de uma análise de capacidade individual por *link* de rede, ainda que simplificada, para contrapor ao procedimento usual que estima capacidades médias para grupos de *links* com características semelhantes, quando da análise de redes complexas. O Plano Diretor de Transporte Urbano da Região Metropolitana do Rio de Janeiro (PDTU, 2005a), atribui capacidades padronizadas na maioria dos links de sua rede de simulação.

2.8 Síntese da Revisão Bibliográfica

O desempenho de uma rede viária pode ser avaliado por diferentes óticas, de acordo com as funções que se deseja analisar. Para o foco do presente estudo, a fluidez do tráfego, foram identificados cinco atributos principais:

- Congestionamento;
- Confiabilidade;
- Vulnerabilidade;

- Risco e
- Flexibilidade.

O capítulo 3, a seguir, apresenta os indicadores levantados na literatura. Os indicadores são em seguida analisados e classificados tomando com base os cinco atributos de desempenho identificados.

3 INDICADORES – ANÁLISE E CLASSIFICAÇÃO

3.1 Delimitação da Análise

Segundo FERREIRA (1987), *indicador* seria aquele que indica, que dá indicações. Já *índice*, seria “ ...número, adimensional ou não, que pode servir para a comparação de fenômenos aleatórios em tempos e situações diversos..”. Os conceitos de índice e indicador são portanto muito semelhantes. No presente trabalho, indicador deve ser entendido como o conceito geral utilizado para parâmetros que permitam obter indicações, enquanto que índice será sempre um número, representativo do indicador analisado.

Este capítulo analisa indicadores que permitam avaliar a importância de cada *link* em uma rede viária, mais especificamente em um cenário urbano, com o objetivo de criar um *ranking* que permita priorizar intervenções ou medidas preventivas nos links de acordo com sua importância para a rede. 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. Nesse sentido, 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.

No entanto, outros aspectos ligados ao desempenho também são considerados para criar outros tipos de indicadores, como por exemplo, indicadores associados ao grau de acessibilidade, risco e vulnerabilidade. Sendo inúmeros os aspectos e dimensões em que se apóiam os indicadores estudados na literatura, buscou-se traçar um limite que permitisse analisar com um pouco mais de profundidade um número mais restrito de indicadores. Nesse sentido, o presente trabalho analisa os indicadores ligados à

fluidez do tráfego. Notadamente, não são analisados indicadores associados diretamente à acessibilidade.

SAFIROVA *et al.* (2007) buscaram avaliar o custo marginal imposto ao transporte em decorrência da existência de congestionamentos, correlacionando o custo marginal a relações velocidade/fluxo.distância, levando ainda em consideração o impacto na rede. ZHANG e LOMAX (2008) estudaram um índice de congestionamento independente do impacto na rede, desconsiderando o efeito na rede.

A importância de um link em uma rede viária pode ser entendida como tanto maior quanto for o impacto de sua queda de desempenho no desempenho de toda a rede na qual se insere. Esse desempenho poderia ser analisado sob diversas ópticas. JENELIUS *et al.* (2006) faz distinção, por exemplo, entre os conceitos de vulnerabilidade, confiabilidade e risco. Vulnerabilidade seria a sensibilidade do desempenho da rede a eventos que provoquem uma redução de capacidade em um ou mais de seus links; confiabilidade seria a segurança em que o usuário tem em que a rede sempre oferecerá recursos para a ligação origem e destino desejada, sendo portanto ligada ao conceito de conectividade. A vulnerabilidade (ainda segundo JENELIUS *et al.*) estaria intimamente ligada ao conceito de risco, seja a probabilidade da ocorrência de um evento de falha – total ou parcial – de um link, seja às consequências advindas dessa falha.

D'ESTE e TAYLOR (2003, apud JENELIUS *et al.*, 2006), arguem que a vulnerabilidade deve estar intimamente ligada à consequência. Afirmam que “se a perda (ou degradação substancial) de um pequeno número de links diminuir significativamente a acessibilidade de um nó” então esse nó é *vulnerável*.

SOHN e KIM (2010) consideram o conceito de centralidade como muito útil para estabelecer prioridades relativas de uma área urbana em relação a outras em termos da eficiência da rede de transportes. Estudaram ainda a influência da centralidade de

uma zona em relação às zonas vizinhas. Assim, uma zona circundada por zonas com alta centralidade provavelmente terá alta centralidade. Dentro desse conceito, *links* servindo a zonas de alta centralidade ou em sua vizinhança, deveriam ter seus padrões de desempenho preservados de forma prioritária.

Para a medição da importância relativa de links em redes de transportes, tem sido propostos inúmeros indicadores. A presente Dissertação trata daqueles ligados à fluidez do tráfego, passíveis de ser utilizados na hierarquização de *links* em uma rede viária urbana.

3.2 Descrição dos Indicadores Levantados

A seguir são apresentados os indicadores ligados à fluidez do tráfego identificados durante a revisão da literatura e descritas a sua definição, aplicação e metodologia para determinação.

3.2.1 Indicadores do HCM – Nível de Serviço (NS) e Relação Volume sobre Capacidade (V/C)

O *Highway Capacity Manual* (HCM, 2000) não propõe especificamente índices para a hierarquização de ligações em uma rede rodoviária. No entanto, a classificação de nível de serviço proposta pelo HCM é um padrão de fato para os estudos de tráfego no Brasil, com seus níveis de “A” a “F” representando indicadores de desempenho de componentes de uma rede viária, tais como segmentos de vias e interseções. Nas primeiras edições do HCM, os níveis de serviço eram definidos a partir da relação Volume sobre Capacidade (V/C). Ainda hoje o indicador V/C tem sido utilizado para hierarquização de ligações, admitindo-se que quanto maior o V/C maior o comprometimento da ligação, e, portanto, mais crítica ela seria. Em suas edições mais recentes o HCM abandonou essa abordagem restrita e passou a adotar outras medidas de eficiência tais como a densidade de tráfego e o atraso decorrente do aumento no tempo de viagem.

O HCM (Highway Capacity Manual, 2000) classifica links congestionados como em nível de serviço “F”, onde o fluxo de veículos está acima da capacidade determinada para nível de serviço “E”. A capacidade no nível de serviço “E” seria o maior fluxo de tráfego que a via teria condição de suportar de forma sustentada; essa capacidade, se excedida, provocaria uma redução abrupta da velocidade e, conseqüentemente, uma redução do fluxo do tráfego para níveis novamente abaixo da capacidade. A capacidade é comumente expressa em Unidades de Carro de Passeio (UCP) por hora, através da conversão dos diversos tipos de veículos do fluxo para equivalentes em carros de passeio, segundo critérios próprios do HCM.

A determinação da velocidade do fluxo em *links* congestionados é tema ainda em discussão – o *Highway Capacity Manual* (HCM, 2000), por exemplo, não apresenta velocidades para o nível de serviço “F” (congestionamento), tendo em vista a instabilidade do regime. Para a simulação da alocação de tráfego em uma rede congestionada, no entanto, é necessário um critério para a determinação da velocidade, ou tempo de travessia, a ser considerada para links cujo fluxo supere a capacidade da via. A formulação normalmente utilizada para a determinação do tempo em condições de congestionamento é a função proposta pelo BPR – Bureau of Public Roads, que é discutida na NCHRP 365 (TRB, 1988) e apresentada na equação (3.1).

$$t = t_f \left[1 + \alpha \left(\frac{v}{c} \right)^\beta \right] \quad (3.1)$$

onde:

- t = tempo no link congestionado;
- t_f = tempo de fluxo livre;
- v = volume no link [UCP/h];
- c = capacidade do link [UCP/h];
- α, β = parâmetros [-].

A Figura 3.1 apresenta a função BPR em forma gráfica, admitindo uma velocidade em fluxo livre de 100km/h em um link de 1 km, parâmetros alfa e beta iguais a 0,15 e 4,0, respectivamente.

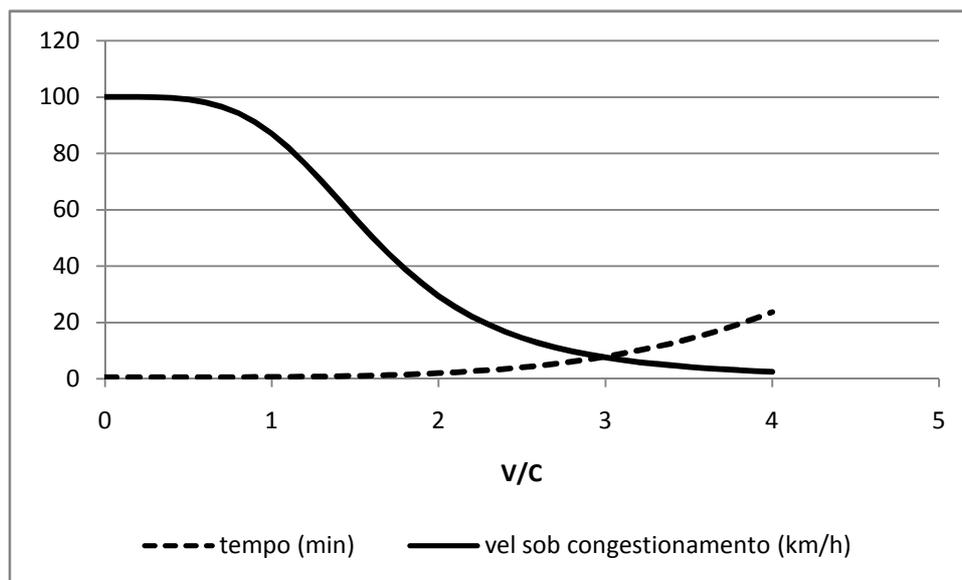


Gráfico 3.1: Velocidade e tempo em link sob congestionamento (função BPR)

A redução da capacidade em um determinado link da rede viária poderia reduzir a velocidade de deslocamento e, conseqüentemente, provocar a busca por novas rotas alternativas, eventualmente sobrecarregando outras ligações na rede. Assim, a redução da capacidade de um link, ou, em um extremo, sua completa interrupção ao tráfego, teria um impacto na rede como um todo, com esse impacto se distribuindo pela rede de forma não uniforme.

A determinação do NS é bastante complexa, o procedimento de cálculo sendo dependente do contexto da análise. Sendo assim, embora seja um indicador consagrado e referência em estudos de tráfego, é de difícil aplicação para hierarquização de ligações em uma rede viária complexa tendo em vista exigir uma análise individualizada de cada *link*. Entretanto, é comum a modelagem de redes

urbanas com a determinação da capacidade de seus *links* de forma simplificada, através do agrupamento dos links em função de parâmetros pré-estabelecidos, tais como número de faixas de tráfego, velocidade em fluxo livre e função da via no sistema de transportes.

Admitindo-se a aceitação da determinação da capacidade viária de forma simplificada, torna-se um procedimento simples a determinação do índice V/C após a etapa de alocação de viagens na rede de simulação, dividindo-se o fluxo alocado pela capacidade em cada *link* da rede.

3.2.2 Índice de Congestionamento (CI)

ZHANG e LOMAX (2007) propuseram um índice que denominaram de *Congestion Index*, ou Índice de Congestionamento, ou simplesmente CI, que, como o nome sugere, busca medir o nível de congestionamento de um arco de uma rede rodoviária. O CI é um índice que trata do desempenho de cada arco da rede rodoviária de forma isolada, não se preocupando com o desempenho da rede como um todo.

O índice proposto é calculado localmente em cada *link* em função do seu nível de congestionamento. O CI é definido como a razão tempo no *link* congestionado / tempo em fluxo livre. Para efeito de modelagem, o CI é determinado a partir de alocação pelo método de equilíbrio, com os tempos de viagem em links congestionados estimados segundo a função BPR, o que torna o CI função indireta da relação V/C (razão volume de tráfego sobre capacidade), e a determinação do desempenho de *links* a partir do CI semelhante à que seria obtida diretamente a partir da relação V/C.

A formulação matemática do CI é apresentada a seguir.

$$CI = \frac{t_c}{t_f} = \frac{t_f + t_d * (1 - r)}{t_f} \quad (3.2)$$

onde:

- t_c = tempo estimado em condições de congestionamento;
- t_f = tempo em condições de fluxo livre;
- t_d = atraso decorrente do congestionamento;
- r = redução do atraso (proporção) em decorrência de medidas operacionais eventualmente impostas [decimal].

O tempo em condições de fluxo livre t_f é calculado a partir da velocidade de fluxo livre conforme a equação 3.3.

$$t_f = \frac{l}{s_f} \quad (3.3)$$

onde:

- t_f = tempo em condições de fluxo livre;
- l = extensão;
- s_f = velocidade em condições de fluxo livre.

O tempo em condições de congestionamento t_c é calculado a partir da velocidade de congestionamento, conforme a equação 3.4.

$$t_c = \frac{l}{s_c} \quad (3.4)$$

onde:

- t_c = tempo em condições de congestionamento;
- l = extensão da viagem;
- s_c = velocidade em condições de congestionamento.

A velocidade sob congestionamento s_c é calculada segundo a equação (BELL, 2003 *apud* ZHANG e LOMAX, 2007)

$$S_c = \frac{60}{\frac{60}{s_f} + \alpha * e^{\beta(v/c)}} v \quad (3.5)$$

onde:

s_c = velocidade sob congestionamento;
 s_f = velocidade em fluxo livre;
 v = volume de tráfego no *link* [UCP/h];
 c = capacidade do *link* [UCP/h].
 α e β = constantes; geralmente 0,15 e 4,0, respectivamente.

O atraso decorrente do congestionamento t_d inclui dois componentes: o atraso recorrente t_r e o atraso devido a incidentes t_i , calculados pelas equações:

$$t_r = t_c - t_f \quad (3.6)$$

$$t_i = (t_c - t_f) * \theta \quad (3.7)$$

$$t_d = t_r + t_i = (t_c - t_f) * (1 + \theta) \quad (3.8)$$

onde:

t_d = atraso devido ao congestionamento;
 t_c = tempo em condições de congestionamento;
 t_f = tempo em condições de fluxo livre;
 t_r = atraso recorrente;
 t_i = atraso devido a incidentes;
 θ = fator de incidente, indicando a probabilidade da ocorrência de incidentes na rede de transportes.

Como pode ser visto, o CI é fortemente dependente da relação V/C, com os tempos sob congestionamento determinados a partir de função padrão BPR (TRB, 1988). Consequentemente, hierarquias decorrentes do indicador CI tem ordenação semelhante a hierarquias decorrentes diretamente da relação V/C.

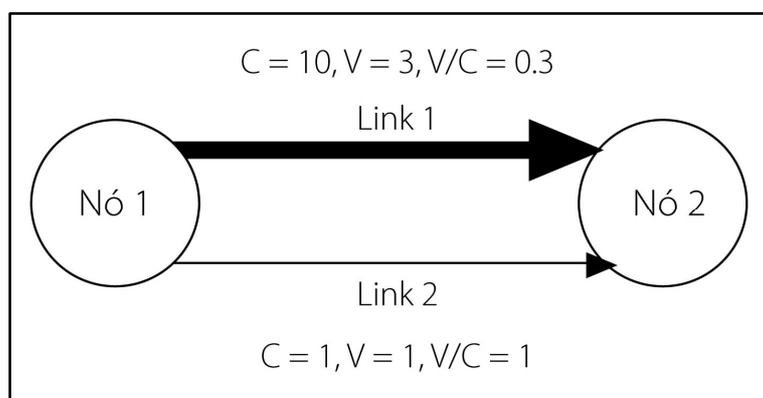
3.2.3 Índice de Robustez da Rede – NRI

Índice proposto por SCOTT *et al.* (2006) e denominado *Network Robustness Index*, ou *NRI*. O índice surge como alternativa à determinação de links críticos a partir da relação volume / capacidade (V/C). O índice V/C, embora indique o nível de congestionamento de determinado link, deixa de considerar impactos globais sobre a

rede. Desta forma, a adoção do índice V/C não permite a determinação dos *links* mais críticos, o que dificulta a maximização dos benefícios para a rede quando se busca prioridades de investimento. O NRI, ao contrário, busca determinar a importância do link em relação à rede que o contém. Segundo SCOTT *et al.*: “o NRI... é a mudança no custo do tempo de viagem associado com o re-roteamento de todo o tráfego no sistema caso aquele segmento se torne indisponível.” A remoção de uma ligação, ou seu bloqueio temporário, particularmente aqueles de tráfego mais pesado ou que contem túneis ou pontes, podem provocar consequências econômicas significativas, com aumento nos tempos de viagem pelo uso de rotas alternativas (BELL, 2000; CHEN, 2002). O re-roteamento do tráfego em decorrência de mau funcionamento de uma ligação pode levar à sobrecarga de outras ligações na rede, principalmente aquelas que operam próximas à capacidade.

O NRI de cada *link* representa, portanto, a deseconomia resultante da desativação do mesmo em termos de tempo de viagem, e pode ser utilizado na determinação de benefícios de manutenção ou recuperação de vias específicas, entre outras aplicações.

Os problemas associados à utilização do V/C como índice para a determinação de *links* críticos pode ser observado na rede simplificada da figura 3.1.



Fonte: SCOTT *et al.*(2006)

Figura 3.1: Exemplo ilustrativo da seleção de links críticos com base na relação V/C .

Pela figura, verifica-se que, considerando-se o índice V/C, a ligação 2 seria mais crítica do que a 1. No entanto, o bloqueio do *link* 2 traria pouco impacto à mobilidade, já que o *link* 1 tem capacidade para absorver o tráfego redirecionado, com a relação V/C subindo para 0,4. Caso o *link* 1 fosse bloqueado, o tráfego redirecionado para o *link* 2 provocaria congestionamento, com a relação V/C subindo para 4. É evidente, portanto, a inadequação do índice V/C para a determinação das ligações de maior impacto sobre o desempenho de uma rede (SCOTT *et al.*, 2006).

O Índice de Robustez da Rede (NRI), tem como finalidade avaliar a importância crítica de um dado segmento de rodovia (*link* de uma rede) em relação ao sistema no qual se insere com base na mudança de parâmetros de custo de viagem, por exemplo, o tempo de viagem associado ao re-roteamento de todo o tráfego no sistema caso esse segmento esteja inutilizável.

A formulação matemática do índice é apresentada a seguir:

$$NRI_a = c_a - c \quad (3.9)$$

onde:

NRI_a = Índice de Robustez da rede para o *link* a ;

c_a = custo do tempo de viagem em todo o sistema, após remoção do *link* a ;

c = custo do tempo de viagem em todo o sistema, todos os links incluídos.

calculados como:

$$c_a = \sum_a t_a v_a \delta_a \quad (3.10)$$

e

$$c = \sum_a t_a v_a \quad (3.11)$$

onde:

t_a = tempo de viagem no *link* a ;

v_a = volume de tráfego no *link* a ;

δ_j = 1 se a não for o *link* removido; 0 caso contrário.

No lugar de custo de tempo de viagem, pode ser utilizado o custo generalizado de transporte, caso desejado.

O índice será tão mais representativo quanto mais acurados forem os tempos de viagem. SCOTT *et al.* recomendam a obtenção do tempo a partir da alocação do tráfego na rede pelo modelo conhecido como Equilíbrio do Usuário, primeiramente proposto por WARDROP (1952, *apud* SCOTT *et al.*, 2006).

3.2.4 Índice de Robustez da Rede-modificado – NRI-m

Trata-se de índice de robustez proposto por SULLIVAN *et al.* (2010), na realidade o *NRI* de SCOTT *et al.* (2006) modificado de forma a considerar reduções na capacidade de *links* em uma rede ao invés de sua completa interdição ou remoção.

Segundo SULLIVAN *et al.*, a determinação de índices que avaliam o desempenho de redes a partir da completa interrupção de um link – ou 100% de redução de capacidade – não é metodologicamente indiscutível nem necessariamente realista no que diz respeito à modelagem dos eventos que ocorrem cotidianamente nas redes de transporte. Salientam ainda a dificuldade de se obter um índice quando uma parcela da rede é isolada após a remoção de um link, problema também identificado por JENELIUS *et al.* (2006). Propõem a modificação do índice *NRI*, discutido anteriormente, que seria determinado não a partir da completa remoção de um link da rede, mas da redução de sua capacidade. Assim, poder-se-ia obter índices *NRI* modificados para diferentes níveis de redução de capacidade. Os autores citados fizeram estudos comparativos com o *NRI* modificado sendo calculado a partir de diferentes níveis de redução da capacidade, obtendo diferentes classificações hierárquicas de *links*. Admitiram que os níveis de redução mais apropriados para a priorização de ligações seriam aqueles que fornecessem resultados mais estáveis no que diz respeito à ordenação de cada link segundo o índice obtido, ou que obtivessem a hierarquia mais estável. Em um experimento real sobre a rede do Condado de

Chittenden em Vermont, EUA, concluíram que o nível de redução de capacidade que produzia resultados mais estáveis seria, para aquelas condições, entre 75 e 80%.

A formulação para a determinação do NRI modificado seria a mesma já descrita para a determinação do NRI, com a diferença que não há a completa eliminação do link para o qual se calcula o índice, e sim a redução de sua capacidade a um determinado nível previamente estabelecido.

3.2.5 Índice de Robustez de Viagens em Rede – NTR

SULLIVAN *et al.* (2010), partindo do NRI modificado, propõem um Índice de Robustez de Viagens em Rede (NTR). O NTR é um índice de robustez ligado à rede e não a *links* individualizados, e foi desenvolvido de forma a permitir a comparação entre redes rodoviárias de diferentes topologias e portes.

Segundo SULLIVAN *et al.* (2010), o NTR é calculado pelo somatório dos valores do NRI modificado de todos os *links* individuais de uma rede dividido pela demanda total de viagens da rede. Afirmam que a opção pela demanda no denominador ao invés do número total de arcos da rede se dá porque o tempo de viagem e o cálculo do fluxo no procedimento de alocação de tráfego são dependentes do número de *links*. Se a demanda for considerada constante, redes com menor número de arcos tendem a ter custos de viagem superiores quando comparadas a redes com maior número, o que distorceria o resultado. Consideram que a demanda total seria um melhor *proxy* para o porte da rede.

A equação a seguir define matematicamente o NTR:

$$NTR = \frac{\sum_{i \in I} NRI_a}{D_n} \quad (3.12)$$

onde:

NTR = Índice de Robustez de Viagens em Rede;
 NRI_a = Índice de Robustez da Rede Modificado do *link* i ;
 D_n = Número total de viagens na rede, ou demanda total.

Vale ressaltar que o NTR é um índice que permite a comparação de diferentes redes, podendo ser utilizado para hierarquizar redes, e não links, principal objeto da presente dissertação. Sua inclusão neste trabalho se dá dada a sua estreita relação com o NRI, do qual é uma extensão.

3.2.6 Índice de Importância – II

JENELIUS *et al.* (2006) propõem um índice de importância com base na variação do custo global para a rede de transportes derivado da interrupção de um determinado elemento (*link* ou grupo de *links*), o que forçaria os usuários a buscar rotas alternativas, portanto aumentando seu custo generalizado de transporte. O modelo admite o comportamento baseado no princípio de alocação de viagens por equilíbrio do usuário, onde a rota escolhida é aquela que minimiza o custo generalizado de transporte, sendo único o custo ao longo da rota entre cada par de origem e destino. A equação 3.13 apresenta a variação do custo entre os pares de origem e destino.

$$\Delta c_{ij}^{(e)} = c_{ij}^{(e)} - c_{ij}^{(0)} \quad (3.13)$$

onde:

$\Delta c_{ij}^{(e)}$ = variação no custo de viagem entre i e j decorrente da interrupção do elemento e ;

$c_{ij}^{(e)}$ = custo de viagem entre i e j decorrente da interrupção do elemento e ;

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

A interrupção de uma ou mais ligações pode dividir a rede em duas ou mais partes desconectadas, com o custo entre determinados pares de origem e destino sendo infinitos. Para lidar com esse efeito, os autores introduziram o conceito de *demandas insatisfeitas* $vn_{ij}^{(a)}$ definida como:

$$vn_{ij}^{(e)} = \begin{cases} vt_{ij} & \text{se } c_{ij}^{(e)} = \infty \\ 0 & \text{se } c_{ij}^{(e)} < \infty \end{cases} \quad (3.14)$$

onde:

$vn_{ij}^{(e)}$ = total de viagens entre i e j não realizadas devido à interrupção do elemento e ;

vt_{ij} = demanda de viagens entre i e j ;

$c_{ij}^{(e)}$ = custo de viagem entre i e j decorrente da interrupção do elemento e .

O Índice de Importância II poderia ser calculado como na equação 3.15.

$$II(e) = \frac{\sum_i \sum_{j \neq i} w_{ij} (c_{ij}^{(e)} - c_{ij}^{(0)})}{\sum_i \sum_{j \neq i} w_{ij}}, \quad e \in E^{nd} \quad (3.15)$$

onde:

c_{ij} = custo de viagem entre i e j com toda a rede funcional (0) e com o elemento e interrompido (e);

w_{ij} = fator de peso que reflete a significância do par Origem-Destino (OD) ij em relação aos outros pares OD (poderia ser, por exemplo, a demanda). Se os fatores w_{ij} forem iguais para todos os pares, ter-se-ia uma condição que JENELIUS *et al.* Denominaram de “oportunidades iguais” onde a acessibilidade deveria se dar de forma igualitária a todas as zonas de uma região

$II(e)$ = índice de importância do elemento e ;

E^{nd} = conjunto dos links que não provocam a desconexão da rede, ou seja, cuja interrupção não isola partes da rede de transporte, o que provocaria a impossibilidade de viagem para um grupo de pares OD e portanto um valor infinito para o índice.

Para o caso em haja desconexão da rede em decorrência da interrupção de um elemento e , o Índice de Importância para demanda insatisfeita II^{ins} seria dado pela equação 3.16.

$$II^{ins}(e) = \frac{\sum_i \sum_{j \neq i} vn_{ij}^e}{\sum_i \sum_{j \neq i} vt_{ij}}, \quad e \in E \quad (3.16)$$

onde:

vn_{ij}^e = total de viagens entre i e j não realizadas devido à interrupção do elemento e ;

vt_{ij} = demanda de viagens entre i e j ;

E = conjunto de todos os *links* da rede.

Para efeito de aplicação do modelo, a demanda é considerada inelástica à variação de custos, ou seja, a interrupção do *link* ou conjunto de *links* tem duração suficiente para que haja uma nova relação de equilíbrio de rotas na rede, mas insuficiente para que haja reflexo na demanda.

3.2.7 Índice de Exposição – IE

Semelhante ao índice II, o índice de exposição proposto por JENELIUS *et al.* (2006) difere daquele índice 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 determinado *link*. O índice poderia ser calculado pela equação 3.17, e representaria um índice médio de exposição a um evento em um *link* escolhido de forma aleatória.

$$IE(m) = \frac{\sum_{e \in E^{nd}} \sum_{i \in N_m^d} \sum_{j \neq i} w_{ij} (c_{ij}^{(e)} - c_{ij}^{(0)})}{L^{nc} \sum_{i \in N_m^d} \sum_{i \neq j} w_{ij}} \quad (3.17)$$

onde:

- c_{ij} = custo de viagem entre i e j com toda a rede funcional (0) e com o elemento e interrompido (e);
- w_{ij} = fator de peso que reflete a significância do par Origem-Destino (OD) ij em relação aos outros pares OD (poderia ser, por exemplo, a demanda);
- N_m^d = conjunto dos nós pertencentes à região m .
- E^{nd} = conjunto dos links que não provocam a desconexão da rede, ou seja, cuja interrupção não isola partes da rede de transporte, o que provocaria a impossibilidade de viagem para um grupo de pares OD e portanto um valor infinito para o índice;
- L^{nd} = número de links que não provocam a desconexão da rede;
- $IE(m)$ = índice de exposição da região m a um evento aleatório.

Pela equação apresentada anteriormente, percebe-se que é calculada uma média entre as variações de custo provocadas pela interrupção de um *link*. O indicador de exposição correspondente à interrupção do *link* de maior importância dentro da região poderia ser calculado pela equação 3.18.

$$IE_{max}(m) = \max_{e \in E^{nd}} \frac{\sum_{i \in N_m^d} \sum_{j \neq i} w_{ij} (c_{ij}^{(e)} - c_{ij}^{(0)})}{\sum_{i \in N_m^d} \sum_{j \neq i} w_{ij}} \quad (3.18)$$

O IE pode assim ser classificado segundo a variação de custos de transporte que a interrupção de cada link provocaria sobre uma determinada região de uma rede de transporte, ou de toda a rede de transporte.

3.2.8 Índice de Vulnerabilidade com Base em Célula – IVBC

Este índice foi proposto por JENELIUS e MATTESON (2011) com o objetivo de avaliar a vulnerabilidade de uma rede a eventos que venham a interromper uma ou mais ligações. Os autores observam que existem estudos que analisam o impacto de um evento sobre uma rede sob a ótica dos fluxos econômicos como, por exemplo, o estudo de KIM *et al.* (2002). Outra abordagem bastante explorada é o estudo do impacto da interrupção de um *link* da rede de transporte (JENELIUS *et al.*, 2006, SOHN, 2006, SCOTT *et al.*, 2006). Diversos trabalhos buscam avaliar ainda a importância de uma rede de transportes, como por exemplo SULLIVAN *et al.* (2010). O índice de vulnerabilidade em questão difere das demais abordagens no sentido de que trata de interrupções de regiões afetadas por um evento. Para tal, os autores propõem criar uma malha que divide uma região em células, que seriam a menor unidade de análise. A análise de vulnerabilidade da rede seria feita então supondo a interrupção de todos os *links* pertencentes a uma célula e o impacto sobre a rede de transporte. Essa abordagem leva em consideração, portanto a densidade da rede de transportes.

JENELIUS *et al.* definem a importância de uma determinada célula como sendo o impacto total sobre os usuários de uma rede de transporte no caso de todos os links interceptando a célula serem interrompidos por certo tempo. A classificação das células segundo sua importância seria um indicativo de onde alocar recursos para a minimização dos impactos negativos.

Admitindo que $\Delta C_{ij}^c(t)$ seja o impacto total para todos os usuários se deslocando da origem i para o destino j durante a interrupção de todos os links interceptando a célula c durante o intervalo de tempo t , a importância da célula c , dada uma interrupção de duração τ , seria definida como o impacto total nas relações de origem e destino na rede de transporte e calculada pela equação 3.19.

$$I(c|t) = \sum_i \sum_j \Delta C_{ij}^c(t) \quad (3.19)$$

O índice de vulnerabilidade IVBC seria a importância calculada para a célula, ou, melhor dito, a importância do conjunto de ligações que interceptam uma determinada célula.

Observa-se que não é proposta uma dimensão precisa para as células, ou seja, a malha que as definem pode ser mais esparsa ou mais densa, conforme o interesse do estudo específico. A determinação do índice descrito exige a utilização de software GIS para a identificação dos links pertencentes a cada célula, associado a rotinas de cálculo escritas especificamente para a determinação do índice.

Para a determinação do impacto, podem ser consideradas diferenças de custo de transporte no total da rede ou diferenças de tempo de viagem.

3.2.9 Índice de Custo Marginal sob Congestionamento – ICMC

SAFIROVA *et al.* (2007) buscou determinar um custo marginal de congestionamento. Custo marginal seria o custo imposto ao sistema a partir do aumento de uma unidade de tráfego (fluxo x distância). A metodologia adotada busca então determinar o acréscimo de tempo total em uma rede de transporte a partir do acréscimo de uma unidade de fluxo x distância. Aplicando-se um valor para o tempo, o ICMC seria um determinado valor monetário por unidade de distância.

Segundo os autores, tradicionalmente utilizam-se custos médios de transporte e, desse modo, ignoram-se os efeitos que um usuário impõe aos demais em vias congestionadas. Três metodologias alternativas foram desenvolvidas para incluir o efeito do custo marginal de congestionamento provocado por um usuário. O primeiro método calcula o ICMC para cada *link* isoladamente, o que traz implícita a hipótese de que a propagação dos efeitos do congestionamento fica restrita à ligação congestionada, ou que essa propagação seria desprezível. O segundo e o terceiro métodos levam em consideração a repercussão dos efeitos do congestionamento por toda a rede de transporte. O segundo seria de cálculo mais simples e o terceiro mais

rigoroso teoricamente, embora de cálculo mais complexo. Os três métodos são apresentados a seguir.

Método 1

O método 1 utiliza a relação exógena velocidade / (fluxo x distância), supondo que a velocidade seria uma função relacionada com a intensidade do fluxo e a distância. O custo marginal de congestionamento (ICMC1) por unidade de distância em um *link a* seria dado pela equação 3.20.

$$ICMC1_a = \left(\frac{1}{s_{a1}} - \frac{1}{s_{a0}} \right) \times fl_a \times ct_a \quad (3.20)$$

Sendo s_a uma função de fl_a , $s_a = s(fl_a)$, então:

$$s_{a1} = s_{a0} + \frac{\partial s}{\partial fl_a} \quad (3.21)$$

e:

$$ICMC1_a = \frac{\frac{\partial s}{\partial fl_k}}{s_{a0} \left(s_{a0} + \frac{\partial s}{\partial fl_a} \right)} \times fl_a \times ct_a \quad (3.22)$$

onde:

s_{a0} e s_{a1} = respectivamente, velocidades inicial e final no *link a*, antes e após o acréscimo de uma unidade do produto do fluxo pela distância;

fl_a = produto do fluxo de veículos em UCP¹ pela distância no *link a*;

ct_a = valor médio do tempo por veículo no *link a*;

Portanto, o custo marginal de congestionamento por unidade de extensão em um *link* seria o valor monetário do tempo perdido por todos os usuários neste *link*. Esse custo marginal pode ser utilizado como um índice a ser determinado para cada *link* em uma

¹ Unidades de Carro de Passeio

rede rodoviária. Implicitamente, o método 1 – aqui apresentado – admite que não há realocação de viagens devido ao aumento unitário no congestionamento ou repercussão nas demais ligações da rede.

Método 2

No método 2, o impacto do aumento de veículos é considerado em toda a rede. Para tanto, a demanda em cada par O/D (Origem/Destino) é aumentada em um mesmo pequeno percentual de viagens e é realizada uma nova alocação de viagens à rede. Em outras palavras, a matriz de origem e destino tem cada uma de suas células multiplicadas por um mesmo fator, por exemplo, 1,001. Consequentemente, há uma variação nas velocidades e no produto fluxo e distância em cada *link*, tanto em decorrência do maior número de viagens quanto pelo aumento do tempo decorrente do maior fluxo, implicando em um custo adicional de tempo de viagem, que é denominado por SAFIROVA *et al.* de Custo Marginal de Congestionamento, que denotaremos *ICMC2*.

$$ICMC2_a = \left(\frac{1}{s_{a1}} - \frac{1}{s_{a0}} \right) \times \frac{fl_{a0} + fl_{a1}}{2} \times ct_a \times \frac{1}{fl_{a1} - fl_{a0}} \quad (3.23)$$

onde:

- s_{a0} e s_{a1} = respectivamente, velocidades inicial e final no *link a*, antes e após o aumento no produto fluxo x distância [km/h];
- fl_{a0} e fl_{a1} = respectivamente, fluxo x distância inicial e final no *link a* [UCP.km]
- ct_a = valor médio do tempo no *link a* [R\$/UCP.h].

Como pode ser observado, a equação para o Método 2 é semelhante à do Método 1, com diferenças decorrentes do fato de que a variação no fluxo.distância não é necessariamente unitária. O *ICMC2* é superior ao *ICMC1* no sentido em que são considerados os efeitos globais do congestionamento na rede viária. No entanto, o método implicitamente atribui todas as mudanças de velocidade em um determinado *link a* mudanças no fluxo no mesmo *link*, sem considerar as interferências dos demais *links*.

Método 3

Segundo SAFIROVA *et al.* (2007)., para simular o efeito global em uma rede decorrente da variação unitária do fluxo em apenas um *link* seria necessário aumentar a demanda nesse único *link*, mantendo os demais intactos. Isso não é possível, já que a demanda em cada *link* é determinada pela alocação de matrizes de origem e destino sobre redes de transporte. Para contornar o problema, os autores propõem simular o efeito de um aumento unitário no fluxo de um determinado *link* através de uma redução unitária na capacidade do mesmo *link*. Desta forma, seria possível a estimativa do impacto sobre uma rede decorrente do aumento de fluxo em um único *link*. Admitindo-se uma rede com N *links*, seria possível a determinação do custo marginal de congestionamento $ICMC3$ para um *link* a a partir da equação 3.24 apresentada a seguir.

$$ICMC3_a = \sum_{n=1}^N \left(\frac{1}{s_{n1}} - \frac{1}{s_{n0}} \right) \times \left(\frac{f_{l_{n0}} + f_{l_{n1}}}{2} \right) \times ct_n \quad (3.24)$$

onde:

s_{n1} e $f_{l_{n1}}$ = velocidade e fluxo x distância no *link* n após a redução na oferta de uma unidade de fluxo x distância no *link* a .

s_{n0} e $f_{l_{n0}}$ = velocidade [km/h] e fluxo x distância no *link* n antes da redução da capacidade do *link* a

ct_n = valor médio do tempo de viagem por veículo para o *link* n .

Segundo SAFIROVA *et al.*(2007) os métodos 2 e 3 devem chegar a resultados bastantes próximos no que diz respeito ao total da rede, já que ambos avaliam os efeitos na rede a partir de modificações em um *link*. A diferença seria na repartição desses efeitos globais pelos *links* que compõem a rede. Sendo assim, os autores consideram a utilização do método 2 como aceitável e sugerem sua utilização tendo em vista a menor exigência de recursos computacionais.

3.2.10 Índice de Risco de Nicholson – IRN

NICHOLSON (2003) propôs um método de avaliação de risco com o objetivo de estimar o impacto do fechamento ao tráfego em um ou mais segmentos na rede rodoviária na Ilha do Norte na Nova Zelândia. Para Nicholson, o risco pode ser traduzido como o custo decorrente do fechamento dos segmentos, associado à probabilidade de ocorrência do fechamento. Para a determinação do risco, o primeiro passo seria a listar os principais eventos capazes de provocar as interrupções. No caso específico de seu estudo, os fenômenos foram os seguintes:

- Neve e formação de gelo;
- Queda de cinzas decorrente de erupções vulcânicas;
- Lahar² (avalanche provocada por vulcão);
- Danos a rodovias e pontes em decorrência de terremoto;
- Acidentes.

O passo seguinte seria:

- Determinar a probabilidade de ocorrência de cada um dos fenômenos.

Terceiro passo:

- Estimar as conseqüências dos eventos. Nesse aspecto, as principais conseqüências seriam os custos associados aos reparos necessários à rede e os custos associados aos usuários afetados pelas interrupções.

Dentre as conseqüências apontadas por NICHOLSON, é de particular interesse para o presente trabalho a estimativa do custo associado aos usuários afetados, que poderia ser adotado como um índice de desempenho de rede.

² Palavra indonésia que descreve o fluxo de lama e detritos descendo de um vulcão. O lahar pode ser bastante destrutivo em virtude de sua grande velocidade e energia.

Quando um ou mais links de uma rede são interrompidos, as viagens que percorreriam esses links são redistribuídas ao longo de rotas alternativas, com um custo de viagem total maior do que o original, admitindo-se que as viagens continuariam a ser realizadas. No entanto, com o aumento dos custos de viagem, alguns usuários podem desistir de suas viagens, avaliando a utilidade de sua realização como inferior ao novo custo. Segundo os estudos de NICHOLSON, o número de viagens nas novas condições pode ser estimado a partir da seguinte equação:

$$v_{1ij} = v_{0ij} \left(\frac{c_{0ij}}{c_{1ij}} \right)^p \quad (3.25)$$

onde:

v_{1ij} e c_{1ij} = número de viagens e custo de cada viagem entre a origem i e o destino j , quando um ou mais *links* estão interrompidos.
 v_{0ij} e c_{0ij} = número de viagens e custo de cada viagem entre a origem i e o destino j , com a rede íntegra.
 p = parâmetro de elasticidade.

O custo total decorrente das interrupções na rede seria então:

$$IRN = \Delta c_{op} + pb + \Delta c_{ac} \quad (3.26)$$

onde:

Δc_{op} = variação nos custos operacionais veiculares e no custo de tempo de viagem.
 pb = perda de benefícios decorrentes das viagens que deixam de ser realizadas.
 Δc_{ac} = variação nos custos de acidentes.

A variação nos custos operacionais veiculares e no tempo de viagem pode ser calculada pela equação 3.27 e a perda de benefícios pela não realização de viagens pode ser calculada pela equação 3.28.

$$\Delta c_{op} = \sum_i \sum_j c_{1ij} v_{1ij} - \sum_i \sum_j c_{0ij} t_{0ij} \quad (3.27)$$

$$pb = \sum_i \sum_j 0.5(c_{1ij} + c_{0ij}) (v_{0ij} - v_{1ij}) \quad (3.28)$$

onde:

V_{1ij} e C_{1ij} = número de viagens e custo de cada viagem entre a origem i e o destino j quando um ou mais *links* estão interrompidos.

V_{0ij} e C_{0ij} = número de viagens e custo de cada viagem entre a origem i e o destino j com a rede íntegra.

O custo total decorrente da interrupção de um *link* em uma rede pode ser tomado como um índice de importância desse *link* em relação à rede que o contem, uma vez que quanto maior for esse custo, maior é o impacto econômico do não funcionamento dessa ligação.

3.2.11 Índice de Vulnerabilidade de Erath (IVE)

ERATH *et al.* (2010) buscaram definir uma metodologia para integrar a vulnerabilidade a eventos naturais a sistemas de gerenciamento de infraestrutura. O foco da metodologia foi calcular as conseqüências ao sistema de transportes, incluindo os efeitos de congestionamento, decorrentes da interrupção de uma determinada ligação. Embora o trabalho de Erath *et al.* não defina especificamente um índice de vulnerabilidade, ele fornece uma metodologia que permite hierarquizar os links de uma rede viária com base nas conseqüências da interrupção de cada ligação. A essa conseqüência, os autores chamam “conseqüência indireta no transporte induzida por falha” (na infraestrutura). Como esta conseqüência é monetizada, o valor encontrado pode ser visto como um índice: quanto maior o valor, maior a conseqüência da interrupção da ligação e, portanto, mais vulnerável está a rede à essa interrupção.

Utilizando o conceito de custos generalizados, as conseqüências da interrupção de uma ligação se dão através do aumento no tempo e na extensão de viagem. Esses acréscimos no tempo de viagem e na distância percorrida devem ser traduzidos em valores monetários de forma a determinar as conseqüências econômicas da interrupção analisada.

As equações seguintes mostram a sequência de cálculos que levam à determinação das conseqüências no transporte da interrupção de uma ligação e que será denominado Índice de Vulnerabilidade de Erath (IVE).

$$\Delta TT_a = \sum_i \sum_{j \neq i} w_{ij} (t_{ij}^{(l)} - t_{ij}^{(0)}) \quad (3.29)$$

onde:

ΔTT_a = Diferença entre tempos totais nas situações com e sem a interrupção do *link a*, ponderada pela demanda;

w_{ij} = fator ponderador, numericamente igual à demanda entre as zonas *i* e *j*;

$t_{ij}^{(0)}$ = tempo de viagem entre *i* e *j* em condições normais;

$t_{ij}^{(a)}$ = tempo de viagem entre *i* e *j* com o *link a* interrompido;

$$\Delta TL_a = \sum_i \sum_{j \neq i} w_{ij} (l_{ij}^{(a)} - l_{ij}^{(0)}) \quad (3.30)$$

onde:

ΔTL_a = Diferença entre distâncias totais nas situações com e sem a interrupção do *link a*, ponderada pela demanda;

w_{ij} = fator ponderador, numericamente igual à demanda entre as zonas *i* e *j*;

$l_{ij}^{(0)}$ = distância entre *i* e *j* em condições normais;

$l_{ij}^{(a)}$ = distância entre *i* e *j* com o *link a* interrompido.

$$IVE = \Delta TT_a \cdot c_t + \Delta TL_a \cdot c_l \quad (3.31)$$

onde:

IVE = Índice de Vulnerabilidade de Erath;

c_t = custo do tempo de viagem;

c_l = custo de deslocamento.

3.3 Análise Comparativa dos Indicadores Levantados

Conforme já dito anteriormente, foram selecionados para análise indicadores de desempenho ligados à fluidez do tráfego. No entanto, cada indicador levantado leva

em consideração aspectos diferentes relacionados a essa fluidez ou quantifica e valoriza esses aspectos de forma diferente. Para uma comparação entre os indicadores foi adotada uma metodologia em três etapas:

- 1) enumeração dos principais aspectos de interesse para a comparação;
- 2) análise de cada indicador focada nos aspectos enumerados;
- 3) sumário comparativo dos indicadores levantados.

3.3.1 Principais Aspectos para Comparação

No decorrer da revisão bibliográfica (Capítulo 2) foram analisados conceitos relacionados ao desempenho de redes viárias segundo a interpretação de diversos autores. Posteriormente, já no presente capítulo, foram apresentados os principais indicadores de desempenho ligados à fluidez do tráfego levantados durante a pesquisa. Cada indicador levantado possui metodologia própria, de acordo com o entendimento de cada autor quanto aos elementos determinantes para a avaliação do desempenho da rede, segundo sua ótica particular. A análise dos indicadores propostos pelos diferentes autores e os critérios adotados para a determinação dos índices correspondentes permitiu a identificação de elementos, que seriam, além dos atributos de desempenho discutidos anteriormente, aspectos de relevo quanto à abrangência e grau de dificuldade de determinação. Esses elementos identificados permitem uma avaliação mais analítica da abordagem de desempenho considerada por cada indicador, e são comentados a seguir. Os itens de *A* a *E* apresentam os atributos de desempenho considerados e os itens *F* e *G* os demais aspectos considerados, juntamente com a proposição de critérios para classificação dos indicadores para posterior análise comparativa.

A – Congestionamento

Sendo a ocorrência de congestionamento um dos principais fatores ligados à fluidez do tráfego, julgou-se importante classificar os indicadores levantados quanto à forma como é considerado o congestionamento na determinação do índice. Alguns indicadores se limitam a apresentar formas de quantificação do nível de congestionamento de um *link* considerando o valor encontrado como o indicador de desempenho daquele *link*. Outros indicadores são influenciados pelo nível de congestionamento em um *link* específico ou da rede viária como um todo, mas esse nível de congestionamento não se traduz diretamente em um índice de desempenho. Para a classificação dos índices foram considerados dois níveis com relação ao tratamento do congestionamento:

- Direto – o nível de congestionamento de um *link* é o principal aspecto considerado no seu índice de desempenho;
- Indireto – o nível de congestionamento de um *link* ou de um conjunto de *links* influencia no seu índice de desempenho de forma indireta, mas o desempenho do *link* não guarda necessariamente relação direta com este nível de congestionamento.

B – Confiabilidade

Esse atributo se refere à confiança em que os usuários têm de que a rede de transportes sempre terá um desempenho satisfatório. A dimensão mais valorizada pelo usuário é normalmente o tempo de viagem e, portanto, a confiabilidade está fortemente associada à previsibilidade do tempo de viagem em uma rede de transportes (FERREIRA, 1987; BELL, 2000; BATES, 2001).

Os indicadores levantados são todos relacionados à fluidez do tráfego, e a fluidez do tráfego influencia o tempo de viagem. Como o principal parâmetro associado ao aspecto *Confiabilidade* é tempo de viagem, todos os indicadores levantados estão de alguma forma levando em consideração esse aspecto. Para efeito comparativo,

buscou-se classificar os indicadores e sua relação com a capacidade de representar o nível de confiabilidade na rede de transportes, sendo essa capacidade avaliada em dois níveis:

- Indireto – o indicador guarda pouca relação com o conceito de confiabilidade da rede;
- Direto – o indicador é um instrumento diretamente relacionado com a confiabilidade da rede.

C – Vulnerabilidade

BERDICA (2002), JENELIUS *ET al.* (2006, 2011) e NICHOLSON (2003) tratam da vulnerabilidade de uma rede transportes como sua dependência maior ou menor do desempenho de um *link* ou grupo de *links*. Uma rede seria mais vulnerável quando a degradação do desempenho de um de seus *links* (ou grupo de *links*) implicasse em maiores conseqüências negativas para o desempenho dessa rede. Dentre os indicadores levantados, a maioria reflete, de alguma forma, a vulnerabilidade da rede de transportes. Para efeito comparativo, os identificadores foram classificados em três níveis:

- Indiferente – o identificador não está associado à vulnerabilidade da rede, ou seja, não reflete a maior ou menor vulnerabilidade da rede de transportes;
- Direto – o identificador está diretamente relacionado à vulnerabilidade da rede e é um bom índice para a vulnerabilidade da rede;
- Indireto – o identificador está relacionado de forma indireta à vulnerabilidade da rede e é um índice associado ao grau de vulnerabilidade da rede, embora não seja esse seu principal aspecto de mensuração de desempenho.

D – Risco

O aspecto Risco se assemelha à Vulnerabilidade, mas sua avaliação exige a estimativa da probabilidade de ocorrência de eventos e suas conseqüências (NICHOLSON, 2003; BERDICA, 2002). Alguns autores, como ERATH *et al.* (2010), não fazem distinção entre Risco e Vulnerabilidade. À semelhança da classificação utilizada para o atributo Vulnerabilidade, os indicadores foram classificados em três níveis:

- Indiferente – o identificador não está associado ao risco da rede, ou seja, não reflete o maior ou menor risco de perda de desempenho da rede de transportes;
- Direto – o identificador está diretamente relacionado ao risco de perda de desempenho da rede;
- Indireto – o identificador está relacionado de forma indireta ao risco de perda de desempenho da rede e é um índice associado ao grau desse risco, embora não seja esse seu principal aspecto de mensuração de desempenho.

E – Flexibilidade

Flexibilidade de uma rede de transportes pode ser definida como a facilidade que uma rede tem de se ajustar a mudanças nas circunstâncias e na demanda, seja na infraestrutura seja em operações. Frequentemente está associada ao grau conectividade da rede de transportes e ao número de rotas alternativas entre os possíveis pares de origem e destino (FEITELSON e SALOMON, 2000).

À semelhança da classificação utilizada para os atributos Vulnerabilidade e Risco, os indicadores foram classificados em três níveis:

- Indiferente – o identificador não está associado à flexibilidade da rede, ou seja, não reflete a maior ou menor flexibilidade da rede de transportes;
- Direto – o identificador está diretamente relacionado à flexibilidade da rede;

- Indireto – o identificador está relacionado de forma indireta ao risco de perda desempenho da rede e é um índice associado ao grau desse risco, embora não seja esse seu principal aspecto de mensuração de desempenho.

F – Abrangência

Alem dos atributos de desempenho já descritos, foram considerados dois aspectos adicionais. O aspecto abrangência se refere à dimensão espacial considerada pelo indicador analisado. Foram identificadas três dimensões principais:

- *Link* – o indicador é restrito ao desempenho do ramo (*link*), sem avaliar a influência ou interdependência do *link* com respeito aos demais ramos que compõem a rede;
- Região – o indicador não se restringe a um *link* mas sim a um grupo de *links* ou nós que definem uma região, subconjunto da rede viária;
- Rede – o indicador tem como finalidade principal verificar a importância de um determinado *link* ou grupo de *links* no desempenho da rede como um todo.

G – Dificuldade de Determinação

Para a utilização de um indicador para hierarquização de ligações em uma rede de transportes é necessário que a sua determinação seja factível. Sendo assim, é importante que a metodologia se sua determinação seja conhecida e sistematizável, a partir de parâmetros constantes em um banco de dados com as características dos *links* que compõem a rede viária. É importante ainda que os custos envolvidos, tanto monetários como de tempo estejam dentro dos recursos disponíveis e dos princípios da razoabilidade. Um processo muito demorado para a determinação de indicadores, por exemplo, pode reduzir a análise de cenários alternativos, o que comprometeria a qualidade do estudo, ainda que a metodologia utilizada fosse de grande precisão.

É desejável, portanto, que o processo de determinação de indicadores seja tanto quanto possível simples, sistematizável, rápido e de baixo custo. Quanto a este aspecto foram criadas três classificações:

- Dificuldade Baixa – determinação simples, sistematizável, rápida e de baixo custo;
- Dificuldade Média – dificuldade intermediária entre a Baixa e a Alta;
- Dificuldade Alta – determinação exige recursos computacionais elevados ou análise individual personalizada ou ainda tempo expressivo para sua consecução.

Como critério para a classificação em nível de dificuldade, foram consideradas como de baixa dificuldade as metodologias de determinação que pudessem ser incorporadas diretamente em modelos de análise de redes disponíveis no mercado, como por exemplo o TransCAD (CALIPER, 1996), sem a necessidade de programação especializada acessória. A dificuldade média corresponderia a algum esforço de programação acessória ou de preparação de dados mais personalizada. A dificuldade alta, por sua vez, envolveria um tratamento individual por ligação, programação extensiva personalizada ou tempo de processamento de dados considerado como excessivo.

3.3.2 Análise de Cada Indicador Quanto aos Atributos e Aspectos Enumerados

NS – Nível de Serviço e V/C – Volume sobre Capacidade

Indicador proposto pelo HCM (HCM, 2000) para avaliar trechos rodoviários quanto ao nível de serviço, ou padrão de serviço oferecido aos usuários. A finalidade primeira do NS não é a hierarquização de *links* em uma rede viária e sim a sua classificação quanto ao comprometimento da capacidade de escoamento e o padrão desse escoamento de tráfego. O NS está relacionado com o desempenho de um *link* e não de uma rede dentre os valores possíveis para o NS, o valor F corresponde à uma

ligação congestionada, enquanto que os valores de A a E correspondem a diferentes padrões de desempenho para ligações não congestionadas.

Estando o nível de serviço F associado a *links* congestionados, a velocidade nesses ramos é incerta e, portanto, de difícil previsão. Sendo assim, quanto maior a quantidade de *links* com NS F menor a *confiabilidade* da rede de transportes, uma vez que a previsibilidade dos tempos de viagem ficará mais comprometida. O indicador NS, no entanto, não tem como finalidade verificar a maior ou menor *confiabilidade* da rede. Não há também qualquer preocupação em avaliar os atributos *vulnerabilidade*, *risco* ou *flexibilidade*.

É um indicador com metodologia de determinação consolidada e constantemente atualizada pelo *Transportation Research Bureau* dos Estados Unidos da América em seu *Highway Capacity Manual* cuja última revisão foi editada em 2011. Os preceitos do HCM fazem parte do Manual de Estudos de Tráfego (DNIT, 2006). A metodologia no entanto é complexa e de difícil determinação sistemática exigindo a análise individual de cada *link*. Embora haja software que incorpore a metodologia do HCM, o Highway Capacity Software (MCTTRANS, 2000), ainda assim o processo exige a análise individualizada de forma não sistematizável. É comum a simplificação que envolve a determinação da capacidade para nível de serviço E de forma aproximada com base em parâmetros constantes em um modelo representativo de uma rede viária, tais como, número de faixas de tráfego, tipo de pavimento, gradiente de inclinação da via e outros. O indicador V/C ou relação volume sobre a capacidade de tráfego, poderia ser então calculado de forma sistemática, e utilizado para a hierarquização dos *links* como um *proxy* do nível de serviço, já que quanto maior a relação V/C mais o nível de serviço se aproxima de F . O indicador V/C permite uma maior gradação do que o NS, que só apresenta seis classificações. Se o NS pode ser considerado como de dificuldade alta para hierarquização de *links* em uma rede, a utilização da relação V/C como substituta apresenta um grau de dificuldade baixo.

O quadro apresentado a seguir sumariza a classificação quanto aos elementos comparativos.

Quadro 3.1: Classificação dos Indicadores NS e V/C

ATRIBUTO/ASPECTO	NS	V/C
Congestionamento	Direto	Direto
Confiabilidade	Indireto	Indireto
Vulnerabilidade	Indiferente	Indiferente
Risco	Indiferente	Indiferente
Flexibilidade	Indiferente	Indiferente
Abrangência	Link	Link
Dificuldade	Alta	Baixa

CI – Índice de Congestionamento

O CI, proposto por ZHANG e LOMAX (2007) é, em síntese, a razão entre o tempo sob congestionamento e o tempo sem congestionamento, para a travessia em um determinado *link* de uma rede rodoviária. Sua determinação está restrita à análise de *links* isolados, sem a verificação de impacto no desempenho da rede na qual esses *links* estão inseridos. Como o próprio nome sugere, o indicador está diretamente ligado ao nível de congestionamento do *link* sob análise.

Assim como o NS e o V/C, o CI guarda uma relação indireta com o atributo *confiabilidade*. Quanto maior o CI menor a *confiabilidade* da rede de transportes, uma vez que a previsibilidade dos tempos de viagem ficará mais comprometida. O indicador, no entanto, não tem como finalidade verificar a maior ou menor confiabilidade da rede. Não há também qualquer preocupação em avaliar os atributos *vulnerabilidade, risco ou flexibilidade*.

O quadro apresentado a seguir sumariza a classificação quanto aos elementos comparativos.

Quadro 3.2: Classificação do Índice de Congestionamento - CI

ATRIBUTO/ASPECTO	CI
Congestionamento	Direto
Confiabilidade	Indireto
Vulnerabilidade	Indiferente
Risco	Indiferente
Flexibilidade	Indiferente
Abrangência	Link
Dificuldade	Baixa

NRI – Índice de Robustez da Rede

O NRI, proposto por SCOTT *et al.* (2006) é, em síntese, a deseconomia em termos de tempo de viagem resultante da interrupção de um *link* da rede viária. O NRI de um determinado *link* a pode ser visto, portanto, como a diferença entre os tempos totais de viagem em toda a rede viária considerada nas situações sem o *link* a e com todos os links em pleno funcionamento. Sendo assim, o NRI é um indicador que classifica a importância de um *link* para o desempenho da rede na qual ele se insere. Está indiretamente ligado ao nível de congestionamento, uma vez que um *link* sob congestionamento tem grande probabilidade de ser uma ligação importante dentro da rede viária. No entanto, o NRI não mede o nível de congestionamento de um *link* ou da rede viária.

O NRI está diretamente ligado ao atributo *vulnerabilidade*, uma vez que uma rede mais vulnerável tenderá a ter seu desempenho mais degradado com a interrupção de de um de seus *links*, apresentando NRI maiores para os ramos que a compõem.

Estando o NRI diretamente relacionado com a capacidade de re-roteamento em função da interrupção de uma ligação, está portanto diretamente ligado ao aspecto *flexibilidade*.

Quanto aos atributos *confiabilidade* e *risco* há uma relação indireta, sendo a falha em uma ligação associada ao conceito de risco e a variação nos tempos de viagem em decorrência dessa falha associado à confiabilidade da rede.

A determinação sistemática do NRI para todos os *links* em uma rede complexa é um procedimento de dificuldade alta, dada a necessidade de programação específica e o tempo envolvido, que pode ser expressivo. Em uma rede pouco complexa, a dificuldade de utilização do NRI como índice pode ser considerada baixa, dada a simplicidade da metodologia envolvida em sua determinação.

O quadro apresentado a seguir sumariza a classificação quanto aos elementos comparativos.

Quadro 3.3: Classificação do Índice de Robustez da Rede - NRI

ATRIBUTO/ASPECTO	NRI
Congestionamento	Indireto
Confiabilidade	Indireto
Vulnerabilidade	Direto
Risco	Indireto
Flexibilidade	Direto
Abrangência	Rede
Dificuldade	Média

NRI-m – Índice de Robustez da Rede-modificado

É um índice proposto por SULLIVAN *et al.* (2010) resultado da modificação do NRI de SCOTT *et al.* (2006), de forma a considerar a redução na capacidade dos *links* de uma rede em lugar de sua completa interdição ou remoção. Se for considerada a redução de 100% em sua capacidade, o NRI-m equivale ao NRI.

A classificação do NRI-m quanto aos aspectos com vista à comparação com os demais indicadores levantados é praticamente coincidente com a do NRI. Em termos de dificuldade, envolve mais trabalho para sua determinação do que o NRI, já que, idealmente, deveriam ser testados diversos níveis de redução de capacidade para cada *link* para uma análise mais detalhada. O procedimento é simples, mas os recursos computacionais e de tempo requeridos são grandes. Assim, quanto à dificuldade, será classificado como de dificuldade alta, conforme pode ser visto no quadro apresentado a seguir.

Quadro 3.4: Classificação do Índice de Robustez da Rede Modificado – NRI-m

ATRIBUTO/ASPECTO	NRI-m
Congestionamento	Indireto
Confiabilidade	Direto
Vulnerabilidade	Direto
Risco	Indireto
Flexibilidade	Direto
Abrangência	Rede
Dificuldade	Alta

NTR – Índice de Robustez de Viagens em Rede

O NTR, proposto por SULLIVAN *et al.* (2010) é um índice ligado ao desempenho da rede, desenvolvido para comparação entre redes e sub-redes, independente de sua topologia e porte. Não é um indicador para hierarquização de *links* em uma rede viária, mas poderia ser utilizado para hierarquização de sub-redes, ou grupo de *links*, dentro de uma rede, de forma a selecionar regiões mais críticas. É, portanto, um indicador ligado diretamente ao desempenho de uma rede, sem individualização por ramo.

O indicador leva indiretamente em conta a suscetibilidade a congestionamento, o que influencia os tempos globais de viagem cada vez que a capacidade de um *link* é reduzida. Sendo um indicador global de rede, que avalia a variação nos tempos de todos os *links* em função de reduções de capacidade em cada um de seus ramos, está diretamente ligado ao atributo *confiabilidade*. Estando a variação dos tempos globais entre os pares de origem e destino ligada à disponibilidade de rotas alternativas, o indicador está também diretamente ligado ao atributo *flexibilidade*. É um bom indicador também para *vulnerabilidade* já que permite verificar a queda de desempenho da rede em face de eventos que degradem o desempenho de cada um de seus *links*. Quanto ao atributo *risco*, pode-se dizer que está ligado indiretamente, uma vez que não contempla a probabilidade de ocorrência dos eventos que impõem a redução de capacidade em seus ramos.

Sendo o NTR determinado a partir do somatório dos valores de NRI-m de cada um dos ramos que compõem uma rede viária, seu cálculo é de dificuldade alta, dado o tempo e recursos de processamento necessários.

O quadro apresentado a seguir sumariza a classificação quanto aos elementos comparativos.

Quadro 3.5: Classificação do Índice de Viagens em Rede - NTR

ATRIBUTO/ASPECTO	NTR
Congestionamento	Indireto
Confiabilidade	Direto
Vulnerabilidade	Direto
Risco	Indireto
Flexibilidade	Direto
Abrangência	Rede
Dificuldade	Alta

II – Índice de Importância

Proposto por JENELIUS *et al.* (2006), é um indicador semelhante ao NRI, na medida em que avalia o desempenho da rede de transporte rodoviária a partir da desconexão de um de seus *links*. O Índice de Importância de cada *link* é função do impacto nos custos globais de transporte causado pela sua retirada da rede. Difere do NRI na medida em que utiliza um fator ponderador (normalmente a demanda) de forma a obter um valor médio para cada *link*.

Quanto aos atributos utilizados para a comparação entre os indicadores sob análise, comporta-se exatamente como o NRI. O quadro a seguir sumariza a classificação obtida.

Quadro 3.6: Classificação do Índice de Importância - II

ATRIBUTO/ASPECTO	II
Congestionamento	Indireto
Confiabilidade	Indireto
Vulnerabilidade	Direto
Risco	Indireto
Flexibilidade	Direto
Abrangência	Rede
Dificuldade	Média

IE – Índice de Exposição

Proposto por JENELIUS *et al.* (2006) é um índice semelhante ao II, diferindo deste no sentido em que avalia um grupo de nós, ou uma região quanto à sua vulnerabilidade a um evento capaz de interromper o fluxo em um determinado *link*. Quanto ao aspecto *abrangência* é, portanto, focado em regiões, mas leva em consideração o impacto no restante da rede.

O eventual congestionamento de um ou mais *links* tem impacto na determinação do IE de forma indireta, na medida em que aumenta o custo global de viagem. Os atributos *vulnerabilidade* e *flexibilidade* são considerados de forma direta, na medida em que o índice é tanto maior quanto maior for a vulnerabilidade e menor a flexibilidade da rede.

A confiabilidade da rede é indiretamente considerada, na medida em que uma rede mais vulnerável e menos flexível tem, normalmente, seus tempos de viagem menos previsíveis. Uma rede mais vulnerável a eventos capazes de interromper um de seus ramos apresenta certamente um risco maior. Como o IE não trata da probabilidade da

ocorrência dos eventos disruptores, considera-se que o atributo *risco* é considerado de forma indireta.

A determinação do IE de uma região apresenta uma dificuldade extra em relação à determinação do II para cada um de seus *links*, já que envolve a subdivisão da rede em regiões e seu georreferenciamento.

O quadro apresentado a seguir sumariza a classificação quanto aos elementos comparativos.

Quadro 3.7: Classificação do Índice de Exposição - IE

ATRIBUTO/ASPECTO	IE
Congestionamento	Indireto
Confiabilidade	Indireto
Vulnerabilidade	Direto
Risco	Indireto
Flexibilidade	Direto
Abrangência	Região/Rede
Dificuldade	Alta

IVBC – Índice de Vulnerabilidade com Base em Célula

Proposto por JENELIUS e MATTESON (2011), este indicador tem como objetivo avaliar a vulnerabilidade de uma rede a um evento que prejudique a circulação em toda uma região, ou célula. Trata, portanto, da interrupção de todos os *links* de uma região, ou célula, em lugar de um único *link*. É um índice que permite a hierarquização de regiões ou células, de forma diferente da apresentada pelo indicador IE.

Quanto aos elementos comparativos, as observações feitas para o IE são válidas também para o IVBC, e o quadro apresentado a seguir sumariza a classificação resultante.

Quadro 3.8: Classificação do Índice de Vulnerabilidade com Base em Célula - IVBC

ATRIBUTO/ASPECTO	IE
Congestionamento	Indireto
Confiabilidade	Indireto
Vulnerabilidade	Direto
Risco	Indireto
Flexibilidade	Direto
Abrangência	Região/Rede
Dificuldade	Alta

ICMC – Índice de Custo Marginal sob Congestionamento

O ICMC, proposto por SAFIROVA (2007), é determinado com base no acréscimo de custo do tempo de viagem em uma rede a partir do aumento de uma unidade de tráfego (fluxo x distância). O aumento do tráfego tem impacto no congestionamento, e, conseqüentemente, nos custos de transporte. A importância de cada *link* pode ser avaliada sob o prisma do impacto no custo decorrente do aumento marginal do nível de congestionamento.

Os autores propuseram três métodos, que produzem três indicadores, ou índices, diferentes, denotados como ICMC1, ICMC2 e ICMC3. Embora com o mesmo objetivo, há diferenças em suas determinações que levam a resultados distintos.

Quanto à abrangência, o ICMC1 trata do desempenho de *links* isolados, sem considerar o impacto na rede como um todo. O ICMC2 e o ICMC3 avaliam o desempenho no contexto da rede, e não de *links* isolados.

Os três métodos produzem indicadores diretamente ligados ao nível de congestionamento de cada *link*. Estando a variação do custo de transporte em função do nível de congestionamento diretamente ligada à variação no tempo de viagem, o atributo *confiabilidade* está diretamente ligado ao ICMC, nos seus três métodos de determinação.

O atributo *flexibilidade* é contemplado nos indicadores ICMC2 e ICMC3, já que a existência de rotas alternativas diminuiria o impacto sobre a rede no aumento marginal de um de seus *links*. O mesmo não acontece no ICMC1, que trata de *links* isolados, não permitindo a avaliação da flexibilidade da rede.

A dificuldade de determinação dos indicadores ICMC1 e ICMC2 pode ser considerada baixa, de fácil sistematização com a utilização de softwares de tratamento de rede disponíveis no mercado. O ICMC3, no entanto, apresenta uma dificuldade extra, já que envolve a simulação de redução da capacidade de cada *link* individualmente.

Os atributos *vulnerabilidade* e *risco* não são contemplados pelo ICMC.

Quadro 3.9: Classificação do Índice de Custo Marginal sob Congestionamento - ICMC

ATRIBUTO/ASPECTO	ICMC1	ICMC2	ICMC3
Congestionamento	Direto	Direto	Direto
Confiabilidade	Direto	Direto	Direto
Vulnerabilidade	Indiferente	Indiferente	Indiferente
Risco	Indiferente	Indiferente	Indiferente
Flexibilidade	Indiferente	Direto	Direto
Abrangência	Rede	Rede	Rede
Dificuldade	Baixa	Baixa	Média

IRN – Índice de Risco de Nicholson

O IRN, proposto por NICHOLSON (2003) é um índice que busca determinar o risco do fechamento ao tráfego de um ou mais ramos de uma rede rodoviária, avaliando os custos decorrentes deste fechamento de um ramo. Envolve, portanto, a determinação da probabilidade de que eventos ocorram tais que provoquem a interrupção dos segmentos componentes de uma rede. O indicador avalia o efeito na rede viária como um todo, e não apenas no *link* interrompido.

Os atributos *congestionamento* e *confiabilidade* são considerados de forma indireta, na medida em que o tempo de viagem é um fator para a determinação do custo de viagem.

Os atributos *vulnerabilidade* e *flexibilidade* são tratados diretamente, na medida em que o indicador varia diretamente com a vulnerabilidade e flexibilidade da rede sob análise.

O atributo *risco* pode ser tratado diretamente, desde que se incorpore a probabilidade de fechamento de cada *link* analisado, o que é recomendado por Nicholson.

A maior dificuldade na determinação do IRN é a estimativa da probabilidade de ocorrência de eventos capazes de interromper cada *link* de uma rede viária, dificuldade que aumenta com o número de ramos componentes da rede.

O quadro apresentado a seguir sumariza a classificação quanto aos aspectos comparativos.

Quadro 3.10: Classificação do Índice de Risco de Nicholson - IRN

ATRIBUTO/ASPECTO	IE
Congestionamento	Indireto
Confiabilidade	Indireto
Vulnerabilidade	Direto
Risco	Direto
Flexibilidade	Direto
Abrangência	Rede
Dificuldade	Alta

IVE – Índice de Vulnerabilidade de Erath

É um índice proposto por ERATH (2010) que avalia as conseqüências da interrupção de um *link* da rede viária sobre os custos generalizados de transporte em toda a rede. Especificamente, admite que os custos de transportes estejam diretamente ligados ao tempo de viagem e à distância percorrida e que devam ser ponderados pela demanda.

Quanto aos atributos *congestionamento* e *confiabilidade*, o relacionamento do indicador é indireto, já esses fatores estão relacionados ao tempo de viagem e impactam nos custos generalizados de transporte.

O IVE está diretamente relacionado aos atributos *vulnerabilidade* e *flexibilidade*, já que, quanto maior a vulnerabilidade e menor a flexibilidade maiores serão os impactos nos custos de transportes e, portanto, no IVE.

O fator *risco* é tratado de forma indireta, já que não é considerada a probabilidade de ocorrência de interrupções.

A dificuldade de determinação depende da precisão com que se pretende tratar os diferentes custos de tempo e deslocamento associados a cada *link* em uma rede de transportes.

Quadro 3.11: Classificação do Índice de Vulnerabilidade de Erath

ATRIBUTO/ASPECTO	IE
Congestionamento	Indireto
Confiabilidade	Indireto
Vulnerabilidade	Direto
Risco	Indireto
Flexibilidade	Direto
Abrangência	Rede
Dificuldade	Média

3.3.3 Sumário Comparativo dos Indicadores Levantados

Com base nos aspectos identificados, o quadro 3.12 sumariza a classificação realizada e permite uma melhor visualização e comparação dos indicadores analisados.

Quadro 3.12: Comparação entre os indicadores analisados por atributo e aspecto considerado

INDICADORES														
ATRIBUTOS/ ASPECTOS	NS	V/C	CI	NRI	NRI-m	NTR	II	IE	IVBC	ICMC1	ICMC2	ICMC3	IRN	IVE
Congestionamento	Direto	Direto	Direto	Indireto	Indireto	Indireto	Indireto	Indireto	Indireto	Direto	Direto	Direto	Indireto	Indireto
Confiabilidade	Indireto	Indireto	Indireto	Indireto	Direto	Direto	Indireto	Indireto	Indireto	Direto	Direto	Direto	Indireto	Indireto
Vulnerabilidade	Indiferente	Indiferente	Indiferente	Direto	Direto	Direto	Direto	Direto	Direto	Indiferente	Indiferente	Indiferente	Direto	Direto
Risco	Indiferente	Indiferente	Indiferente	Indireto	Indireto	Indireto	Indireto	Indireto	Indireto	Indiferente	Indiferente	Indiferente	Direto	Indireto
Flexibilidade	Indiferente	Indiferente	Indiferente	Direto	Direto	Direto	Direto	Direto	Direto	Indiferente	Direto	Direto	Direto	Indireto
Abrangência	Link	Link	Link	Rede	Rede	Região /Rede	Rede	Região /Rede	Região /Rede	Link	Rede	Rede	Rede	Rede
Dificuldade	Alta	Baixa	Baixa	Média	Alta	Alta	Média	Alta	Alta	Baixa	Baixa	Alta	Alta	Média
Autor	HCM	HCM	Zhang e Lomax	Scott <i>et al.</i>	Sullivan <i>et al.</i>	Sullivan <i>et al.</i>	Jenelius <i>et al.</i>	Jenelius <i>et al.</i>	Jenelius e Matteson	Safirova <i>et al.</i>	Safirova <i>et al.</i>	Safirova <i>et al.</i>	Nicholson	Erath <i>et al.</i>
Ano	2000	2000	2007	2006	2010	2010	2006	2006	2011	2007	2007	2007	2003	2010

NS – Nível de Serviço; **V/C** – Volume sobre Capacidade; **CI** – Índice de Congestionamento; **NRI** – Índice de Robustez da Rede; **NRI-m** – Índice de Robustez da Rede-modificado; **NTR** – Índice de Robustez de Viagens em Rede; **II** – Índice de Importância; **IE** – Índice de Exposição; **IVBC** – Índice de Vulnerabilidade com Base em Célula; **ICMC1** – Índice de Custo Marginal sob Congestionamento – método 1; **ICMC2** – ICMC – método 2; **ICMC3** – ICMC – método 3; **IRN** – Índice de Risco de Nicholson; **IVE** – Índice de Vulnerabilidade de Erath.

Como pode ser observado no quadro 3.12, quanto ao aspecto abrangência, há três classificações para os indicadores analisados: Link, Rede e Região/Rede. As classificações Link e Rede refletem indicadores que permitem a hierarquização de links de uma rede considerando seu desempenho de forma isolada (Link) ou o desempenho da rede que os contem (Rede). A classificação Região/Rede permite a hierarquização de regiões, sub-redes ou redes dentro de uma rede.

De forma a avaliar cada indicador, independente de sua abrangência e dificuldade de determinação, mas quanto aos atributos que leva em consideração, foram pontuadas as classificações da seguinte forma:

- Indiferente – 0 pontos;
- Indireto – 1 ponto;
- Direto – 2 pontos.

Não foram atribuídos pesos aos diferentes atributos, tratados, portanto, com igual relevância. Desta forma, quanto à pontuação nos aspectos *Congestionamento*, *Confiabilidade*, *Vulnerabilidade*, *Risco* e *Flexibilidade*, tem-se o quadro apresentado a seguir.

Quadro 3.13: Classificação dos indicadores quanto aos aspectos principais

Aspecto	Congestio- namento	Confiabi- lidade	Vulnerabi- lidade	Risco	Flexibi- lidade	Total
Indicador						
NS	2	1	0	0	0	3
V/C	2	1	0	0	0	3
CI	2	1	0	0	0	3
NRI	1	1	2	1	2	7
NRI-m	1	2	2	1	2	8
NTR	1	2	2	1	2	8
II	1	1	2	1	2	7
IE	1	1	2	1	2	7
IVBC	1	1	2	1	2	7
ICMC1	2	2	0	0	0	4
ICMC2	2	2	0	0	2	6
ICMC3	2	2	0	0	2	6
IRN	1	1	2	2	2	8
IVE	1	1	2	1	2	7

Pelo critério apresentado, destacam-se, com oito pontos, os indicadores NRI-m, NTR e IRN. O NRI-m avalia a sensibilidade à redução de capacidade; O NTR tem como aplicação a comparação de redes e o IRN a comparação de *links*. Os três contextualizam os *links* na rede. Como ponto negativo, todos tem dificuldade Alta para sua determinação.

Em um segundo plano, com sete pontos, tem-se os indicadores NRI, II, IE, IVBC e IVE. O IE e o IVBC tem como aplicação a comparação de redes; os demais a comparação de *links*. Todos tem como foco o desempenho da rede e não *links* isolados. Apresentam dificuldade de determinação Alta (IE e IVBC) ou Média (NRI, II e IVE).

Com seis pontos apresentam-se os indicadores ICMC2 e ICMC3, ambos tendo como aplicação a comparação *links*, com foco no desempenho da rede que os contem. Quanto à dificuldade de determinação, o ICMC2 apresenta classificação Baixa e o ICMC3, Alta.

Os indicadores com menor pontuação são aqueles que se dedicam a comparar *links* quanto ao seu desempenho isolado. O ICMC1 apresenta quatro pontos, e o NS, V/C e CI, três pontos. Com exceção do NS, com dificuldade Alta de determinação, os demais apresentam dificuldade Baixa.

A pontuação permite uma primeira comparação entre os indicadores levantados, com os valores maiores relacionados a quantidade de atributos considerados e o grau de envolvimento. Uma pontuação baixa, no entanto, não desqualifica necessariamente um indicador, mas sua aplicação será mais restrita. O Estudo de Caso mostrou que a hierarquia resultante da aplicação dos indicadores guarda relação com os atributos de desempenho considerados.

4 PREPARAÇÃO PARA O ESTUDO DE CASO

Segundo YIN (2001) o estudo de caso é uma estratégia de pesquisa que compreende uma investigação empírica para investigar um fenômeno contemporâneo dentro de seu contexto. Para STOECKER (1991, *apud* YIN, 2001), o estudo de caso é um método que inclui desde a coleta de dados à análise de dados, sendo uma estratégia de pesquisa abrangente. No presente estudo, uma vez apresentados os indicadores de hierarquização encontrados na literatura, com sua definição e características principais, julgou-se importante realizar-se um estudo de caso de forma a apresentar um exemplo prático da técnica de hierarquização e permitir a comparação entre indicadores selecionados.

Tendo o presente estudo recursos limitados à disposição, tanto financeiros quanto de tempo, fez-se necessário selecionar um número limitado dentre os indicadores analisados.

Este capítulo tem como objetivo apresentar os critérios utilizados para a seleção da rede viária e os indicadores que farão parte do Estudo de Caso e apresentar a metodologia para sua determinação, considerando os recursos disponíveis.

4.1 Seleção da Rede de Estudo

Para o estudo de caso foi adotada a rede viária representativa da Região Metropolitana do Rio de Janeiro, a partir do modelo desenvolvido durante o Plano Diretor de Transporte Urbano (PDTU, 2005a).

O modelo representativo do sistema de transporte do PDTU foi desenvolvido tendo como base um levantamento de dados e informações existentes à época além de pesquisas especificamente realizadas. Dentre as pesquisas realizadas destacam-se pesquisas de origem de destino, realizadas com base em entrevistas em 40.000 domicílios além de postos localizados no sistema viário (PDTU, 2005a).

No PDTU foi elaborada uma rede de simulação com base em sistema GIS, representativa da rede viária com aproximadamente 22.000 nós e 60.000 *links*. Para a modelagem da operação da rede foi incorporado um banco de dados com as principais características físicas e operacionais de cada ramo. A documentação dos arquivos do PDTU 2005 é deficiente, e não foi encontrada uma definição formal para os campos que compõem a tabela representativa da rede. A análise do arquivo e sua confrontação com características conhecidas, permitiram a formação de convicção do significado dos campos de interesse para a simulação de viagens por transporte individual, que são apresentados a seguir:

Quadro 4.1: 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

Sendo a rede representativa da RMRJ muito complexa e abrangente, foi selecionada uma região, ou sub-rede, como foco para o presente estudo, de forma a que a comparação entre os indicadores de desempenho pudessem ser mais bem realizada. A sub-rede é composta dos bairros: Leme, Copacabana, Ipanema, Leblon, Gávea, Jardim Botânico, Humaitá, Urca e parte de Botafogo, todos na zona sul da cidade do Rio de Janeiro. Como alguns dos indicadores exigem um número de processos diretamente proporcional ao número de *links* em análise, nesses casos o número de ligações foi limitado, de forma a permitir a análise dentro dos recursos disponíveis, tanto de tempo quanto computacionais.

A Figura 4.1 apresenta a região delimitada para o presente estudo, sub-rede da rede de simulação do PDTU 2005.

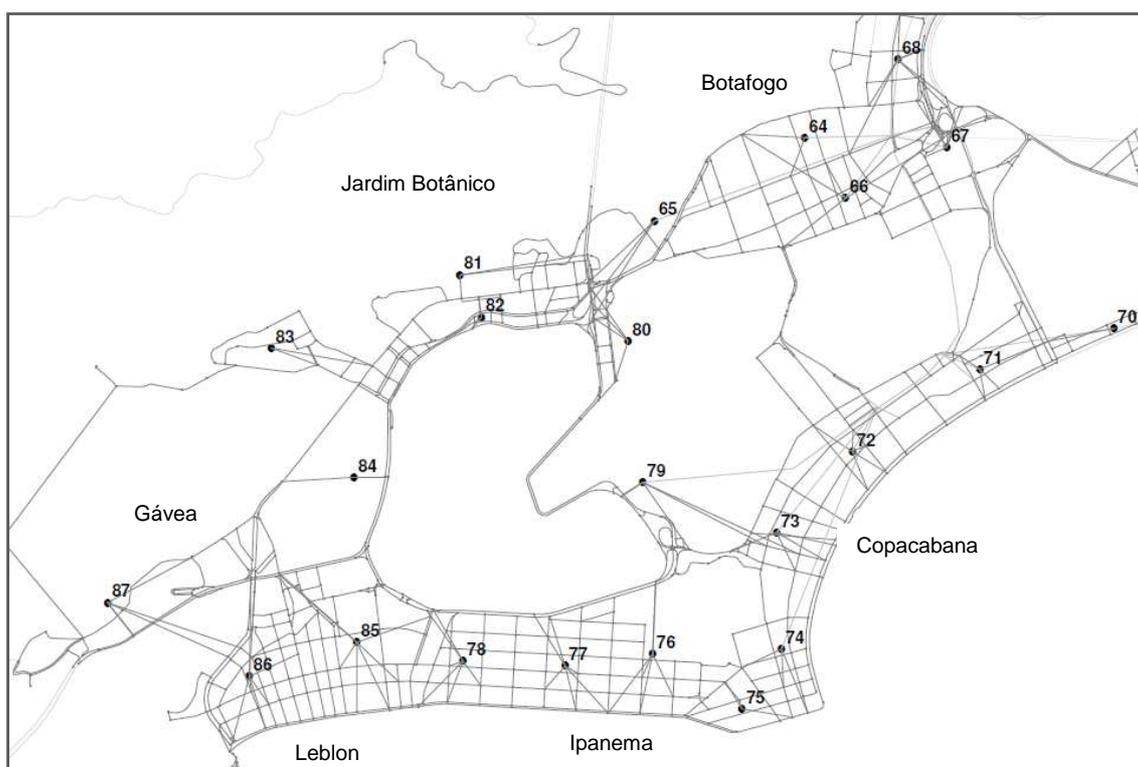


Figura 4.1: Rede de simulação para o Estudo de Caso

Os pontos numerados na Figura 4.1 são os centróides das Zonas de Tráfego, numerados de acordo com a codificação do PDTU 2005 e sua localização aproximada está relacionada no quadro 4.2.

Quadro 4.2 Zonas de Tráfego na região do estudo de caso

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 (Farmer 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)

4.2 Seleção do Software de Modelagem

Tendo em vista que o PDTU, principal fonte de informações para o presente Estudo de Caso, fez uso do TransCAD, da Caliper Corporation, como software base para a modelagem do sistema de transporte, optou-se também pela sua utilização, o que permite o aproveitamento direto dos arquivos existentes.

O TransCAD é um sistema de informações geográficas desenvolvido pela Caliper Corporation que combina as características normais de representação gráfica dos sistemas de informações geográficas com um gerenciador de base de dados.

O TransCAD incorpora as potencialidades de softwares GIS (*Geographic Information System*), podendo ser utilizado em quaisquer aplicações que requeiram mapeamento digital, análises espaciais, recuperação e manutenção de dados geográficos e, particularmente, de transporte.

Dispondo de diversas ferramentas, o software TransCAD permite a execução dos principais procedimentos adotados em planejamento de transportes, como por exemplo, a construção de modelos de rede viária, determinação de caminhos mínimos, alocação de tráfego, aliados à codificação geográfica de todos os elementos, através dos procedimentos disponíveis em rotinas *GIS*. Pela forma de tratamento dos dados, uma rede matemática no TransCAD pode ter centenas de milhares de *links* e milhares de zonas de tráfego estando limitada somente pela capacidade de processamento do computador.

Como todo *GIS*, o TRANSCAD se apóia em uma base geográfica, normalmente um mapa da região em estudo digitalizado. A este mapa digital são acrescentadas informações em camadas (*layers*), que podem ser representativas de pontos, linhas ou áreas. Uma típica camada de área é o zoneamento de tráfego; uma rede matemática para simulação necessita de pelo menos uma camada de linha (*links*) e uma camada de pontos (*nós*). A cada elemento, seja área, linha ou ponto são associadas

informações disponíveis, como viagens produzidas, custo de transporte e nomes de localidades, de forma a que sejam convenientemente acessadas diretamente em tela.

Uma das principais dificuldades de modelagem em uma rede de transporte é a situação de congestionamento. O congestionamento ocorre quando a demanda de fluxo em uma determinada via é superior à sua capacidade de escoamento, o que leva a uma situação de extrema instabilidade, com redução progressiva da velocidade e eventualmente levando ao colapso da fluidez do tráfego. Nessa condição, a velocidade média pode chegar a valores próximos a zero e o fluxo ocorre em momentos alternados de movimentação e parada.

Para a alocação de tráfego o TransCAD oferece rotinas para diversas metodologias, com tratamentos diferenciados para o caso de congestionamento. As principais metodologias são as apresentadas a seguir:

- Tudo-ou-nada – a alocação é feita considerando-se apenas uma rota, que minimiza a impedância entre um par de origem e destino; o efeito de redução da velocidade decorrente do excesso de fluxo em um *link* é desconsiderado;
- Tudo-ou-nada com restrição de capacidade – a alocação é feita de forma iterativa, com o cálculo de tempos em cada link em função da relação volume sobre capacidade sendo realizado a cada rodada. Este método não é convergente e pode alternar carregamentos em determinados links a cada iteração (SHELFI, 1985 *apud* CALIPER, 1996);
- Equilíbrio – a alocação é feita de forma iterativa de forma a convergir para uma situação em que nenhum usuário pode reduzir seu tempo de viagem trocando de rota. Este processo leva a múltiplas rotas para cada par de origem e destino. O método utilizado é normalmente o proposto por Frank e Wolf em 1956 (*apud* CALIPER, 1996);

- Equilíbrio Estocástico – a alocação é realizada tendo em mente que os usuários não têm a percepção perfeita da melhor rota e, portanto, mesmo em ausência de restrições quanto à capacidade, essa alocação é feita em múltiplas rotas. O processo leva em consideração a capacidade de cada link, em um algoritmo semelhante ao do Equilíbrio descrito anteriormente.

Todos os métodos citados envolvem um tratamento estático no processo de alocação, por vezes valendo-se de iterações para a simulação da dinâmica da decisão sobre rotas e consequente alocação de tráfego. NESTEROV e DE PALMA (2003) apontaram os problemas decorrentes dessa abordagem e propuseram o que denominaram de Dinâmica Estável (*Stable Dynamic*) para mitigar as possíveis deficiências dos modelos clássicos, notadamente o de Equilíbrio, em sua simulação dos efeitos de congestionamento.

BOVY e JANSEN (1983) realizaram investigação empírica aplicando a uma mesma região modelos com diferentes níveis de agregação de vias e utilizando para a alocação de viagens os métodos Tudo-ou-Nada e de Equilíbrio através do método Frank-Wolf. Suas principais conclusões foram: a) o refinamento da rede tem efeito relevante na qualidade da modelagem; b) a alocação pelo método de equilíbrio foi sempre significativamente superior (reflete melhor a realidade) do que o método tudo-ou-nada, ainda que o nível de congestionamento fosse pouco expressivo.

Diversos softwares de maior ou menor complexidade e preços oferecem funcionalidade compatível com o exposto anteriormente, alguns se destacando por sua maior simplicidade de uso ou popularização no meio técnico. Há um consenso em que o software de modelagem deve oferecer recursos de geo-referenciamento e, nesse aspecto, o TransCAD vem se destacando em aplicações no Brasil e no exterior. Em 2001, o Kansas City Institute of Transportation Engineers (KCITE, 2001) analisou as tendências para a modelagem de transporte nas cidades de sua região. Nessa

análise o TransCAD apareceu como a principal plataforma de simulação (implantado ou em vias de implantação), seguido pelo EMME/2 e VP+/Viper. A revisão do PDTU, ora em desenvolvimento (2012) pela Secretaria de Transportes do Estado do Rio de Janeiro, optou no entanto pela migração do modelo de simulação do TransCAD para o EMME da INRO.

As simulações realizadas no presente estudo lançaram mão do software TransCAD em sua versão 4.5 e do método de alocação por equilíbrio (*User Equilibrium*), de forma a reproduzir o ambiente de modelagem do PDTU de 2005.

Para a montagem do modelo foi obtido junto à Companhia Estadual de Engenharia de Transportes e Logística (CENTRAL) um conjunto de arquivos contendo:

- Rede viária do PDTU;
- Rotas de transporte coletivo;
- Matrizes de viagem – transporte individual para 2003, 2008 e 2013;
- Matrizes de viagem – transporte coletivo para 2003, 2008 e 2013.

Dentre os arquivos obtidos foram utilizados aqueles correspondentes à rede viária do PDTU e à matriz de viagens de transporte individual para 2003. A opção pelo matriz de 2003, deveu-se ao fato desta ser a matriz base do estudo, as demais sendo resultado de projeções.

4.3 Seleção dos Indicadores para o Estudo de Caso

Tendo em vista o objetivo do presente estudo, de comparar indicadores de desempenho para hierarquização de ligações rodoviárias em uma rede viária, e tendo em vista os recursos limitados disponíveis, foram definidos critérios para selecionar quais os indicadores analisados fariam parte do Estudo de Caso.

Os critérios de seleção foram:

- 1) O indicador deveria produzir índices, ou seja, um número que salientasse o seu grau de importância. Esses índices deveriam ser individualizados por *link* da rede de estudo, de forma a permitir a comparação e hierarquização;
- 2) Os índices deveriam ser passíveis de cálculo a partir dos resultados produzidos pelo TransCAD, software de simulação adotado para o Estudo de Caso, com base nas informações disponíveis no banco de dados do PDTU 2005;

Pelo primeiro critério, foram excluídos os indicadores:

- Índice de Robustez de Viagens em Rede (NTR) – é voltado à comparação de redes, e não de links individuais e é derivado dos indicadores NRI e NRI-m, que foram incluídos no Estudo de Caso;
- Índice de Exposição (IE) – é voltado à comparação de regiões ou grupos de nós. Poderia, no limite, ser utilizado para a comparação e hierarquização de *links* individuais. Nesse caso, entretanto, se assemelharia ao indicador II, na medida em que ambos medem o aumento médio do tempo entre pares de origem e destino face à exclusão de um *link*. Sendo assim, apenas o indicador II foi incluído no Estudo de Caso;
- Índice de Vulnerabilidade com Base em Célula (IVBC) – é voltado à avaliação de regiões ou células face a interrupção de todos os links dessa célula, não sendo indicado, em princípio, à comparação de *links* individuais.

Pelo segundo critério foram excluídos os indicadores:

- Nível de Serviço (NS) – sua determinação de acordo com a metodologia do HCM (HCM, 2000) exige um grande número de informações, não disponíveis para todos os *links* componentes da rede de estudo. Adicionalmente, sua determinação é bastante complexa, exigindo tratamento individualizado por ligação, o que excede os recursos disponíveis para o presente trabalho. O

indicador V/C, no entanto, frequentemente usado como *proxy* do nível de serviço, foi incluído no Estudo de Caso.

- Índice de Risco de Nicholson (IRN) – uma das informações exigida é a elasticidade da demanda em função da impedância entre pares de origem e destino, e que não está disponível nos dados do PDTU 2005;
- Índice de Vulnerabilidade de Erath (IVE) – o conhecimento dos custos de tempo de viagem e dos custos operacionais veiculares são informações indispensáveis para esse indicador. Se aplicado de forma simplificada, apenas com os tempos de viagem, se tornaria semelhante ao II, considerado no estudo.

Adicionalmente, como o Índice de Custo Marginal sob Congestionamento (ICMC) foi desdobrado em três índices, ICMC1, ICMC2 e ICMC3, foi selecionado apenas um deles. Os três índices medem, por métodos ligeiramente diferentes, o custo marginal sob congestionamento, ou seja, o custo adicional decorrente do acréscimo de uma unidade de fluxo em uma unidade de distância sob congestionamento. Como o próprio autor da metodologia para obtenção do índice sugere (SAFIROVA, 2007), foi selecionado para o Estudo de Caso o método 2, que produz o indicador ICMC2, considerado dentre os três como o que apresenta resultados satisfatórios com maior economia de recursos em sua determinação. Assim, os indicadores ICMC1 e ICMC3 foram também excluídos do Estudo de Caso.

Os demais indicadores analisados foram selecionados para o Estudo de Caso, quais sejam:

- Relação Volume/Capacidade (V/C);
- Índice de Congestionamento (CI);
- Índice de Robustez da Rede (NRI);
- Índice de Robustez da Rede-modificado (NRI-m);

- Índice de Importância (II);
- Índice de Custo Marginal sob Congestionamento – método 2 (ICMC2).

Quanto aos atributos, o único atributo que não é tratado diretamente pelos indicadores selecionados para o estudo de caso é correspondente ao *Risco*, que, no entanto, é considerado de forma indireta pela maioria deles (NRI, NRI-m, II e ICMC2). O *Congestionamento* é tratado diretamente pelos indicadores V/C e CI; a *Confiabilidade* pelos indicadores NRI-m e ICMC2; a *Vulnerabilidade* pelos indicadores NRI, NRI-m e II; a *Flexibilidade* pelos indicadores NRI, NRI-m, II e ICMC2.

O quadro 4.3 reproduz o quadro 3.13 apresentado anteriormente, destacando-se em cinza os indicadores selecionados para o Estudo de Caso. A classificação buscou dar maior pontuação para os indicadores que envolvessem o maior número de aspectos, atribuindo o valor 2 para o tratamento direto do aspecto; 1 para o tratamento indireto e 0 caso o aspecto não fosse considerado.

Observa-se, pelo quadro, que dentre os indicadores selecionados todos os aspectos são considerados, direta ou indiretamente. Dentre os aspectos analisados, apenas o aspecto *Risco* não é considerado de forma direta, dada a indisponibilidade de informações.

Quadro 4.3: Classificação dos Indicadores quanto aos atributos principais – com destaque para os indicadores selecionados

Atributo	Congestio- namento	Confiabi- lidade	Vulnerabi- lidade	Risco	Flexibi- lidade	Total
Indicador						
NS	2	1	0	0	0	3
V/C	2	1	0	0	0	3
CI	2	1	0	0	0	3
NRI	1	1	2	1	2	7
NRI-m	1	2	2	1	2	8
NTR	1	2	2	1	2	8
II	1	1	2	1	2	7
IE	1	1	2	1	2	7
IVBC	1	1	2	1	2	7
ICMC1	2	2	0	0	0	4
ICMC2	2	2	0	0	2	6
ICMC3	2	2	0	0	2	6
IRN	1	1	2	2	2	8
IVE	1	1	2	1	2	7

4.4 Metodologia para Determinação dos Indicadores Seleccionados

Os indicadores seleccionados exigiram procedimentos diferentes para sua determinação para o Estudo de Caso, embora todos partam de uma matriz de viagens no horário de pico e da rede viária originárias do PDTU 2005. O TransCAD foi o software principal para o tratamento das informações.

Embora a análise se restrinja à região da rede seleccionada para o presente estudo, os indicadores foram sempre determinados com base em alocações realizadas sobre a rede viária completa do PDTU, representativa da Região Metropolitana do Rio de Janeiro, com posterior filtragem dos resultados obtidos para análise dos *links* correspondentes à região do estudo.

Dentre os seis indicadores seleccionados, dois (V/C, CI) puderam ser determinados a partir de um único processo de alocação de viagens do TransCAD, e um a partir de dois processos de alocação (ICMC2), o que permitiu a determinação de índices, nesses casos, para todos os *links* da rede de estudo, em um total de 1.266 ligações.

Para os demais, que exigem alterações individualizadas em cada link foi adotada uma simplificação, de forma a viabilizar o estudo com os recursos disponíveis. Assim, optou-se pela análise de um número restrito de *links* (15) passível de ser analisado. Adotou-se a hierarquia decorrente da aplicação do indicador V/C de forma a pré-seleccionar os 15 links para um estudo comparativo. O V/C é o indicador mais comumente utilizado em estudos de tráfego para traduzir o nível de congestionamento de uma via e é calculado automaticamente pelo TransCAD durante o processo de alocação de viagens para cada *link* da rede. Posteriormente foram incorporados mais quatro *links*, de forma a permitir uma análise mais completa, conforme explicitado no capítulo 5.

A metodologia utilizada para a determinação de cada um dos indicadores é apresentada a seguir.

Relação Volume/Capacidade – V/C

A figura 4.2 apresenta esquematicamente os principais passos para a determinação dos indicadores para cada *link* da rede de estudo e sua hierarquização. É realizado um único processo de alocação para a obtenção da rede carregada. O TransCAD determina, para cada *link* da rede, a relação V/C, criando campos denominados *AB_voc* e *BA_voc*, representativos do V/C para cada sentido, além de um campo *MAX_voc* que contém o maior valor de V/C dentre os dois sentidos, e que foi considerado como índice V/C de cada *link* para efeito de hierarquização.

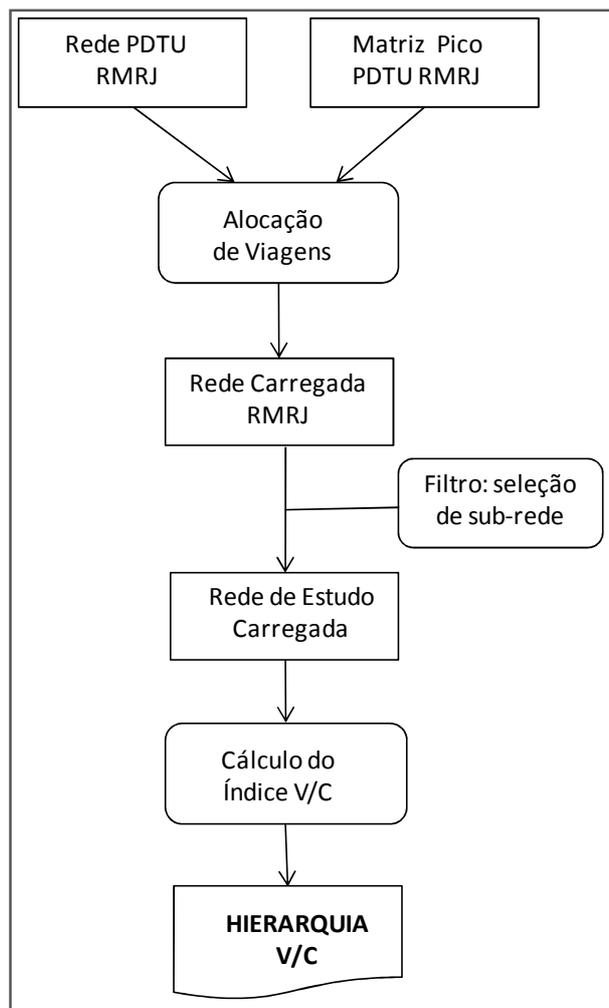


Figura 4.2: Determinação da hierarquia segundo a Relação Volume/Capacidade – V/C

Índice de Congestionamento – CI

O Índice de Congestionamento (ZHANG e LOMAX, 2007) é função do tempo em fluxo livre e do tempo congestionado em cada *link*, valores disponíveis na rede de estudo carregada, obtida conforme apresentado na figura 4.2. O campo *Tempo Livre* [minutos] da tabela representativa da rede do PDTU contem o tempo em fluxo livre por sentido e os campos *AB_Time* e *BA_Time* [minutos] da tabela resultante da alocação de viagens contem o tempo sob congestionamento, para cada *link* da rede.

Associando à formulação matemática de CI, apresentada na equação 3.2 e reapresentada na equação 4.1, temos:

$$CI = \frac{t_c}{t_f} \quad (4.1)$$

onde:

t_c = tempo estimado em condições de congestionamento, obtido de *AB_Time* e *BA_Time* [minutos];

t_f = tempo em condições de fluxo livre, obtido de *Tempo Livre* [minutos].

A figura 4.3 apresenta esquematicamente os passos para a obtenção da hierarquia com base em CI.

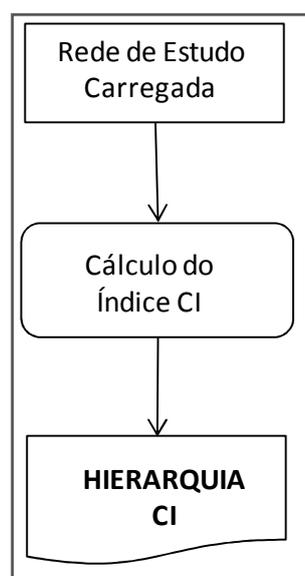


Figura 4.3: Determinação da hierarquia segundo o Índice de Congestionamento - CI

Índice de Robustez da Rede – NRI

O NRI (SCOTT *et al.*, 2006) é determinado para cada *link* através de um procedimento iterativo, onde são realizadas tantas alocações quanto os *links* a analisar. O NRI é função da diferença do total de tempo de viagem na rede com a exclusão do link sob análise e o total de tempo de viagem com a rede íntegra.

Como para a determinação do NRI é necessária uma rodada de alocação de viagens para cada link sob análise, foram selecionados 15 *links* com base na hierarquia derivada do índice V/C para a análise comparativa, e outros quatro adicionais.

O NRI é função do tempo de viagem e do fluxo de tráfego, obtidos das redes carregadas. Os campos *AB_Time* e *BA_Time* da tabela resultante da alocação de viagens contem os tempos de viagem [minutos] e os campos *AB_Flow* e *BA_Flow* contem os fluxos [UCP/h], o que permite realizar o somatório do produto tempo x fluxo para cada iteração com a exclusão de um dos links. Apesar de a formulação falar em custo do tempo de viagem, o índice pode ser calculado apenas com base no tempo, que foi o procedimento adotado neste estudo.

Associando à formulação matemática de NRI, apresentada nas equações 3.9, 3.10 e 3.11 e rerepresentada nas equações 4.2, 4.3 e 4.4 temos:

$$NRI_a = c_a - c \quad (4.2)$$

onde:

- NRI_a = Índice de Robustez da rede para o *link a* [minutos];
- c_a = tempo de viagem (em substituição a custo) em todo o sistema, após remoção do link *a* [minutos];
- c = tempo de viagem (em substituição a custo) em todo o sistema, todos os links *i* incluídos [minutos].

calculados como:

$$c_a = \sum_a t_a v_a \delta_a \quad (4.3)$$

e

$$c = \sum_a t_a v_a \quad (4.4)$$

onde:

t_a = tempo de viagem no link a , obtido em AB_Time e BA_Time [minutos] ;

v_a = volume de tráfego no link a , obtido em AB_Flow e BA_Flow [UCP/h];

δ_i = 1 se a não for o link removido; 0 caso contrário.

A figura 4.4 apresenta esquematicamente o processo de determinação do NRI.

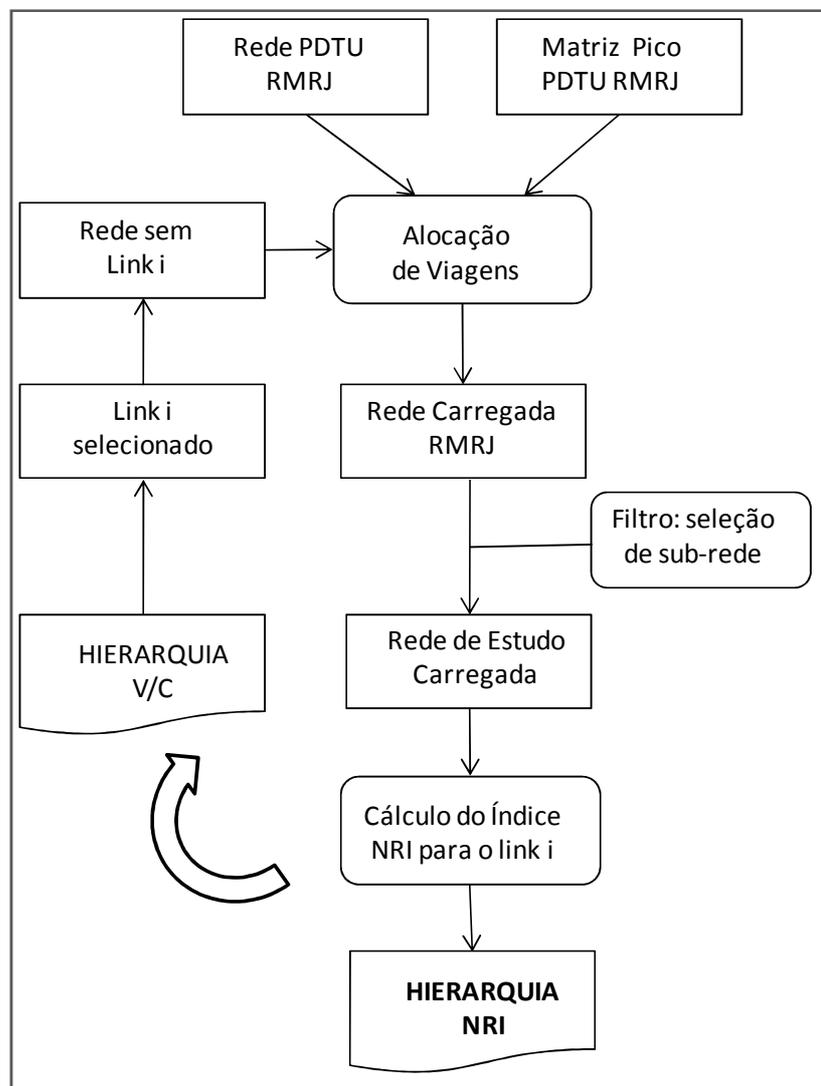


Figura 4.4: Determinação da hierarquia segundo o Índice de Robustez da Rede - NRI

Índice de Robustez da Rede-modificado – NRI-m

O NRI-m (SULLIVAN *et al.*, 2010) é determinado da mesma forma que o NRI, com a única diferença que, em lugar da completa interdição do link sob análise, é reduzida sua capacidade. No presente estudo, a redução considerada será de 77,5%, ponto médio da faixa de redução que produziu resultados mais estáveis nos experimentos realizados por Sullivan *et al.* no Condado de Chittenden, Vermont, EUA.

Da mesma forma que para determinação do NRI, o NRI-m é determinado por um processo iterativo para a determinação do índice para cada um dos *links* analisados. Foram selecionados os mesmos 19 links, compostos pelos 15 derivados da hierarquia definida com base no índice V/C e quatro adicionais. A cada iteração, o link selecionado teve sua capacidade reduzida em 77,5%, através de redução nos valores apresentados nos campos *Cap_via_AB* e *Cap_via_BA*, da tabela representativa dos dados da rede do PDTU 2005.

A figura 4.5 apresenta esquematicamente o processo de determinação do NRI-m.

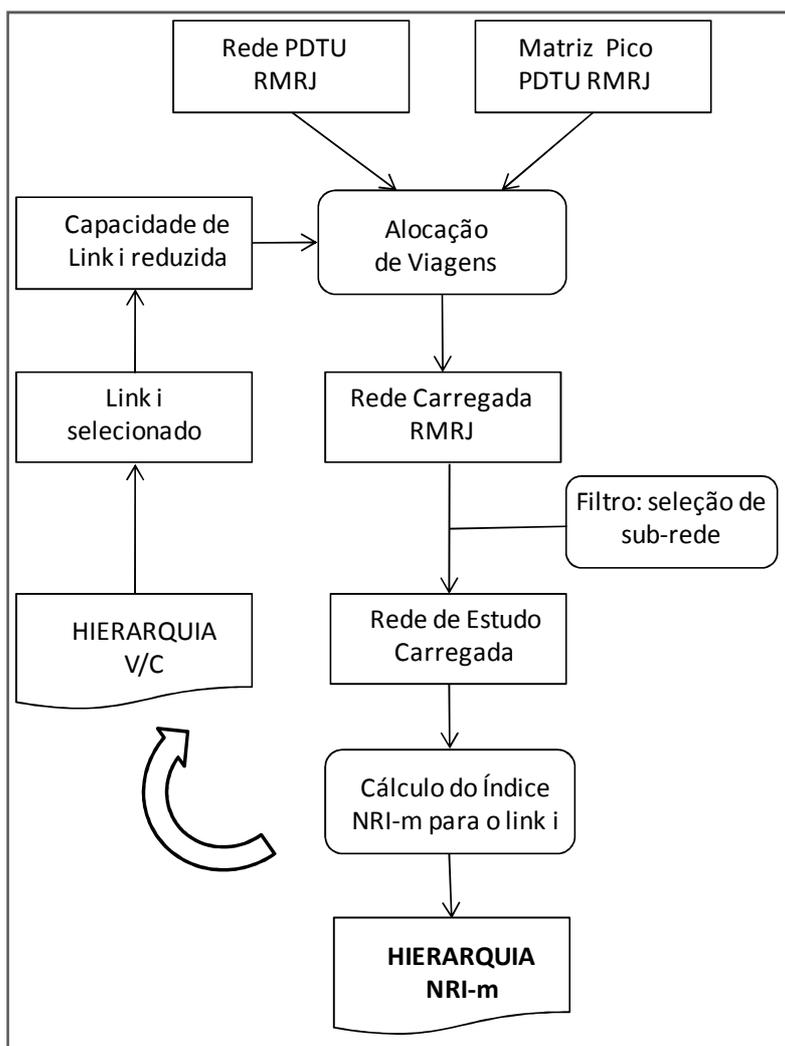


Figura 4.5: Determinação da hierarquia segundo o Índice de Robustez da Rede-modificado – NRI-m

Índice de Importância – II

O II (JENELIUS *et al.*, 2006) é determinado para cada *link* através de um procedimento iterativo, onde são realizadas tantas alocações quanto os *links* a analisar. O NRI é função da diferença do custo generalizado de transporte de viagem na rede com a exclusão do link sob análise e o total de tempo de viagem com a rede íntegra. Essa diferença é calculada através do somatório da diferença de custos mínimos por par de origem e destino, ponderada por um fator de significância do par O/D. No presente estudo foi utilizado o tempo de viagem como *proxy* do custo generalizado de transporte, simplificação necessária dada a não disponibilidade dos custos individualizados por *link*, e pelo fato de, em área urbana, o tempo de viagem

ser o principal fator de escolha de rota em viagens por modo individual. Como fator de significância foi considerada a demanda para cada par O/D, dada a correlação da demanda com o fluxo de tráfego e sua fluidez, objeto desta dissertação.

Seguindo o mesmo critério utilizado para a determinação dos índices NRI e NRI-m, sendo necessária uma rodada de alocação de viagens para a determinação do II para cada link sob análise, foram selecionados os mesmos 19 *links*.

Para a determinação dos tempos totais de viagem para cada par de origem e destino foi necessário, após cada iteração, criar uma rede matemática no padrão TransCAD incorporando os tempos de viagem finais de cada alocação. Os tempos finais de viagem são obtidos nos campos *AB_Time* e *BA_Time* [minutos]. Com base na rede matemática assim criada foi utilizada uma rotina do TransCAD para a produção de uma matriz com os tempo totais de viagem mínimos para cada par O/D.

A formulação matemática do II é apresentada na equação 4.5, reprodução da equação 3.15, específica para o caso de redes não desconectadas.

$$II(e) = \frac{\sum_i \sum_{j \neq i} w_{ij} (c_{ij}^{(e)} - c_{ij}^{(0)})}{\sum_i \sum_{j \neq i} w_{ij}}, \quad e \in E^{nd} \quad (4.5)$$

onde:

- c_{ij} = tempo (em substituição a custo) de viagem entre i e j com toda a rede funcional (0) e com o elemento e interrompido (e), obtido da matriz de tempos de viagem por par O/D [minutos];
- w_{ij} = fator de peso que reflete a significância do par Origem-Destino (OD) ij em relação aos outros pares OD (no caso, a demanda). Obtido da matriz O/D da hora de pico da manhã [UCP/h];
- $II(e)$ = índice de importância do elemento e [minutos];
- E^{nd} = conjunto dos links que não provocam a desconexão da rede.

A figura 4.6 apresenta esquematicamente o processo de determinação do II.

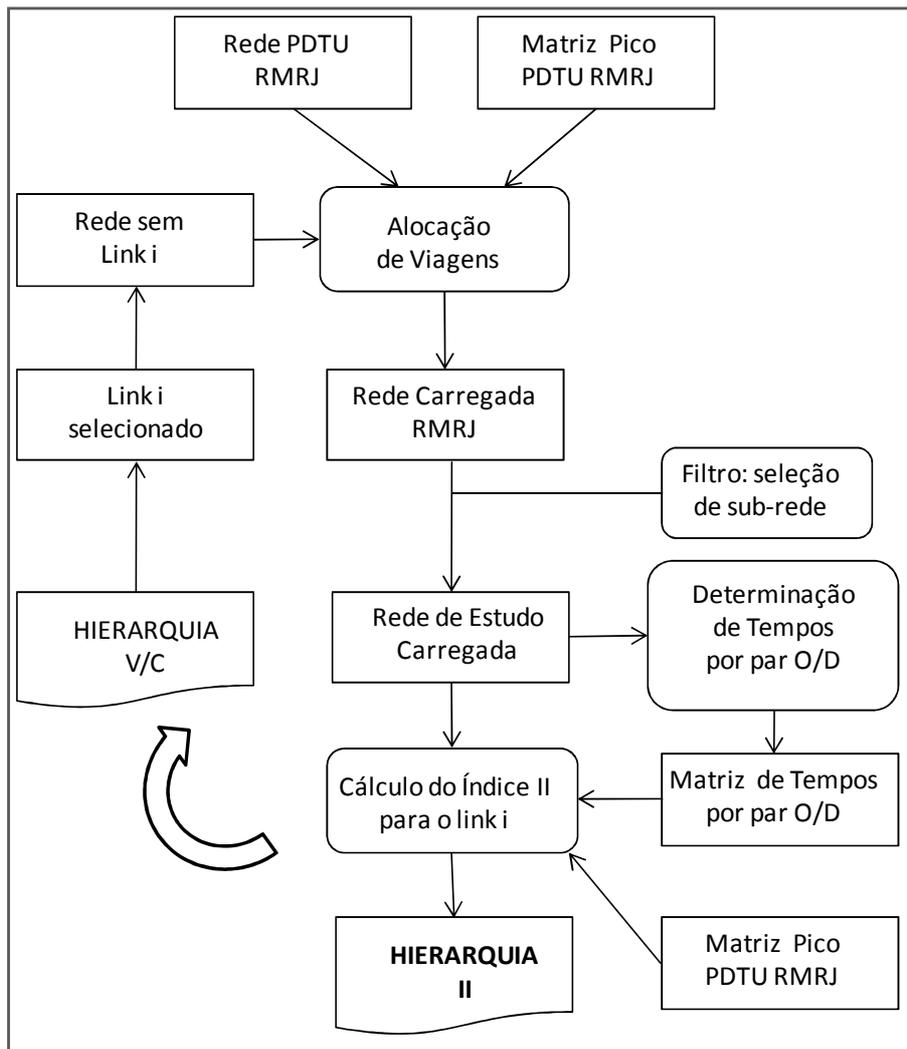


Figura 4.6: Determinação da hierarquia segundo o Índice de Importância - II

Índice de Custo Marginal sob Congestionamento – Método 2 – ICMC2

O ICMC2 (SAFIROVA *et al.*, 2007) é determinado para cada link em função do aumento marginal no custo do tempo de viagem em função de um incremento do fluxo de veículos. Dada a indisponibilidade do custo do tempo individualizado por *link*, o valor do tempo deixa de ser relevante para a hierarquia decorrente da aplicação do índice, sendo desconsiderado. Pelo método 2 proposto por Safirova *et al.*, o incremento no fluxo de veículos foi obtido pela alocação de uma matriz de viagens de pico multiplicada por um fator à rede de simulação. No presente caso a matriz teve cada uma de suas células incrementada em 1%, através da aplicação do fator 1,01. O

ICMC2 de cada link é obtido da comparação das alocações original e após o incremento na matriz de viagens.

A formulação matemática é apresentada na equação 4.6, reprodução da equação 3.23, apresentada no capítulo 3.

$$ICMC2_a = \left(\frac{1}{s_{a1}} - \frac{1}{s_{a0}} \right) \times \frac{fl_{a0} + fl_{a1}}{2} \times ct_a \times \frac{1}{fl_{a1} - fl_{a0}} \quad (4.6)$$

onde:

- s_{a0} e s_{a1} = respectivamente, velocidades inicial e final no *link a*, antes e após o aumento no fluxo, obtidas dos campos *AB_speed* e *BA_speed*, da tabela TransCAD correspondente à rede de estudo carregada [km/h];
- fl_{a0} e fl_{a1} = respectivamente, fluxo x distância inicial e final no *link a*, fluxo obtido dos campos *AB_Flow* e *BA_Flow* e distância obtida do campo *Length* da tabela TransCAD correspondente à rede de estudo carregada [UCP.km];
- ct_a = valor médio do tempo no *link a*, considerado como 1 no presente estudo [R\$/UCP.h].

A figura 4.7 apresenta esquematicamente o processo de determinação de ICMC2.

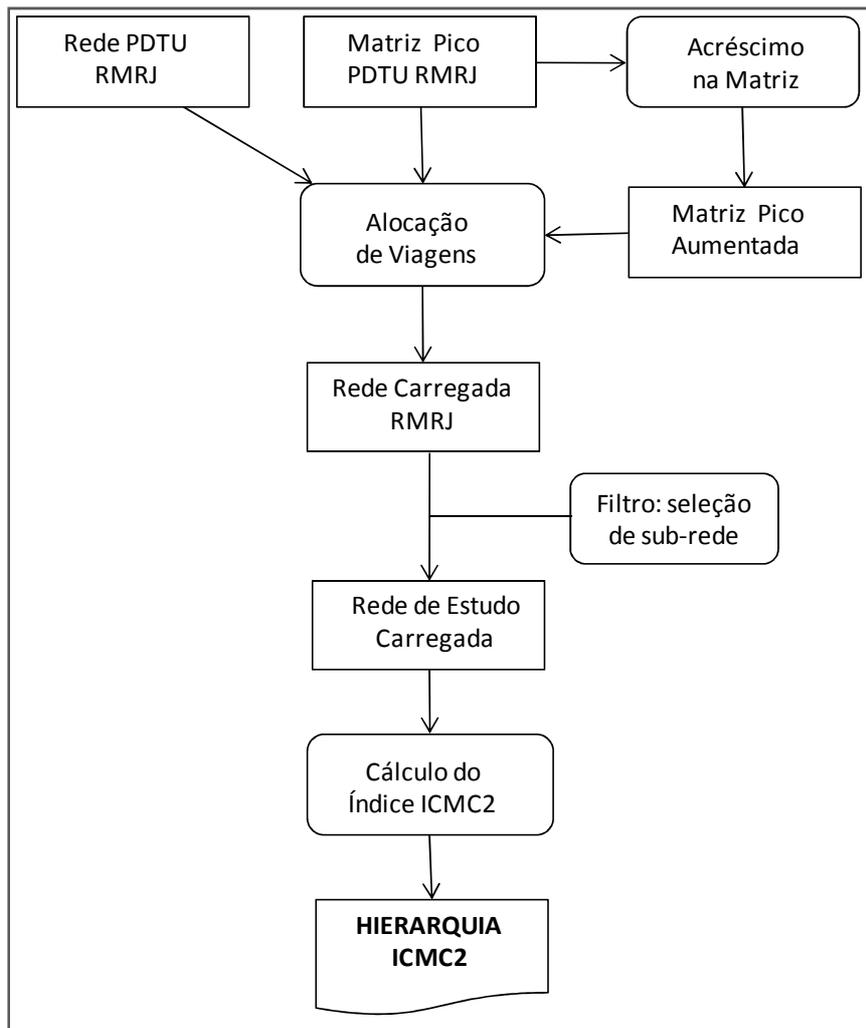


Figura 4.7: Determinação da hierarquia segundo o Índice de Custo Marginal sob Congestionamento – Método 2 – ICMC2

5 ESTUDO DE CASO

O presente capítulo trata da obtenção de hierarquias alternativas de importância de links com base nos diferentes indicadores selecionados, aplicando-se a metodologia descrita no capítulo precedente. O objetivo é verificar a aplicabilidade da metodologia e coincidência ou não das hierarquias decorrentes da utilização dos indicadores testados.

Alguns dos indicadores testados no estudo de caso buscam avaliar o desempenho da rede quando um determinado *link* se apresenta bloqueado total ou parcialmente. Nestas condições, há uma modificação nas impedâncias entre os pares de origem e destino originais, o que pode influenciar não apenas a escolha de rotas como também a própria decisão quanto ao destino da viagem ou da realização em si da viagem. Considerou-se, no presente Estudo de Caso, que a falha na infraestrutura (ligação total ou parcialmente interrompida) dura um tempo suficiente para que todos os usuários tomem conhecimento do evento e busquem um novo equilíbrio. Admitiu-se, por outro lado, que a falha é transitória, de tal forma que não há mudança de modo de transporte ou de destino. Assim, a demanda foi considerada inelástica a mudanças de destino ou de modos de transporte. Essa simplificação reduz a complexidade de processamento de dados e vem sendo utilizada por autores como ERATH *et al.* (2010).

5.1 Determinação da Matriz de Viagens para o Estudo de Caso

A Companhia Estadual de Engenharia de Transporte e Logística (CENTRAL) é o órgão responsável pela manutenção do PDTU e seu monitoramento. Foi obtido junto à esta companhia um conjunto de matrizes de origem e destino resultantes do PDTU 2005 em meio digital (PDTU, 2005d). Examinados os arquivos, foram encontradas matrizes em formato compatível com o software TransCAD, para os anos de 2003, 2008 e 2013. As matrizes são referentes ao período de pico da manhã, para o horário

entre 6:30 e 9:29 [sic] tratando em separado o transporte coletivo do individual (PDTU, 2005b). Sendo as matrizes de 2008 e 2013 resultados de projeções, foi selecionada, para o presente Estudo de Caso a matriz de 2003, transporte individual, representante da situação “atual” da época, resultado do processamento das pesquisas de campo realizadas. A matriz de O/D selecionada possui rótulo “Veículos” o que permite a dedução de que se trata do movimento de veículos, e não de pessoas.

Sendo as matrizes disponibilizadas referentes a um período de três horas e sendo necessário para o estudo uma matriz horária, decidiu-se converter a matriz do período de pico em matriz de hora de pico, mantendo-se a distribuição de viagens inalterada. Para tal buscou-se no PDTU informações sobre a hora mais carregada do pico da manhã e o fator de ocupação de veículos individuais. O Quadro 5.1 apresenta a distribuição de viagens por modo, para 2003 (PDTU, 2005a).

Quadro 5.1: Distribuição horária das viagens por modo

Hora	Não Motorizado	Motor. Individual	Motor. Coletivo	Total Geral
00:00	9.299	15.768	28.847	53.914
01:00	103.645	81.047	166.172	351.404
02:00	1.761	4.912	5.672	12.345
03:00	2.713	7.178	4.359	14.250
04:00	9.523	17.318	20.041	46.882
05:00	28.005	33.961	88.862	150.829
06:00	154.560	111.272	375.979	641.811
07:00	924.755	326.122	1.003.520	2.254.398
08:00	382.302	252.743	756.674	1.391.719
09:00	184.811	184.495	478.824	848.131
10:00	140.776	74.632	217.939	433.347
11:00	477.368	137.515	416.730	1.031.613
12:00	1.389.827	260.328	723.917	2.374.072
13:00	743.993	230.500	712.153	1.686.645
14:00	184.731	145.387	398.069	728.188
15:00	172.109	125.732	312.962	610.804
16:00	271.191	167.967	315.773	754.931
17:00	1.030.064	221.989	640.254	1.892.307
18:00	499.043	271.437	949.023	1.719.503
19:00	283.297	204.078	750.956	1.238.330
20:00	79.425	163.831	320.187	563.443
21:00	93.885	88.581	212.101	394.568
22:00	87.770	100.439	195.483	483.692
23:00	31.344	64.678	142.807	238.829
Total Geral	7.386.199	3.291.911	9.237.844	19.915.954

Fonte: PDTU(2005a)

Observa-se, no Quadro 5.1, que a hora mais carregada dentro do pico da manhã para o modo motorizado individual é o período entre 7:00 e 8:00, com 326.122 viagens. Para a conversão de viagens de pessoas para veículos, utilizou-se a taxa de ocupação

de 1,4 pessoas por veículo (PDTU, 2005c), obtendo-se 232.944 viagens (veículos) na hora mais carregada. Adicionalmente, foi necessário converter o total de veículos em unidades de carro de passeio (UCP), para o que foram utilizados os fatores recomendados por PORTO JR. (2008), que podem ser vistos no quadro 5.2. A composição do tráfego no que tange a viagens motorizadas individuais e os fatores de conversão para UCP utilizados podem ser vistos no quadro 5.3.

Quadro 5.2: Fatores de equivalência de diversos tipos de veículos em unidades de carro de passeio [UCP]

FATORES DE EQUIVALÊNCIA							
TIPO DE VEÍCULO	KORTE 1960	DENATRAN 1979	PINHEIRO 1991	MACHADO 1993	ANDRADE 1994	PORTO JR. 2008	
Bicicleta	0,25 a 0,33	0,22	-	-	-	0,2	
Motocicleta	0,50 a 0,70	0,33 a 0,50	-	0,35	0,46	0,4	
Carro de Passeio	1	1	1	1	1	1	
C A M I N H Ã O	Leve	-	1	1,5	1,39	1,36	1,4
	Médio	1,50 a 2,00	1,75 a 2,00	2,1	-	1,68	2,0
	Pesado	3,50	2,50	2,7	2,15	2,01	2,5
Bonde	2,50	2,60	-	-	-	-	
Ô N I B U S	Pequeno	-	-	1,5	-	-	1,4
	Médio	1,50 a 2,00	2,00 a 2,25	2,3	1,82	1,46 a 1,72	2,0
	Grande	-	-	3,0	-	-	2,5

Fonte: PORTO JR. (2008)

Quadro 5.3 Composição do tráfego de veículos de viagens motorizadas e fatores de conversão para UCP – ano de 2003

Veículos	Participação (%)	Fatores de Equivalência (UCP)
Automóveis	96	1
Motocicletas	3	0,4
Caminhões	1	1,4

Fontes: PDTU (2005c); PORTO JR. (2008)

Para obtenção de um fator FUCP para converter o total de viagens de veículos na hora de pico em unidades de carro de passeio, foi utilizada a equação apresentada a seguir.

$$FUCP = part_a \times feq_a + part_m \times feq_m + part_c \times feq_c \quad (5.1)$$

onde:

- $FUCP$ = fator para converter total de viagens para UCP;
- $part_a$ = participação de automóveis no total de veículos;
- $part_m$ = participação de motocicletas no total de veículos;
- $part_c$ = participação de caminhões no total de veículos;
- feq_a = fator de equivalência para automóveis [UCP];
- feq_m = fator de equivalência para motocicletas [UCP];
- feq_c = fator de equivalência para caminhões [UCP].

A aplicação da Equação 5.1 levou a um FUCP de 0,986.

A equação apresentada a seguir permite converter o total de viagens motorizadas na hora de pico para unidades de carro de passeio.

$$v_{ucp} = v_{veic} \times FUCP \quad (5.2)$$

onde:

- v_{ucp} = viagens [UCP];
- v_{veic} = viagens [veículos];
- $FUCP$ = fator de conversão para UCP.

A aplicação da Equação 5.2 levou a 229.683 viagens [UCP] por veículos de transporte individual na hora de pico em 2003.

Analisando-se o arquivo correspondente à matriz de viagens (veículos) individuais, no período de pico, 2003 (PDTU, 2005d), verificou-se um total geral de 485.056 viagens (veículos) no horário de pico, ou seja, entre 6:30 e 9:29. Para a conversão das viagens do período de pico para a hora de pico, foi utilizado um fator FHCP, calculado pela equação apresentada a seguir.

$$FHCP = \frac{v_{hp}}{v_{pp}} \quad (5.3)$$

onde:

$FHCP$ = fator de conversão para a hora de pico;

v_{hp} = viagens na hora de pico;

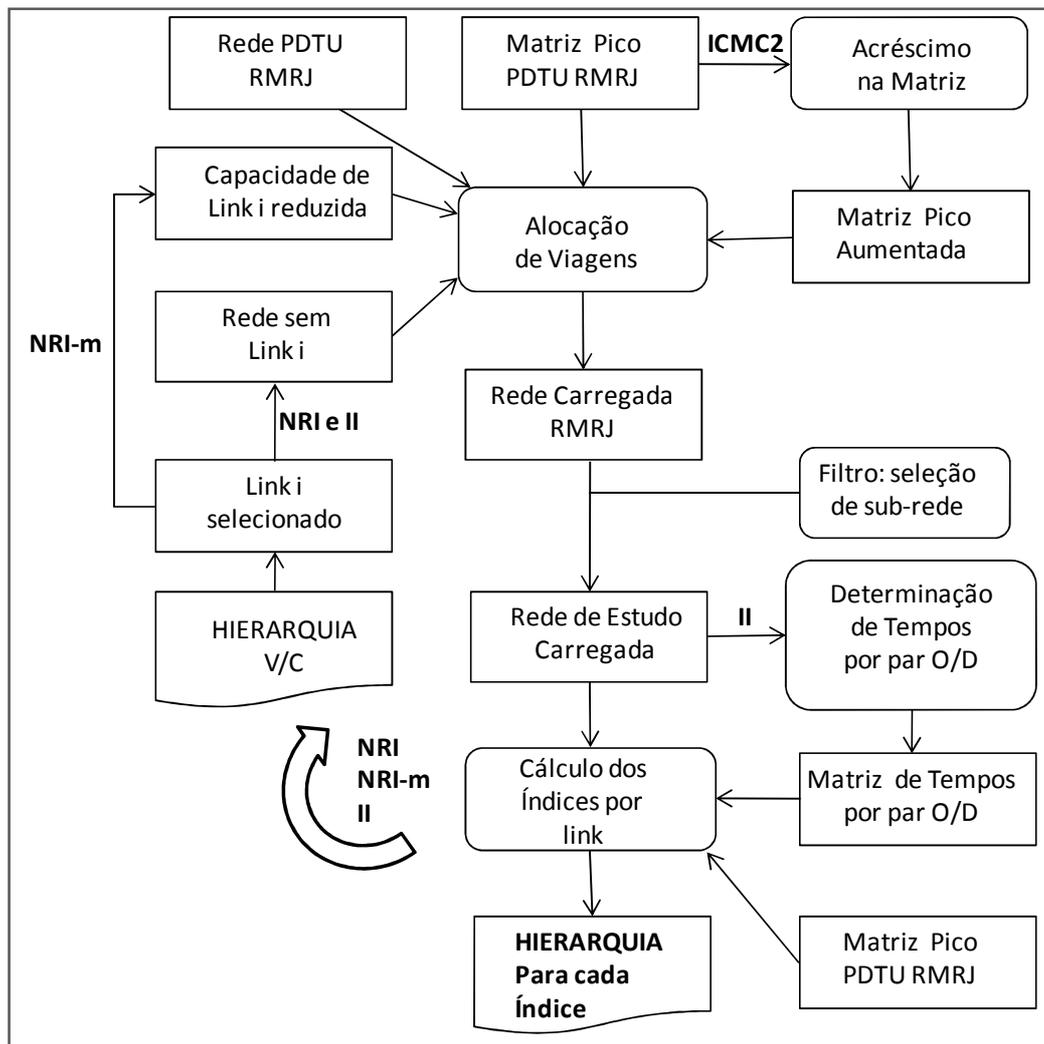
v_{pp} = viagens no período de pico.

A aplicação da Equação 5.3 levou a um $FHCP = 0,4735$. Admitindo-se que a distribuição de viagens na hora de pico fosse igual à distribuição no período de pico, chegou-se à matriz de origem e destino de veículos individuais, em UCP, através da multiplicação pelo fator FHCP, célula a célula, da matriz individual do PDTU para o ano de 2003, base para o presente estudo. A matriz resultante tem 486 linhas e colunas, com um total de 229.674 viagens, matriz de veículos em UCP usada para as alocações na hora de pico.

5.2 Metodologia de Processamento

Dados os diferentes procedimentos necessários para a determinação de cada um dos indicadores selecionados, e sendo que os procedimentos tem processos em comum, convém visualizar a metodologia de determinação dos índices em um conjunto integrado. De forma a otimizar o processamento, os elementos de cálculo para os diferentes indicadores são determinados em paralelo, com os processos compartilhados sendo executados uma única vez para todos os indicadores envolvidos. A figura 5.1 apresenta esquematicamente a determinação da hierarquia de links com apoio do software TransCAD. Na figura, as derivações do fluxo de processo

que não se aplicam à determinação de todos os indicadores apresentam a sigla dos indicadores pertinentes.



Obs: Os fluxos com denominador de índice se aplicam apenas aos índices especificados; os demais se aplicam a todos.

Figura 5.1: Fluxograma integrado para a determinação das hierarquias para os indicadores selecionados

5.3 Alocação da Matriz da Hora de Pico sobre a Rede Viária

A determinação de todos os indicadores exige uma alocação de viagens sobre a situação base. Como a rede e matrizes de viagens utilizadas no presente Estudo de Caso são originárias do PDTU, foi utilizado o mesmo método de alocação de viagens, conhecido como “Equilíbrio do Usuário” ou “*User Equilibrium*”. Para o processamento da alocação foi utilizado o mesmo software de modelagem utilizado, o TransCAD

(CALIPER, 1996), em sua versão 4.5. A rotina utilizada foi a que é acionada através da sequência de menu *Planning-Traffic Assignment*, e os parâmetros utilizados podem ser visualizados na imagem de tela apresentada na Figura 5.2. Considerou-se que a capacidade registrada no arquivo de rede do PDTU se refere exclusivamente ao transporte individual.

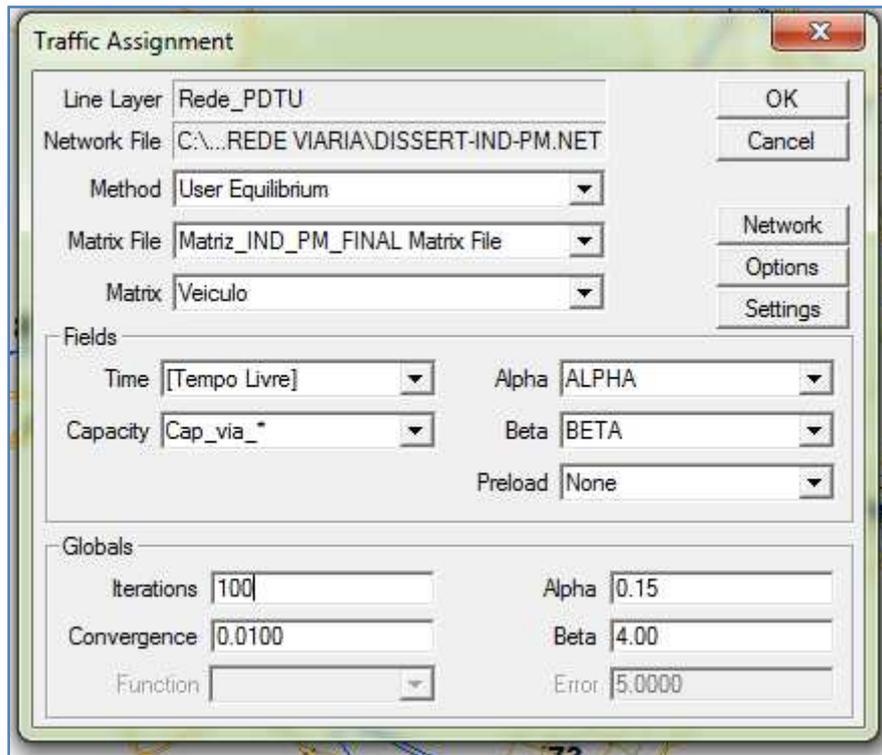


Figura 5.2: Tela com parâmetros para a alocação base no TransCAD.

“*User Equilibrium* 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.” (CALIPER, 1996).

A função utilizada pelo TransCAD para a determinação dos tempos nos *links* em função do nível de congestionamento, é a conhecida como Função BPR:

$$t = t_f \left[1 + \alpha \left(\frac{v}{c} \right)^\beta \right] \quad (5.4)$$

onde:

- t = tempo no link congestionado;
- t_f = tempo de fluxo livre;
- v = volume no link;
- c = capacidade do link;
- α, β = parâmetros de calibração.

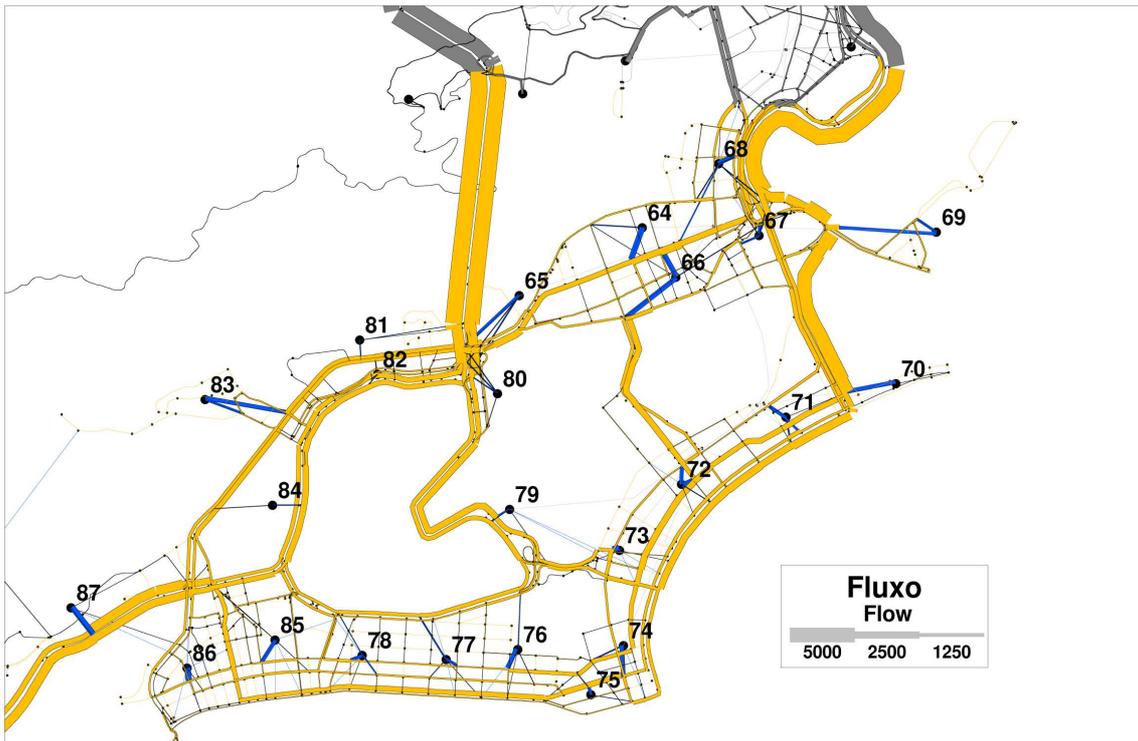


Figura 5.3: Rede carregada com matriz da hora de pico da manhã 2003, em UCP

A figura 5.3 apresenta a rede viária carregada com a matriz da hora de pico da manhã. A sub-rede de interesse do presente Estudo de Caso é apresentada em amarelo; as ligações em azul são conexões aos centróides. A espessura de cada ligação é proporcional ao fluxo de veículos de transporte individual em UCP em cada sentido.

Como resultado do processo de alocação de viagens, o TransCAD gera uma tabela de resultados para cada *link* da rede, cujos campos são identificados no quadro 5.4, a seguir, com as unidades relacionadas à aplicação de uma matriz de automóveis em uma hora de pico.

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]

5.4 Determinação dos Valores dos Índices

Para a determinação dos indicadores foi seguida a metodologia detalhada no capítulo 4 e esquematizada na figura 5.1 apresentada anteriormente. Dentre os indicadores selecionados para o estudo de caso, o V/C e o CI podem ser determinados de forma simples, a partir da alocação da matriz de pico sobre a rede de simulação e o são, para todos os 1266 links; os demais exigem processamentos adicionais.

Em se tratando de uma matriz de viagens para a hora de pico, são esperados fluxos assimétricos por sentido, o que resulta eventualmente em indicadores diferentes para cada sentido. Como se imagina que no pico da tarde o fluxo predominante se inverta, para efeito de hierarquização o valor adotado foi sempre o maior dentre os apurados para cada sentido.

A seguir são descritos os processos efetuados para a determinação dos indicadores.

5.4.1 Determinação da Relação V/C e do Índice de Congestionamento (CI)

A metodologia para determinação dos indicadores V/C e CI está descrita detalhadamente no capítulo 4, item 4.4.

Como os indicadores V/C e CI exigem um único processo de alocação da matriz de viagens à rede de simulação, foi possível a determinação desses indicadores para todos os 1266 links que compõem a sub-rede delimitada para o Estudo de Caso. O quadro 5.5 apresenta os 50 links mais congestionados segundo a relação V/C, apresentando os índices V/C e CI e seu número de ordem na hierarquia correspondente. Pode ser observado que há grande semelhança entre a ordenação decorrente da aplicação de um ou outro indicador, que se presume decorra de que ambos são diretamente relacionados ao aspecto *Congestionamento* e indiretamente ao aspecto *Confiabilidade* (ver quadro 4.2).

Quadro 5.5 Indicadores V/C e CI para os 50 links mais congestionados segundo a relação V/C.

ID	Logradouro	V/C		CI	
		Índice	Hierarquia	Índice	Hierarquia

ID	Logradouro	V/C		CI	
		Índice	Hierarquia	Índice	Hierarquia
102036	AV DAS NACOES UNIDAS	1,690	1	28,79	1
102057	AV VENCESLAU BRAZ	1,598	2	18,22	5
101752	AV LAURO SODRE	1,567	3	20,09	2
101771	AV PRINCESA ISABEL	1,567	4	19,57	4
101772	AV PRINCESA ISABEL	1,567	5	19,87	3
101117	TUN VELHO	1,502	6	14,73	14
101122	TUN VELHO	1,502	7	13,92	16
101173	TUN VELHO	1,502	8	16,17	8
101178	TUN VELHO	1,502	9	17,33	7
101183	TUN VELHO	1,502	10	15,16	10
101188	TUN VELHO	1,502	11	17,99	6
101189	R DR SAMPAIO CORREIA	1,502	12	15,20	9
101209	R REAL GRANDEZA	1,502	13	15,14	11
102061	AV VENCESLAU BRAZ	1,472	14	14,62	15
102028	R GEN SEVERIANO	1,437	15	14,91	13
101773	AV PRINCESA ISABEL	1,436	16	12,37	18
100601	R MIGUEL LEMOS	1,423	17	15,05	12
101896	AV DAS NACOES UNIDAS	1,390	18	12,12	19
102053	AV PASTEUR	1,363	19	10,24	22
102034	AV DAS NACOES UNIDAS	1,361	20	11,95	20
100758	VD SAINT HILAIRE	1,345	21	11,44	21
101789	R VOLUNTARIOS DA PATRIA	1,340	22	9,25	27
101698	AV PRINCESA ISABEL	1,321	23	9,52	25
100421	AV EPITACIO PESSOA	1,315	24	10,16	23
100740	AV EPITACIO PESSOA	1,315	25	9,53	24
100743	AV EPITACIO PESSOA	1,315	26	9,35	26
100949	R HUMAITA	1,311	27	13,16	17
101785	R VOLUNTARIOS DA PATRIA	1,302	28	9,19	28
102046	AV VENCESLAU BRAZ	1,297	29	8,35	32
100810	R PROF SALDANHA	1,283	30	7,87	35
100964	VD SAINT HILAIRE	1,283	31	7,98	34
100639	AV BORGES DE MEDEIROS	1,273	32	9,06	29
100648	AV BORGES DE MEDEIROS	1,273	33	8,76	31
100257	AV BORGES DE MEDEIROS	1,265	34	8,85	30
102058	AV PASTEUR	1,255	35	7,99	33
100889	AV EPITACIO PESSOA	1,232	36	6,52	41
100809	R JARDIM BOTANICO	1,231	37	6,77	40
99829	AV RODRIGO OTAVIO	1,195	38	6,39	43
99853	R JARDIM BOTANICO	1,172	39	5,99	47
102025	AV LAURO SODRE	1,163	40	6,98	38
99844	AV BARTOLOMEU MITRE	1,139	41	4,48	69
100750	AV BORGES DE MEDEIROS	1,118	42	6,50	42
101403	R VOLUNTARIOS DA PATRIA	1,109	43	5,40	55
100752	AV BORGES DE MEDEIROS	1,109	44	5,84	50
100754	AV BORGES DE MEDEIROS	1,109	45	6,22	45
100735	AV BORGES DE MEDEIROS	1,107	46	6,13	46
100642	AV BORGES DE MEDEIROS	1,106	47	6,24	44
101224	R GEN POLIDORO	1,106	48	7,01	37
101696	R MIN VIVEIROS DE CASTRO	1,098	49	7,29	36
100733	AV BORGES DE MEDEIROS	1,094	50	5,93	49

A figura 5.4 apresenta de forma gráfica o valor do índice V/C para cada link da rede do estudo; a figura 5.5 apresenta os valores para o índice CI. A espessura das linhas é proporcional ao índice. As características de formação do índice CI fazem com que os

links com maiores CI se destaquem na representação gráfica, tornando mais visíveis as ligações críticas quanto a este índice. Observa-se que, em sua maioria, as ligações críticas estão em corredores em que há poucas alternativas. Em ambos os indicadores, os maiores índices estão no corredor que liga as zonas 67 e 71 (parte dos bairros de Botafogo e Copacabana) e que prossegue em direção ao centro. Em seguida aparece outro corredor ligando a parte central de Copacabana a Botafogo (zonas 72 e 66). Logo a seguir vem o corredor de acesso ao Túnel Rebouças, que liga a Lagoa, Jardim Botânico e Humaitá (zonas 80, 81, 82 e 65) à zona norte da cidade, fora da área de estudo. Em comum, os três corredores têm a existência de túneis, que funcionam como ligações de sub-redes viárias mais adensadas. O afunilamento da rede viária na entrada dos túneis é provavelmente um dos fatores decisivos nos índices encontrados nesses corredores.

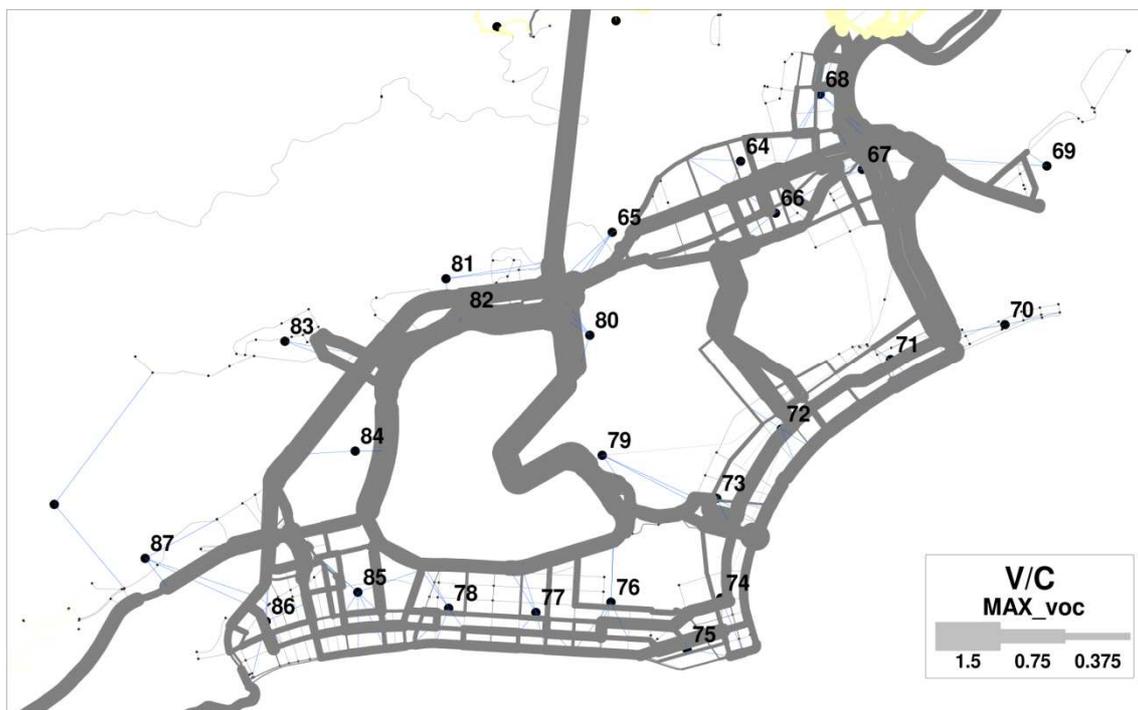


Figura 5.4: Representação gráfica do índice V/C

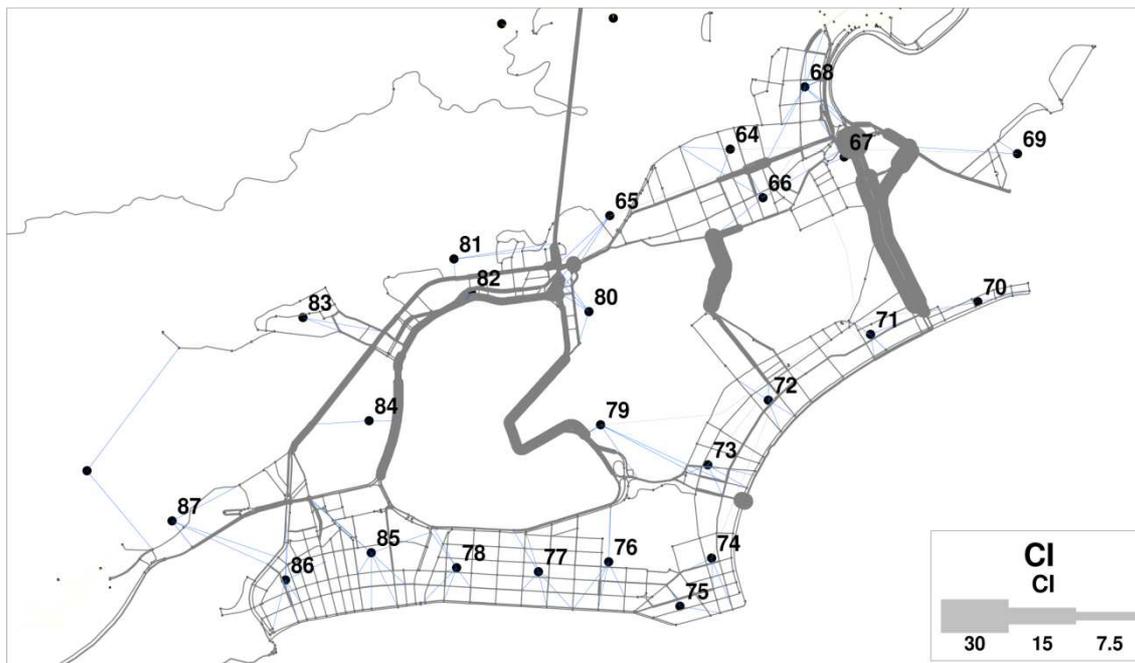


Figura 5.5: Representação gráfica do índice CI

5.4.2 Determinação do Índice ICMC2

A metodologia para determinação do indicador ICMC2 está descrita detalhadamente no capítulo 4, item 4.4.

Como pode ser visto no esquema da metodologia apresentado na figura 5.1, para a determinação do ICMC2 é necessário primeiro criar uma matriz de viagens auxiliar. Essa matriz é fruto da multiplicação célula a célula da matriz de viagens da hora de pico por um fator tão pequeno quanto se queira. No presente caso, o fator adotado foi 1,01, ou seja, foi criada uma matriz de viagens 1% maior do que a matriz original.

Em seguida foi alocada a nova matriz de viagens sobre a rede de estudo, com os mesmos parâmetros de alocação utilizados originalmente, como apresentados no item 5.3, de forma a se observar as consequências na rede da matriz de volume mais elevado.

Foi utilizado um fator de escala 100 na determinação do índice, de forma a se trabalhar com um menor número de decimais. Como o indicador ICMC2 exige apenas um processo adicional de alocação da matriz de viagens à rede de simulação, foi

possível a determinação desses indicadores para todos os 1266 links que compõem a sub-rede delimitada para o Estudo de Caso. O quadro 5.6 apresenta os 50 links mais críticos segundo o ICMC2, seu valor e número de ordem na hierarquia.

Quadro 5.6 Indicador ICMC2 para os 50 links de maior índice

ID	Logradouro	ICMC2	
		Índice	Hierarquia
101209	R REAL GRANDEZA	1919,0	1
99802	AV VISC DE ALBUQUERQUE	443,6	2
100451	AV RAINHA ELISABETH	316,2	3
102036	AV DAS NACOES UNIDAS	183,7	4
100800	R JARDIM BOTANICO	155,0	5
102028	R GEN SEVERIANO	138,3	6
100863	AV EPITACIO PESSOA	122,3	7
100862	AV EPITACIO PESSOA	122,3	8
101752	AV LAURO SODRE	115,0	9
101771	AV PRINCESA ISABEL	115,0	10
101772	AV PRINCESA ISABEL	115,0	11
101122	TUN VELHO	110,5	12
101117	TUN VELHO	110,5	13
101189	R DR SAMPAIO CORREIA	110,5	14
101183	TUN VELHO	110,5	15
101173	TUN VELHO	110,5	16
101178	TUN VELHO	110,5	17
101188	TUN VELHO	110,5	18
102057	AV VENCESLAU BRAZ	108,9	19
101695	AV PRINCESA ISABEL	91,9	20
101702	AV PRINCESA ISABEL	91,9	21
101896	AV DAS NACOES UNIDAS	88,0	22
100875	AV EPITACIO PESSOA	84,6	23
100882	AV EPITACIO PESSOA	84,6	24
102061	AV VENCESLAU BRAZ	79,8	25
101785	R VOLUNTARIOS DA PATRIA	78,3	26
102034	AV DAS NACOES UNIDAS	76,6	27
101696	R MIN VIVEIROS DE CASTRO	75,1	28
102053	AV PASTEUR	71,6	29
101773	AV PRINCESA ISABEL	69,6	30
100604	AV ATLANTICA	65,8	31
100540	AV ATLANTICA	65,8	32
100600	AV ATLANTICA	65,8	33
100740	AV EPITACIO PESSOA	60,3	34
100421	AV EPITACIO PESSOA	60,3	35
100743	AV EPITACIO PESSOA	60,3	36
101789	R VOLUNTARIOS DA PATRIA	58,5	37
101127	R SIQUEIRA CAMPOS	53,2	38
101541	R SIQUEIRA CAMPOS	53,2	39
101519	LADEIRA DOS TABAJARAS	53,2	40
101524	R SIQUEIRA CAMPOS	53,2	41
101525	R SIQUEIRA CAMPOS	53,2	42
101527	R SIQUEIRA CAMPOS	53,2	43
101698	AV PRINCESA ISABEL	51,6	44
102025	AV LAURO SODRE	50,2	45
101514	R FIGUEIREDO DE MAGALHAES	47,9	46
101506	R FIGUEIREDO DE MAGALHAES	47,9	47
101508	R FIGUEIREDO DE MAGALHAES	47,9	48
100889	AV EPITACIO PESSOA	45,9	49
101924	AV DAS NACOES UNIDAS	43,1	50

A figura 5.6 apresenta de forma gráfica, o valor do índice ICMC2 para cada link da rede do estudo. A espessura das linhas é proporcional ao índice. Como já observado na análise dos resultados obtidos a partir dos indicadores V/C e CI, em sua maioria, as ligações críticas estão em corredores em que há poucas alternativas. Surge em número 2 na hierarquia o *link* de ID 99802, cujo número de ordem segundo o V/C é 59 e segundo o CI 67. Este *link* está diretamente influenciado pelo corredor que liga a Lagoa e Gávea (zona 87) à São Conrado (fora da área de estudo). Aparece ainda em número 3 da hierarquia o *link* de ID 100451, cujo número de ordem segundo o V/C é 165 e segundo o CI 186. Este *link* liga Copacabana (zona 74) a Ipanema (zona 75) no sentido Leste-Oeste e seu destaque é provavelmente devido à sobrecarga no pico da manhã devido à inversão de mão em rua próxima que passa a operar no sentido Oeste-Leste. Os demais links de maior hierarquia pertencem aos corredores também destacados nos indicadores V/C e CI.

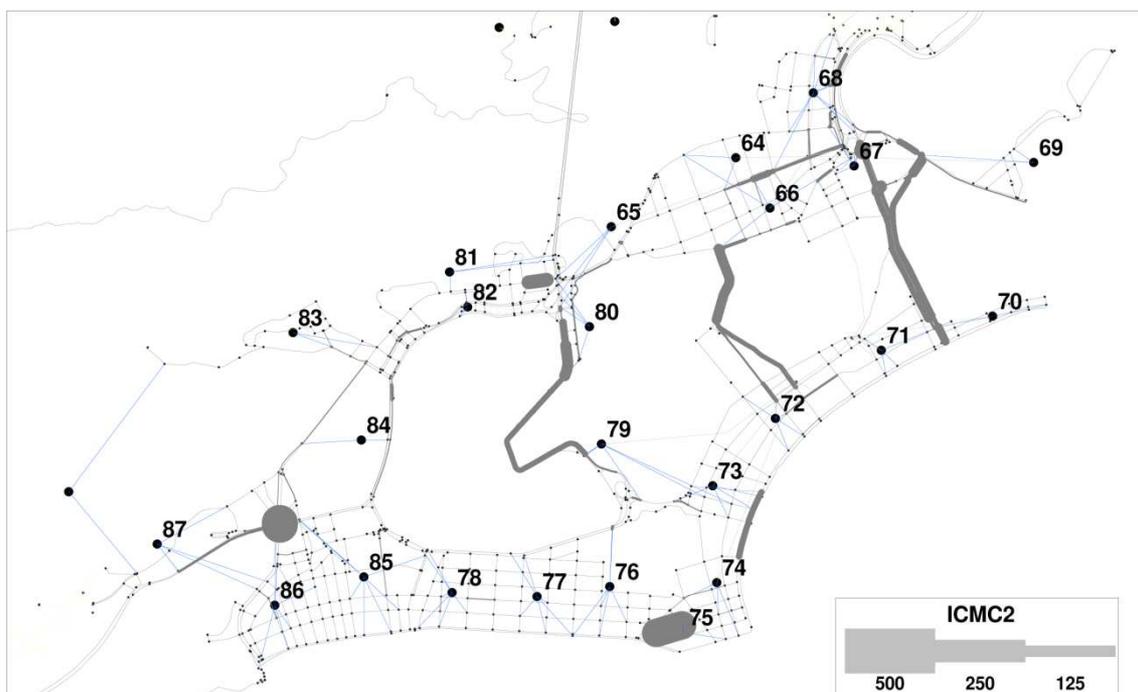


Figura 5.6: Representação gráfica do índice ICMC2

5.4.3 Seleção dos *Links* para os Demais Indicadores e para a Análise Comparativa

Os indicadores NRI, NRI-m e II exigem alterações individualizadas em cada *link* analisado, com suas determinações se dando de forma iterativa. Conforme exposto anteriormente, o critério adotado foi partir da hierarquia resultante da relação V/C, sendo selecionados 15 *links*, de forma a viabilizar a análise comparativa, face aos recursos disponíveis. Os critérios adotados para selecionar quinze links a partir da hierarquia V/C foram:

- O *link* deveria ter número de ordem entre 1 e 50;
- Os principais corredores deveriam estar representados;
- Links fortemente inter-relacionados – por exemplo, consecutivos – deveriam ser evitados;
- Atendidos os critérios acima seriam selecionados os de posição superior na hierarquia.

De forma a permitir uma análise comparativa mais ampla, aos *links* selecionados pelos critérios acima foram incluídos mais quatro. Dois por se destacarem na hierarquia do indicador ICMC2 (números de ordem 2 e 3) e os outros dois por serem *links* representativos dos sentidos mais carregados de dois túneis (Rebouças e Zuzu Angel) que conectam a região de estudo ao restante da rede de simulação. A seleção dos dois links representativos de túneis se deve à expectativa de que sejam importantes no que tange a aspectos como Vulnerabilidade e Flexibilidade, não tratados no índice V/C.

O total de *links* selecionados para a comparação entre indicadores foi assim dezenove, os quais estão apresentados no quadro 5.7. A coluna “Link” no quadro apresenta o código pelo qual os *links* selecionados serão referenciados no decorrer do estudo, preferencialmente. A figura 5.7 apresenta a rede de estudo de forma esquemática, com os *links* selecionados numerados e em destaque.

Quadro 5.7 Links selecionados para comparativo entre indicadores

ID	Link	Logradouro	Comentários
102036	1	Av. Nações Unidas	Mão invertida – sentido Sul - Norte
102057	2	Av. Venceslau Braz	Liga R. Lauro Muller à Av. Pasteur
101752	3	Av. Lauro Sodré	Mão invertida – sentido Sul - Norte
101122	4	Túnel Velho	Sentido Botafogo
101773	5	Túnel Novo	Sentido Sul – Norte
102053	6	Av. Pasteur	Sentido Sul – Norte
100758	7	Viaduto Saint Hilaire	Sentido Norte – Sul
101789	8	R. Voluntários da Pátria	Sentido Praia
100421	9	Av. Epitácio Pessoa	Sentido Botafogo / Túnel Rebouças
100639	10	Av. Borges de Medeiros	Sentido Botafogo / Túnel Rebouças
100809	11	R. Jardim Botânico	Sentido Botafogo
99829	12	Av. Rodrigo Otávio	Sentido Jardim Botânico
99853	13	R. Jardim Botânico	Sentido Botafogo
99844	14	Av. Bartolomeu Mitre	Sentido Gávea / Barra
100750	15	Av. Borges de Medeiros	Sentido Jardim Botânico / Gávea
99802	16	Av. Visc. de Albuquerque	Sentido Gávea / Barra
100451	17	Av. Rainha Elizabeth	Sentido Ipanema
101002	18	Túnel Rebouças	Sentido Norte – Sul
99472	19	Túnel Zuzu Angel	Sentido Gávea

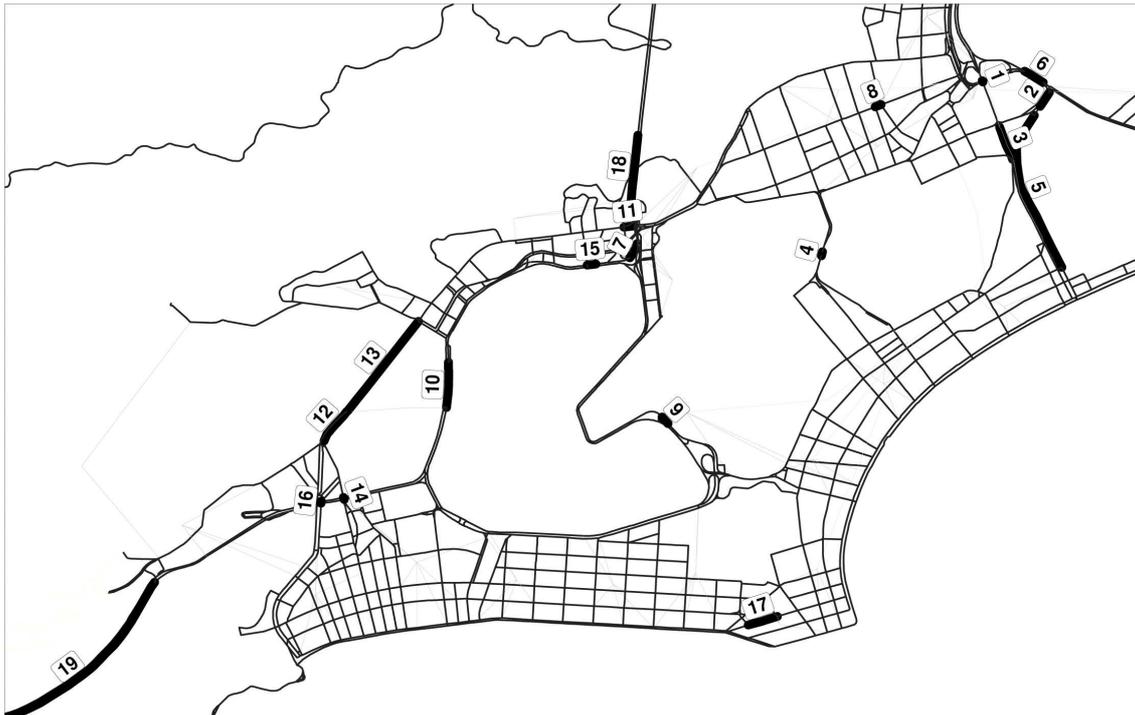


Figura 5.7: Links selecionados em destaque na rede de estudo

5.4.4 Determinação do Índice NRI

A metodologia para determinação do indicador NRI está descrita detalhadamente no capítulo 4, item 4.4.

A determinação do índice NRI depende de simulações sucessivas com a eliminação do link para o qual se deseja calcular o indicador.

O processo assim se desenvolve, para cada *link* i para o qual se deseja determinar os indicadores, segundo os passos:

- Eliminação do *link* i da rede de simulação;
- Totalização dos tempos de viagem sem o *link* i através do somatório do produto fluxo x tempo de viagem, em toda a rede de simulação;
- Determinação do NRI para o *link* i através da diferença dos somatórios de tempo nas situações com e sem o *link* i ;
- Recomposição da rede original completa.

O quadro 5.8 apresenta os links selecionados hierarquizados de acordo com o índice NRI. O valor do índice é proporcional ao acréscimo do tempo de viagem no sistema de transporte estudado em decorrência da eliminação do *link* correspondente. Sendo assim, são encontrados valores maiores para as ligações onde há maior demanda e onde as rotas alternativas são significativamente mais longas ou demoradas. Os links representativos de túneis se destacam com esse indicador, uma vez que rompem barreiras naturais que restringem as rotas alternativas. Como limitação do indicador, o isolamento de uma parte da rede não é tratado, não sendo computado esse impacto negativo. No presente estudo de caso, o link selecionado 6 (ID=102053) desconectou as saídas da zona 69 (Urca), esse efeito não sendo incorporado ao valor para o índice NRI apresentado.

A figura 5.8 apresenta graficamente o NRI com a espessura dos links numerados sendo proporcional ao índice determinado.

Quadro 5.8 Indicador NRI para os links selecionados

ID	Link	Logradouro	NRI	
			Índice	Hierarquia
101773	5	TUNEL NOVO	670603	1
102053	6	AV PASTEUR	418003	2
101002	18	TUNEL REBOUCAS	373264	3
102057	2	AV VENCESLAU BRAZ	338705	4
99472	19	TUNEL ZUZU ANGEL	199130	5
101122	4	TUNEL VELHO	186956	6
100421	9	AV EPITACIO PESSOA	169056	7
100639	10	AV BORGES DE MEDEIROS	137032	8
101752	3	AV LAURO SODRE	95179	9
99829	12	AV RODRIGO OTAVIO	87388	10
99853	13	R JARDIM BOTANICO	86481	11
101789	8	R VOLUNTARIOS DA PATRIA	54796	12
100758	7	VIADUTO SAINT HILAIRE	49557	13
100750	15	AV BORGES DE MEDEIROS	40852	14
100809	11	R JARDIM BOTANICO	19514	15
100451	17	AV RAINHA ELIZABETH	10237	16
102036	1	AV DAS NACOES UNIDAS	6560	17
99802	16	AV VISC DE ALBUQUERQUE	5294	18
99844	14	AV BARTOLOMEU MITRE	1277	19

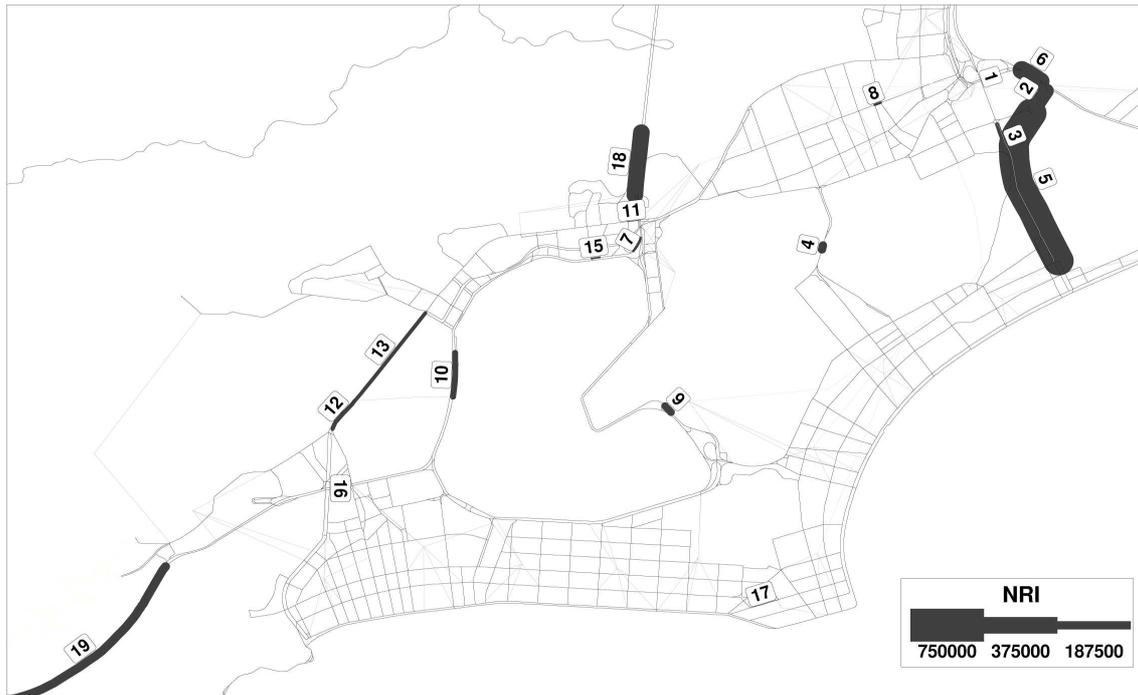


Figura 5.8: Representação gráfica do índice NRI para os *links* selecionados

5.4.5 Determinação do Índice II

A metodologia para determinação do indicador NRI está descrita detalhadamente no capítulo 4, item 4.4.

A determinação do índice II tem em comum com a determinação do índice NRI o fato de que dependem de simulações sucessivas com a eliminação do link para o qual se deseja calcular o indicador.

O processo assim se desenvolve, para cada *link* i para o qual se deseja determinar o indicador, segundo os passos:

- Eliminação do *link* i da rede de simulação;
- Totalização dos tempos de viagem sem o *link* i através do somatório do produto fluxo x tempo de viagem, em toda a rede de simulação;
- Criação de rede auxiliar i com a inclusão dos tempos de viagem por *link* resultantes da simulação sem o *link* i ;

- Montagem de matriz de tempos de viagem i por par O/D tendo como impedância os tempos de viagem resultantes da simulação sem o *link* i ;
- Recomposição da rede original completa.

Os passos seguintes para a determinação do II, são, para cada *link* selecionado:

- Criação de matriz de diferença de tempos de viagem, através da subtração célula a célula, entre matriz de tempos original por par de origem e destino e matriz de tempos após a eliminação do *link* sob análise;
- Criação de matriz com o produto célula a célula da matriz de viagens e da matriz de diferença de tempos de viagem, obtendo-se uma matriz com a diferença de tempos ponderada pela demanda por par de origem e destino;
- Determinação do índice II através da divisão do somatório das células da matriz produto pelo somatório das células da matriz de viagens, representando a média de tempo perdido em decorrência da retirada do *link* sob análise, ponderada pela demanda de cada par de origem e destino.

O quadro 5.9 apresenta os links selecionados hierarquizados de acordo com o índice II. O valor do índice é proporcional ao acréscimo médio do tempo de viagem por par de origem e destino, na rota de menor tempo, ponderado pela demanda entre cada par OD em decorrência da eliminação do *link* correspondente. Os túneis, também neste indicador, se colocam nas primeiras posições na hierarquia, com destaque para o Túnel Novo (Link 5) e seus acessos, como pode ser melhor visualizado graficamente na figura 5.9. O Túnel Zuzu Angel (Link 19), assume uma posição de destaque na hierarquia segundo o índice II, diferentemente do observado nos indicadores anteriormente analisados.

Quadro 5.9 Indicador II para os links selecionados

ID	Link	Logradouro	II	
			Índice	Hierarquia
101773	5	TUNEL NOVO	3,1641	1
99472	19	TUNEL ZUZU ANGEL	2,5398	2
102053	6	AV PASTEUR	2,1179	3
102057	2	AV VENCESLAU BRAZ	1,9846	4
100421	9	AV EPITACIO PESSOA	1,8640	5
101752	3	AV LAURO SODRE	1,3024	6
101122	4	TUNEL VELHO	1,0933	7
101789	8	R VOLUNTARIOS DA PATRIA	0,9561	8
101002	18	TUNEL REBOUCAS	0,9338	9
100639	10	AV BORGES DE MEDEIROS	0,8747	10
99853	13	R JARDIM BOTANICO	0,6491	11
99829	12	AV RODRIGO OTAVIO	0,6491	12
99802	16	AV VISC DE ALBUQUERQUE	0,6186	13
100758	7	VIADUTO SAINT HILAIRE	0,4972	14
100750	15	AV BORGES DE MEDEIROS	0,4456	15
100809	11	R JARDIM BOTANICO	0,3682	16
102036	1	AV DAS NACOES UNIDAS	0,2998	17
99844	14	AV BARTOLOMEU MITRE	0,2929	18
100451	17	AV RAINHA ELIZABETH	0,1250	19



Figura 5.9: Representação gráfica do índice II para os *links* selecionados

5.4.6 Determinação do Índice NRI-m

A metodologia para determinação do indicador NRI-m está descrita detalhadamente no capítulo 4, item 4.4.

A determinação dos índices NRI-m é semelhante à determinação do índice NRI. Ambos têm em comum o fato de que dependem de simulações sucessivas com modificações no *link* para o qual se deseja calcular o indicador. Enquanto que para a determinação do NRI o *link* em questão é totalmente interditado, para a determinação do NRI-m a interdição é parcial, simulada através da redução da capacidade.

O processo assim se desenvolve, para cada *link* *i* para o qual se deseja determinar os indicadores, segundo os passos:

- Redução em 77,5% da capacidade do *link* *i*;
- Totalização dos tempos de viagem com o *link* *i* parcialmente interditado através do somatório do produto fluxo x tempo de viagem, em toda a rede de simulação;
- Determinação do NRI-m para o *link* *i* através da diferença dos somatórios de tempo nas situações com e sem a redução de capacidade no *link* *i*.

O quadro 5.10 apresenta os links selecionados hierarquizados de acordo com o índice NRI-m. À semelhança dos indicadores NRI e II analisados anteriormente os links representativos de túneis se destacam, com o Túnel Novo (link 5) e seus acessos se destacando de forma expressiva sobre as demais ligações. Note-se que o índice não deveria ser nunca negativo, já que a redução de capacidade em um link não deveria ter como resultado uma melhoria de desempenho do sistema. A presença de números negativos provavelmente reflete imprecisão no processo de alocação, possivelmente em virtude do parâmetro de convergência adotado para dar a alocação como concluída. Uma outra explicação possível seria uma falha no algoritmo de alocação do software TransCad. Admitindo a hipótese de imprecisão, os números negativos

refletiriam a pouca sensibilidade do sistema à redução de capacidade nos *links* respectivos.

A figura 5.10 apresenta graficamente o NRI-m com a espessura dos links numerados sendo proporcional ao índice determinado.

Quadro 5.10 Indicador NRI-m para os links selecionados

ID	Link	Logradouro	NRI-m	
			Índice	Hierarquia
101773	5	TUNEL NOVO	395809	1
102057	2	AV VENCESLAU BRAZ	331646	2
102053	6	AV PASTEUR	191162	3
101002	18	TUNEL REBOUCAS	95553	4
100639	10	AV BORGES DE MEDEIROS	81747	5
101122	4	TUNEL VELHO	72171	6
100421	9	AV EPITACIO PESSOA	62085	7
99853	13	R JARDIM BOTANICO	58622	8
101752	3	AV LAURO SODRE	53189	9
99829	12	AV RODRIGO OTAVIO	46398	10
99472	19	TUNEL ZUZU ANGEL	42918	11
100758	7	VIADUTO SAINT HILAIRE	25458	12
101789	8	R VOLUNTARIOS DA PATRIA	14771	13
100750	15	AV BORGES DE MEDEIROS	11918	14
100809	11	R JARDIM BOTANICO	6939	15
100451	17	AV RAINHA ELIZABETH	5341	16
102036	1	AV DAS NACOES UNIDAS	-1116	17
99802	16	AV VISC DE ALBUQUERQUE	-3076	18
99844	14	AV BARTOLOMEU MITRE	-3099	19



Figura 5.10: Representação gráfica do índice NRI-m para os *links* selecionados

5.5 Conclusões do Estudo de Caso

O objetivos principais do Estudo de Caso foram alcançados. Verificou-se ser possível a determinação dos indicadores selecionados, com os recursos disponíveis. Foi possível ainda a comparação dos resultados obtidos, para *links* selecionados. A seleção criteriosa dos *links* permitiu obter hierarquias diferenciadas, função de cada indicador testado. Foi possível ainda observar, de uma forma preliminar, que as diferenças entre as hierarquias propostas pelos diferentes indicadores sugere uma correlação com os aspectos focados pelas diferentes metodologias. O quadro 5.11 sumariza os indicadores determinados no estudo de caso e os diferentes atributos tratados.

O quadro 5.12 permite a observação lado a lado dos resultados obtidos no Estudo de Caso, sendo apresentados, para cada indicador, o valor do índice e a posição na hierarquia correspondente. O quadro apresenta apenas os dezenove links para os quais se determinou os seis indicadores selecionados, com a posição na hierarquia se referenciando às dezenove posições possíveis.

O quadro 5.13 apresenta, também lado a lado, os resultados obtidos para cada indicador, com um código de cores associado ao valor de cada índice. Quanto mais vermelho maior o índice e quanto mais verde menor, com o amarelo sendo adotado para os valores próximos da média. Para a confecção do quadro foi utilizada função do Excel, que permite uma coloração tricolor distribuída uniformemente entre um intervalo de valores, no caso, os valores máximo e mínimo de cada indicador.

Quadro 5.11: Classificação dos Indicadores quanto aos atributos principais – Indicadores do Estudo de Caso

Aspecto	Congestio- namento	Confiabi- lidade	Vulnerabi- lidade	Risco	Flexibi- lidade	Total
Indicador						
V/C	2	1	0	0	0	3
CI	2	1	0	0	0	3
NRI	1	1	2	1	2	7
NRI-m	1	2	2	1	2	8
II	1	1	2	1	2	7
ICMC2	2	2	0	0	2	6

Pontos em cada célula: 0 = aspecto não tratado; 1 = tratado indiretamente; 2 = tratado diretamente.

Quadro 5.12 Indicadores e posições hierárquicas correspondentes

ID	Link	Logradouro	V/C	Hier.	CI	Hier.	NRI	Hier.	NRI-m	Hier.	II	Hier.	ICMC2	Hier.
102036	1	AV DAS NACOES UNIDAS	1,69	1	28,79	1	6560	17	-1116	17	0,30	17	183,67	3
102057	2	AV VENCESLAU BRAZ	1,60	2	18,22	3	338705	4	331646	2	1,98	4	108,87	6
101752	3	AV LAURO SODRE	1,57	3	20,09	2	95179	9	53189	9	1,30	6	115,04	4
101122	4	TUNEL VELHO	1,50	4	13,92	4	186956	6	72171	6	1,09	7	110,46	5
101773	5	TUNEL NOVO	1,44	5	12,37	5	670603	1	395809	1	3,16	1	69,60	8
102053	6	AV PASTEUR	1,36	6	10,24	7	418003	2	191162	3	2,12	3	71,61	7
100758	7	VIADUTO SAINT HILAIRE	1,35	7	11,44	6	49557	13	25458	12	0,50	14	0,00	18
101789	8	R VOLUNTARIOS DA PATRIA	1,34	8	9,25	9	54796	12	14771	13	0,96	8	58,53	10
100421	9	AV EPITACIO PESSOA	1,32	9	10,16	8	169056	7	62085	7	1,86	5	60,28	9
100639	10	AV BORGES DE MEDEIROS	1,27	10	9,06	10	137032	8	81747	5	0,87	10	12,08	12
100809	11	R JARDIM BOTANICO	1,23	11	6,77	11	19514	15	6939	15	0,37	16	0,03	16
99829	12	AV RODRIGO OTAVIO	1,19	12	6,39	13	87388	10	46398	10	0,65	12	0,00	17
99853	13	R JARDIM BOTANICO	1,17	13	5,99	14	86481	11	58622	8	0,65	11	9,96	13
99844	14	AV BARTOLOMEU MITRE	1,14	14	4,48	16	1277	19	-3099	19	0,29	18	15,59	11
100750	15	AV BORGES DE MEDEIROS	1,12	15	6,50	12	40852	14	11918	14	0,45	15	0,00	19
99802	16	AV VISC DE ALBUQUERQUE	1,09	16	4,62	15	5294	18	-3076	18	0,62	13	443,59	1
101002	18	TUNEL REBOUCAS	0,93	17	2,14	18	373264	3	95553	4	0,93	9	5,93	14
100451	17	AV RAINHA ELIZABETH	0,79	18	2,21	17	10237	16	5341	16	0,13	19	316,19	2
99472	19	TUNEL ZUZU ANGEL	0,76	19	1,56	19	199130	5	42918	11	2,54	2	0,05	15

Quadro 5.13 Indicadores por código de cores ordenados por V/C

ID	Link	Logradouro	V/C	CI	NRI	NRI-m	II	ICMC2
102036	1	AV DAS NACOES UNIDAS	1,69	28,79	6560	-1116	0,30	183,67
102057	2	AV VENCESLAU BRAZ	1,60	18,22	338705	331646	1,98	108,87
101752	3	AV LAURO SODRE	1,57	20,09	95179	53189	1,30	115,04
101122	4	TUNEL VELHO	1,50	13,92	186956	72171	1,09	110,46
101773	5	TUNEL NOVO	1,44	12,37	670603	395809	3,16	69,60
102053	6	AV PASTEUR	1,36	10,24	418003	191162	2,12	71,61
100758	7	VIADUTO SAINT HILAIRE	1,35	11,44	49557	25458	0,50	0,00
101789	8	R VOLUNTARIOS DA PATRIA	1,34	9,25	54796	14771	0,96	58,53
100421	9	AV EPITACIO PESSOA	1,32	10,16	169056	62085	1,86	60,28
100639	10	AV BORGES DE MEDEIROS	1,27	9,06	137032	81747	0,87	12,08
100809	11	R JARDIM BOTANICO	1,23	6,77	19514	6939	0,37	0,03
99829	12	AV RODRIGO OTAVIO	1,19	6,39	87388	46398	0,65	0,00
99853	13	R JARDIM BOTANICO	1,17	5,99	86481	58622	0,65	9,96
99844	14	AV BARTOLOMEU MITRE	1,14	4,48	1277	-3099	0,29	15,59
100750	15	AV BORGES DE MEDEIROS	1,12	6,50	40852	11918	0,45	0,00
99802	16	AV VISC DE ALBUQUERQUE	1,09	4,62	5294	-3076	0,62	443,59
101002	18	TUNEL REBOUCAS	0,93	2,14	373264	95553	0,93	5,93
100451	17	AV RAINHA ELIZABETH	0,79	2,21	10237	5341	0,13	316,19
99472	19	TUNEL ZUZU ANGEL	0,76	1,56	199130	42918	2,54	0,05

Pelos quadros apresentados, particularmente o de código de cores, percebe-se a possibilidade de agrupamento dos índices em três grupos, por semelhança de resultados relativos, e que coincidem com a classificação que pode ser vista no quadro 5.11:

- Grupo 1 – V/C e CI – apresentam pequenas diferenças de hierarquia. São indicadores diretamente associados ao aspecto *Congestionamento* e indiretamente ao aspecto *Confiabilidade*. Sob o aspecto de *Abrangência*, ambos são indicadores que tratam os *links* de forma isolada.
- Grupo 2 – NRI, NRI-m e II – pelo quadro de cores pode-se perceber que não há divergências importantes, não se observando, para um mesmo link, cores alaranjadas ou vermelhas em um dos indicadores com verde para qualquer dos outros do mesmo grupo. Os três indicadores são associados diretamente aos aspectos *Vulnerabilidade* e *Flexibilidade* e indiretamente aos aspectos

Confiabilidade e Risco. Quanto à *Abrangência*, são indicadores que buscam verificar a importância do *link* em relação ao desempenho da rede.

- Grupo 3 – ICMC2 – indicador diretamente associado aos aspectos de *Congestionamento e Flexibilidade* apresenta uma hierarquia mais próxima à obtida pelos indicadores do Grupo 1, porém com diferenças relevantes, como, por exemplo, seu *link* mais crítico (Link 16) apresentado nas últimas posições dos indicadores V/C e CI. Quanto à *Abrangência* o indicador leva em consideração a inserção do *link* na rede viária.

O quadro 5.14, apresentado a seguir, apresenta o quadro comparativo de indicadores, por código de cores, ordenado pelo indicador NRI, do grupo 2, que abrange múltiplos aspectos de desempenho.

Quadro 5.14 Indicadores por código de cores ordenados por NRI

ID	Link	Logradouro	V/C	CI	NRI	NRI-m	II	ICMC2
101773	5	TUNEL NOVO	1,44	12,37	670603	395809	3,16	69,60
102053	6	AV PASTEUR	1,36	10,24	418003	191162	2,12	71,61
101002	18	TUNEL REBOUCAS	0,93	2,14	373264	95553	0,93	5,93
102057	2	AV VENCESLAU BRAZ	1,60	18,22	338705	331646	1,98	108,87
99472	19	TUNEL ZUZU ANGEL	0,76	1,56	199130	42918	2,54	0,05
101122	4	TUNEL VELHO	1,50	13,92	186956	72171	1,09	110,46
100421	9	AV EPITACIO PESSOA	1,32	10,16	169056	62085	1,86	60,28
100639	10	AV BORGES DE MEDEIROS	1,27	9,06	137032	81747	0,87	12,08
101752	3	AV LAURO SODRE	1,57	20,09	95179	53189	1,30	115,04
99829	12	AV RODRIGO OTAVIO	1,19	6,39	87388	46398	0,65	0,00
99853	13	R JARDIM BOTANICO	1,17	5,99	86481	58622	0,65	9,96
101789	8	R VOLUNTARIOS DA PATRIA	1,34	9,25	54796	14771	0,96	58,53
100758	7	VIADUTO SAINT HILAIRE	1,35	11,44	49557	25458	0,50	0,00
100750	15	AV BORGES DE MEDEIROS	1,12	6,50	40852	11918	0,45	0,00
100809	11	R JARDIM BOTANICO	1,23	6,77	19514	6939	0,37	0,03
100451	17	AV RAINHA ELIZABETH	0,79	2,21	10237	5341	0,13	316,19
102036	1	AV DAS NACOES UNIDAS	1,69	28,79	6560	-1116	0,30	183,67
99802	16	AV VISC DE ALBUQUERQUE	1,09	4,62	5294	-3076	0,62	443,59
99844	14	AV BARTOLOMEU MITRE	1,14	4,48	1277	-3099	0,29	15,59

A análise do quadro 5.14 mostra nas primeiras posições da hierarquia, segundo o NRI, os links representativos de túneis, o que mostra a importância desse tipo de *link* para o desempenho da rede viária no que tange aos aspectos de *Vulnerabilidade e Flexibilidade*, e ainda *Confiabilidade e Risco*. A situação se reproduz nos demais indicadores do Grupo 2, notadamente no NRI-m.

O Estudo de Caso confirma assim a correlação entre o foco da análise e a hierarquia obtida, com indicadores diferentes fornecendo prioridades distintas em função dos aspectos por eles considerados. Para uma hierarquização de investimentos, os indicadores do Grupo 2 são os mais recomendáveis, pela sua consideração da contextualização dos links na rede viária e por considerarem direta ou indiretamente todos os atributos de desempenho de rede.

Limitações do presente Estudo de Caso

A complexidade da rede base para o estudo de caso, com cerca de 60.000 links e 22.000 nós, representativa da Região Metropolitana do Rio de Janeiro permitiu um estudo de caso representativo de uma rede viária urbana igualmente complexa. A necessidade de compatibilizar os recursos disponíveis com os objetivos da presente pesquisa levou, no entanto, a restringir a análise a uma região da cidade do Rio de Janeiro.

- Aceitou-se os dados obtidos a partir do PDTU, como um modelo calibrado. O único ajuste realizado foi a adequação da matriz de viagens à hora de pico;
- A não disponibilidade de custos de tempo associados aos links não permitiu testar a influência desse parâmetro nos indicadores selecionados;
- A limitação de recursos de tempo, capacidade computacional e de equipe, levou à uma comparação restrita a 19 links selecionados.

As limitações citadas, no entanto, não comprometeram o objetivo da pesquisa, sendo possível a comparação entre diferentes indicadores e a obtenção de hierarquias que refletem a influência dos atributos tratados por cada um dos indicadores.

6 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

6.1 Conclusões

A ineficiência da rede de transportes urbanos se deve a diversos fatores, tendo se observado que os investimentos em infra-estrutura viária tem sido insuficientes para a manutenção do nível de desempenho do sistema de transporte. A falta de um planejamento de transportes eficiente contribui para a má utilização dos recursos disponíveis. Uma das formas de melhor direcionar os investimentos no setor de transporte é a realização de planos diretores, apoiados em indicadores. Indicadores objetivos facilitam o diagnóstico dos problemas de transporte e permitem a hierarquização de segmentos ou setores críticos da rede viária, sugerindo uma prioridade na solução dos problemas identificados.

A presente dissertação teve como foco a análise de indicadores de desempenho relacionados à fluidez do tráfego rodoviário. Para tal foram levantados os principais indicadores encontrados na literatura, analisadas suas funções e verificada sua aplicabilidade a uma situação real, apresentada em um estudo de caso.

A análise dos indicadores ensejou a identificação de atributos e aspectos que serviram como base para a comparação dos diferentes indicadores. O aspecto *Abrangência* se refere à dimensão espacial considerada pelo indicador, que pode ser restrita ao *link*, ligada à região na qual o *link* se insere ou à rede viária em sua totalidade. O atributo *Congestionamento* diz respeito à forma com que o congestionamento é tratado por cada indicador, sendo este o sintoma mais visível do mau desempenho da rede viária. O atributo *Confiabilidade* se relaciona à confiança que se pode ter no desempenho satisfatório da rede, principalmente no que diz respeito à previsibilidade do tempo de viagem. O atributo *Vulnerabilidade* se relaciona com o grau de dependência do desempenho da rede de transporte ao desempenho de *links* específicos. O atributo *Risco* é semelhante ao aspecto *Vulnerabilidade*, com a inclusão em sua avaliação da

probabilidade de ocorrência de eventos disruptivos e suas conseqüências, como já destacaram NICHOLSON (2003) e BERDICA (2002). O atributo *Flexibilidade* está associado à facilidade de adaptação da demanda a rotas alternativas de forma a manter o nível de desempenho da rede. De forma simplificada, foi considerado um aspecto adicional para cada indicador representando o grau de dificuldade, ou nível de custo de sua determinação, aí incluído o tempo envolvido no processo.

Para confirmar sua aplicabilidade à realidade local, foi realizado Estudo de Caso com base no modelo desenvolvido para o Plano Diretor Rodoviário da Região Metropolitana do Rio de Janeiro (PDTU, 2005a). Dos 14 indicadores analisados, seis foram selecionados para o Estudo de Caso, com base principalmente nas características da região, nas informações existentes e nos recursos disponíveis para sua execução. O Estudo de Caso confirmou a importância dos aspectos tratados por cada indicador, com influência direta na hierarquia apresentada.

Os resultados das análises realizadas e do Estudo de Caso permitem concluir que diferentes indicadores podem ser utilizados de acordo com o foco do diagnóstico a ser obtido. Indicadores como a Relação V/C (HCM, 2000) e o Índice de Congestionamento (CI) (ZHANG e LOMAX, 2007), que analisam individualmente um *link* apenas em função dos aspectos *Congestionamento* e *Confiabilidade*, permitem identificar problemas localizados ligados a fluidez do tráfego. Como não analisam a contextualização na rede viária, podem inadvertidamente levar a investimentos de ampliação da capacidade viária que venham a se revelar infrutíferos. No entanto, podem sugerir um programa de substituição de transporte individual por transporte coletivo, que terá sempre um resultado positivo, aliviando a pressão sobre as ligações congestionadas pelo excesso de automóveis. O indicador Nível de Serviço (NS) (HCM, 2000), comumente determinado em estudos de tráfego, envolve os mesmos aspectos tratados pelos indicadores V/C e CI, e, embora não tenha sido parte do estudo de caso, espera-se hierarquia semelhante às obtidas a partir dos indicadores citados.

Indicadores que contextualizam os *links* na rede que os contem (aspecto *Abrangência*) tendem a produzir hierarquias mais confiáveis para a priorização de investimentos em infra-estrutura, uma vez que levam em consideração a existência ou não de rotas alternativas e o impacto no desempenho da rede devido à falha em um *link* (atributos *Flexibilidade, Confiabilidade e Vulnerabilidade*). Programas de prevenção dos efeitos de eventos recorrentes, tais como as enchentes decorrentes de tempestades, podem se beneficiar de indicadores que tenham *Risco e Vulnerabilidade* como atributos de maior relevância, com *Confiabilidade e Flexibilidade* logo a seguir. Naturalmente, um indicador que combine vários aspectos permitirá um diagnóstico mais generalizado e uma hierarquia equivalente. Este é o caso do Índice de Robustez da Rede (NRI) (SCOTT *et al.*, 2006), do Índice de Robustez da Rede-modificado (NRI-m) (SULLIVAN *et al.*, 2010), do Índice de Importância (II) (JENELIUS *et al.*, 2006), do Índice de Vulnerabilidade de Erath (IVE) (ERATH *et al.*, 2010) e do Índice de Risco de Nicholson (IRN) (NICHOLSON, 2003), que tratam direta ou indiretamente de todos os atributos de desempenho de rede viária identificados. Estes indicadores de desempenho, mais completos, são indicados para a hierarquização de investimentos no âmbito de um Plano Diretor regional. Dentre eles destacam-se o NRI-m e o IRN, com pontuação 8 (quadro 3.13), que diferem principalmente quanto ao tratamento dos atributos *Confiabilidade* (tratamento direto no NRI-m, indireto no IRN) e *Risco* (direto no IRN, indireto no NRI-m).

Os indicadores Índice de Vulnerabilidade com Base em Célula (IVBC) (JENELIUS e MATTESON, 2011) e Índice de Robustez de Viagens em Rede (NTR) (SULLIVAN *et al.*, 2010) tratam especificamente de regiões ou grupos de *links*, e podem ser aplicados para a hierarquização de sub-redes ou regiões de uma rede viária, não sendo indicados para a hierarquia de *links* de forma individualizada.

Os indicadores ICMC1, ICMC2 e ICMC3, baseados nos métodos de determinação dos custos marginais de congestionamento propostos por SAFIROVA (2007) obtiveram

uma pontuação intermediária no quadro de classificação dos indicadores quanto aos aspectos principais (Quadro 3.13, capítulo 3), tendo em vista sua não consideração dos atributos *Vulnerabilidade* e *Risco*. Entretanto, são indicadores mais completos do que os índices NS, V/C e CI, tendo em vista considerarem diretamente *Congestionamento* e *Confiabilidade* (ICMC1, ICMC2 e ICMC3) além do atributo *Flexibilidade* (ICMC2 e ICMC3). Como estes indicadores buscam avaliar o custo marginal devido ao aumento no fluxo de tráfego, pode ser recomendado para estudos relacionados à avaliação de oportunidade de implantação de pedágio urbano e fornecer subsídios para a determinação da tarifa.

Os resultados obtidos no Estudo de Caso mostram que a utilização de diferentes indicadores leva a diferentes hierarquias de importância de ligações. Observou-se ainda uma coerência entre as hierarquias decorrentes da aplicação de indicadores com foco em aspectos de desempenho comuns. A escolha do indicador a adotar em um projeto específico deverá ser precedida de uma análise do problema que se deseja enfrentar, definindo o foco do diagnóstico e, conseqüentemente, quais os atributos de desempenho de rede mais relevantes. Definido o foco, deve ser selecionado o indicador que melhor cubra os atributos de interesse, respeitados os recursos disponíveis para o projeto, tanto financeiros quanto de prazo.

Limitações principais do estudo

- A quantidade *links* selecionados para a análise comparativa foi limitada em função dos recursos disponíveis;
- Foram considerados como uniformes os custos operacionais veiculares e de tempo de viagem em toda a região submetida ao Estudo de Caso;
- A fonte de dados para o Estudo de Caso foi o PDTU-2005. Não foram, portanto, introduzidos na análise comparativa do Estudo de Caso os indicadores com parâmetros relevantes para os quais não se dispunha de dados no referido documento e seus arquivos de dados;

- O indicador IRN, com pontuação 8 no quadro comparativo 3.13 (Capítulo 3), não pode ser avaliado no estudo de caso tendo em vista a não disponibilidade de parâmetros relacionados à probabilidade de ocorrência de incidentes, fundamentais para sua determinação.

As limitações relacionadas, no entanto, não impediram o desenvolvimento da pesquisa e o alcance de seus objetivos.

Como principais contribuições da presente pesquisa podem ser destacadas:

- O levantamento de indicadores de desempenho de rede relacionados com a fluidez de tráfego e dos procedimentos para a sua determinação;
- A identificação dos principais atributos relacionados à fluidez do tráfego e a proposição de classificação dos indicadores segundo esses atributos identificados;
- A realização de estudo de caso em uma rede viária urbana complexa e a demonstração da viabilidade de determinação de indicadores selecionados e a produção de uma hierarquização diferenciada por indicador;
- A comparação das hierarquias resultantes dos diferentes indicadores testados no estudo de caso e a verificação preliminar de uma provável correlação entre os aspectos de desempenho considerados por cada indicador e a ordem hierárquica resultante.

Finalmente, acredita-se que o presente estudo contribui para a construção de um ferramental importante para o planejamento de transportes, ao analisar o estado da arte em termos de indicadores de desempenho em uma rede viária urbana.

Acredita-se que uma hierarquia de ligações em uma rede viária urbana elaborada de forma objetiva e com critérios claros seja imprescindível para a priorização de investimentos em melhorias no sistema de transporte, contribuindo para uma utilização mais eficaz dos recursos frequentemente escassos do poder público.

6.2 Recomendações

Considera-se como desejável o desenvolvimento de novas pesquisas na linha da presente Dissertação, de forma a aprofundar os temas aqui discutidos. Em particular é recomendável evoluir os estudos de forma a desenvolver uma proposta de metodologia para hierarquização de ligações não apenas urbanas, mas também rurais. Essa contribuição poderia tratar dos pontos citados a seguir:

- Ampliar a análise comparativa em um estudo de caso que contemple os indicadores ligados à fluidez do tráfego não tratados no presente estudo;
- Ampliar a amostra de links da rede de estudo e fazer uma análise estatística buscando a correlação entre os diversos indicadores analisados;
- Desenvolver novo indicador ou adaptar indicadores existentes aos problemas urbanos brasileiros mais específicos, de forma a permitir um planejamento mais eficaz e mais objetivo;
- Recomendar critérios para priorização de investimentos apoiados em indicadores objetivos, para as principais questões de planejamento de transportes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BATES, J., POLAK, J., JONES, P., *et al.*, 2001, “The valuation of reliability for personal travel”, *Transportation Research Part E*, n. 37, pp. 191-229.

BELL, M. G. H., 2000, “A game theory approach to measuring the performance reliability of transport networks”, *Transportation Research Part B*, n.34, pp. 533-545.

BERDICA, K., 2002, “An Introduction to Road Vulnerability: What Has Been Done, Is Done and Should Be Done”, *Transport Policy*, n. 9, pp. 117-127.

BOVY, P. H. L., JANSEN, G. R. M., 1983, “Network Aggregation Effects upon Equilibrium Assignment Outcomes: An Empirical Investigation”, *Transportation Science*, Vol. 17, n. 3, pp. 240-262.

BREMMER, D. *et al.*, 2004, “Measuring Congestion: Learning from Operational Data”, *Transportation Research Record*, n. 1895, pp. 188-196.

CASAS, 2003, “Evaluating the Importance of Accessibility to Congestion Response Using a GIS-Based Travel Simulator”. *Journal of Geographical Systems*, n. 5, pp. 109-127.

CALIPER, 1996, *Travel Demand Modeling with TransCAD 3.0*, Newton, MA, USA

CERWENKA, P., MEYER-RUHLE, O., 2009, “Are Congestion Costs External Costs?”, *Traffic Engineering and Control*, Vol. 50, n. 6, pp. 275-280.

CHANG, S. E., NOJIMA, N., 2001, “Measuring post-disaster transportation system performance: the 1995 Kobe earthquake in comparative perspective”, *Transportation Research Part A*, n. 35, pp 475-494.

CHEN, A., YANG, H., LO, H. K. *et al.*, 2002, “Capacity Reliability of a Road Network: an Assessment Methodology and Numerical Results”, *Transportation Research Part B*, n. 36, pp. 225-252.

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.

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.

COMMISSION OF THE EUROPEAN COMMUNITIES, 2008, *Strategy for the Internalization of External costs - Technical annex*, Brussels, Belgium.

DEPUY, G., 1999, "From the 'magic circle' to 'automobile dependence': measurements and political implications", *Transport Policy*, n. 6, pp 1-17.

DNIT, 2006, *Manual de Estudos de Tráfego, Publicação IPR-723*, Instituto de Pesquisas Rodoviárias, Rio de Janeiro, RJ.

DHEENADAYALU, Y., WOLSHON, B., WILMOT, C., 2004, "Analysis of Link Capacity Estimation Methods for Urban Planning Models", *Journal of Transportation Engineering*, vol.130, n. 5, pp. 568-575.

ERATH, A., *et al.*, 2010, "Vulnerability Assessment of the Swiss Road Network", *Transportation Research Record*, n. 2137, pp. 118-126.

FEITELSON, E., SALOMON, I., 2000, "The Implications of Differential Network Flexibility for Spatial Structures", *Transportation Research Part A*, n. 34, pp. 459-479.

FERNALD, J. G., 1999, "Roads to Prosperity? Assessing the Link Between Public Capital and Productivity", *The American Economic Review*, Vol. 89, n. 3, pp 616-638.

FERREIRA, A. B. H., 1987, *Novo Dicionário Aurélio da Língua Portuguesa*, 2 ed, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

GRAHAM, D., GLAISTER, S., 2006, Spatial Implications of Transport Pricing, *Journal of Transport Economics and Policy*, Vol. 40, Part 2, pp. 173–201.

HCM, 2000, *Highway Capacity Manual, Special Report 209*, Transportation Research Board, Washington, DC, USA

IPEA, ANTP, 1998, *Redução das deseconomias urbanas com a melhoria do transporte público: relatório síntese*, IPEA, São Paulo, SP, Brasil.

JAKOBSSON, C., FUJII, S., GÄRLING, T., 2000. "Determinants of private car users acceptance of road pricing", *Transport Policy*, Vol. 7, n. 2, pp. 153–158.

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

JENELIUS, E., MATTESON, L., 2011, *Road network vulnerability analysis of area-covering disruptions: A grid-based approach with case study*. Department of Transport Science, Royal Institute of Technology (KTH), Stockholm, Sweden. Disponível em http://home.abe.kth.se/~jenelius/vulnerability/Jenelius_Mattsson_Area.pdf. Acesso em: 22 ago. 2011.

KCITE, 2002, *Report of the KCITE Travel Demand Subcommittee*, Kansas City Institute of Transportation Engineers. Disponível em: http://www.kcite.org/files/KCITE_travel_damand_subcommittee_purpose.doc. Acesso em: 16 mar. 2010.

KIM, T., HAM, H., BOYCE, D., 2001, "Economic impacts of transportation network changes: Implementation of a combined transportation network and input-output model", *Papers in Regional Science*, n. 81, pp. 223-246.

LEVINE, J., GARB, Y., 2002, "Congestion pricing's conditional promise: promotion of accessibility or mobility", *Transport Policy*, Vol. 9, n .3, pp. 179–188.

MEYER, M. D., 1997, *A tool for alleviating traffic congestion and enhancing mobility*, US Department of Transportation Federal Highway Administration, Washington D.C.

MCTRANS, 2000, *Highway Capacity Software version 4.1b.*, University of Florida. Disponível em: < <http://mctrans.ce.ufl.edu/hcs/hcs2000>>. Acesso em: 16 jul. 2011.

NESTEROV, Y., DE PALMA, A., 2003, "Stationary Dynamic Solutions in Congested Transportation Networks: Summary and Perspectives", *Networks and Spatial Economics*, n. 3, pp. 371–395.

NICHOLSON, A., 2003, "Transport Network Reliability Measurement and Analysis", *Revista Transportes*, v. 11, pp. 49-62.

NICHOLSON, A., DU, Z., 1997, "Degradable Transportation Systems: an Integrated Equilibrium Model", *Transportation Research Part B*, v. 31, n. 3, pp. 209-223.

ORTÚZAR, J. D., WILLUMSEN, L. G., 2011, "Trip Generation Modelling". *In: Modelling Transport*, 4 ed. West Sussex, Wiley, UK.

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, *Relatório 9 – Concepção das Matrizes Versão 1*, Governo do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ. Disponível em www.rj.gov.br/web/setrans/exibeconteudo?article-id=226287. Acesso em: 5 fev. 2012.

PDTU, 2005c, *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 fev. 2012.

PDTU, 2005d, CENTRAL, *MATRIZES*, pasta com arquivos digitais em disco rígido.

PDTU, 2005e, CENTRAL, *(ATUAL) Rede Viária*, pasta com arquivos digitais em disco rígido.

PIRES, F. M. A., 2000, *Uma Contribuição Metodológica para Avaliação dos Padrões de Acessibilidade em Redes Rodoviárias*. Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

PORTO JR., W., 2008, *Análise de Interseções Semaforizadas*, Apostila do Programa de Engenharia de Transportes, COPPE-UFRJ, Rio de Janeiro, RJ.

PORTO JR., W., 2010, *Planejamento de Transportes Urbanos*, Apostila do Programa de Engenharia de Transportes, COPPE-UFRJ, Rio de Janeiro, RJ.

SAFIROVA, E., GILLINGHAM, K., HOUDE, S., 2007, "Measuring marginal congestion costs of urban transportation: Do networks matter?", *Transportation Research Part A*, n. 41, 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.

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*, n. 17, pp. 215-227.

SCHRANK, D., LOMAX, T., TURNER, S., 2010, *TTI's 2010 Urban Mobility Report*, Texas Transportation Institute, Texas, USA.

SOHN, J., 2006, "Evaluating the significance of highway network links under the flood damage: An accessibility approach", *Transportation Research Part A*, n. 40, pp. 491-506.

SOHN, K., KIM, D., 2010, "Zonal centrality measures and the neighborhood effect", *Transportation Research Part A*, n. 44, pp. 733-743.

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

SULLIVAN, J. L., NOVAK, D. C., AULTMAN-HALL, L., SCOTT, D. M., 2010, "Identifying critical road segments and measuring system-wide robustness in transportation networks with isolating links: A link-based capacity-reduction approach" *Transportation Research Part A*, n. 44, pp. 323-336.

TAYLOR, B. D., 2002, "Rethinking Traffic Congestion", *Access*, n. 21, pp. 8-16.

TAYLOR, M. A. P., 2008, "Critical Transport Infrastructure in Urban Areas: Impacts of traffic Incidents Assessed Using Accessibility-Based Network - Vulnerability Analysis", *Growth and Change*, Vol. 39, n. 4, 593-616.

TRB, 1988, *Transportation Research Board – NCHR Report 365 – Travel Estimation Techniques for Urban Planning*.

UK HIGHWAYS AGENCY. 2002. Incident management study. UK Highways Agency. Disponível em <http://www.highways.gov.uk/aboutus/1876.aspx>. Acesso em 28 out. 2011.

UKKUSURI, S.V., USHIMITO, W.F., 2009, "A methodology to assess the criticality of Highway transportation networks", *J Transp Secur*, n. 2, pp. 29–46.

YIN, R. K., 2001, *Estudo de Caso – Planejamento e Métodos*. Tradução: Daniel Grassi. 2 ed. Porto Alegre, Bookman.

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, May 21.

GLOSSÁRIO

Acessibilidade – facilidade com a qual atividades podem ser alcançadas a partir de uma dada localização através de um sistema de transporte (ZAKARIA, 1974, *apud* PIRES, 2000).

Arco – aresta em um grafo; corresponde a um *link* em uma rede.

Atraso – tempo de viagem adicional experimentado por um veículo ou pessoa em função de eventos ou situações características em uma rede viária, como por exemplo, o atraso devido à parada em um semáforo.

Bottleneck – Trecho de uma rede viária em que há uma menor capacidade de escoamento do fluxo de tráfego, tendendo a provocar congestionamento.

Capacidade – O fluxo máximo sustentável que se espera que veículos ou pessoas possam atravessar um ponto ou um segmento uniforme de uma via em um tempo específico (HCM, 2000).

Centróide – nós especiais de uma rede que concentram todas as origens e destinos de uma zona de tráfego.

Conector de Centróide – *link* especial que conecta um centróide à rede viária.

Delay – ver Atraso.

Densidade de Tráfego – número de veículos ocupando uma extensão de via ou faixa de tráfego em determinado instante.

Desutilidade – é o oposto de utilidade. A medida da desutilidade é relacionada ao quanto determinada condição prejudica o usuário ou é percebida por ele como prejudicial.

Distribuição de Viagens – etapa do planejamento de transportes onde se estima os volumes de viagens entre cada par de origem e destino.

Freeways – rodovia com múltiplas faixas, dividida em pelo menos duas pistas de tráfego unidirecional, com total controle de acesso e sem interrupções forçadas no fluxo (HCM, 2000).

Gargalo – ver *Bottleneck*.

GIS – *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.

GPS – Acrônimo de *Global Positioning System*, é um sistema de navegação apoiado em satélites que permite obter o posicionamento absoluto na superfície terrestre.

Indicador – aquele que indica, que dá indicações. Pode ser associado a um índice, de forma a permitir análises comparativas.

Índice – número que serve para comparação de fenômenos (FERREIRA, 1987).

Infraestrutura – corresponde a um conjunto de elementos que dá suporte a uma estrutura. É a base de uma estrutura.

Link – ligação em uma rede que representa a unidade básica para análise de um trecho; é delimitado por nós. Em um grafo representativo do sistema viário, o link é uma aresta. Pode ser também denominado de *ligação* ou *ramo*.

Nós – são pontos que delimitam os *links* em uma rede.

OD ou O/D – Par de origem e destino. Uma matriz OD de viagens é uma matriz cujas células contêm o número de viagens realizadas de uma determinada origem para um determinado destino.

Proxy – termo em inglês correspondente a “substituto”.

Ramo – ver *link*.

Ranking – Lista seqüencial de uma classificação, hierarquia.

Smartphone – telefone celular com características adicionais que permitem conexão à Internet e outras ferramentas de produtividade.

Tablet – computador pessoal portátil contido em uma única unidade, com tela sensível ao toque.

UCP – unidade equivalente de carros de passeio, normalmente utilizada em estudos envolvendo tráfego misto.

Utilidade - é o oposto de desutilidade. A medida da utilidade é relacionada ao quanto determinada condição favorece o usuário ou é percebida por ele como favorável.

Variáveis *Dummy* – são variáveis utilizadas em regressões estatísticas para representar atributos qualitativos, assumindo normalmente valores inteiros, particularmente 0 e 1.

Via Expressa – ver *Freeway*.

ANEXO

Em CD anexo estão os arquivos base utilizados no Estudo de Caso, quais sejam:

- Na pasta “Matriz Hora de Pico” há um único arquivo, denominado “Matriz_OD_IND_PM.mtx”, e que contem a matriz de viagens individuais referente à hora de pico, obtida a partir da matriz de viagens do período de pico do PDTU 2005, para o ano 2003. A matriz está em formato TransCAD.
- Na pasta “PDTU” há diversos arquivos:
 - ✓ “Matriz_OD_IND_PM.mtx” – contém a matriz de viagens original do PDTU, referente ao período de pico do ano de 2003 (PDTU, 2005d);
 - ✓ “Rede_Viaria_PDTU” – com extensões diversas, são arquivos que compõem o banco de dados para a montagem da rede viária do PDTU no formato TransCAD (PDTU, 2005e).