

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

**ANÁLISE DO PADRÃO DE COMPORTAMENTO DE PEDESTRES  
EM TRAVESSIAS SEMAFORIZADAS**

**Paula Ariotti**

**Porto Alegre, 2006**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

**ANÁLISE DO PADRÃO DE COMPORTAMENTO DE PEDESTRES  
EM TRAVESSIAS SEMAFORIZADAS**

Paula Ariotti

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Helena Beatriz Bettella Cybis, Ph.D.

Banca Examinadora:

Paulo Cesar Marques da Silva, Ph.D.

ENC / UNB

Christine Tessele Nodari, Dra.

PPGEP / UFRGS

João Fortini Albano, Dr.

PPGEP / UFRGS

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de  
Produção como requisito parcial à obtenção do título de  
**MESTRE EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

Área de concentração: Sistemas de Transportes

Porto Alegre, fevereiro de 2006

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora designada pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção.

**Profª. Helena B. B. Cybis, Ph.D.**

PPGEP / UFRGS

Orientadora

**Prof. Luis Antonio Lindau, Ph.D.**

Coordenador PPGEP / UFRGS

**Banca Examinadora:**

**Paulo Cesar Marques da Silva, Ph.D.**

ENC / UNB

**Christine Tessele Nodari, Dra.**

PPGEP / UFRGS

**João Fortini Albano, Dr.**

PPGEP / UFRGS

*“A mente que se abre a uma nova idéia jamais  
voltará ao seu tamanho original.”*

*(Albert Einstein)*

## AGRADECIMENTOS

*Agradeço, com muita consideração,*

*à minha orientadora Helena Beatriz Bettella Cybis, por ter acreditado e  
confiado no meu trabalho;*

*aos professores Paulo Cesar, Piti e Albano pelas valiosas considerações a  
respeito desta dissertação;*

*aos demais professores do PPGEP por terem contribuído para minha formação  
em transportes;*

*à UFRGS e CAPES que subsidiaram a infraestrutura científica, tecnológica, e  
os recursos financeiros para o desenvolvimento desta pesquisa;*

*aos funcionários do DEPROT, em especial, Rogério, Vera, Thiago e Cláudio,  
por serem sempre solícitos e pelo apoio durante todo mestrado;*

*aos colegas da turma de mestrado 2004, Renata, Rodrigo e Rafael pelo apoio e  
companheirismo durante esses dois anos;*

*aos colegas Charlie e Marcelo pela paciência e disponibilidade de ajuda na  
modelagem com redes neurais artificiais;*

*aos bolsistas Marcus, Thomas, Luis Henrique e Diego pela ajuda na coleta de  
dados e, novamente ao Diego, pelo desenvolvimento do temporizador;*

*ao colega Davi, pelo carinho, apoio e motivação sem medida;*

*aos colegas Daniela, Cristiano e Érico, pelo companheirismo e amizade que  
sempre demonstraram;*

*às colegas Mara, Patrícia Duarte e Ingrid pelo apoio e amizade indispensáveis  
para concretização desta etapa;*

*aos demais colegas do LASTRAN pelo apoio e motivação;*

*à amiga Elisia, pelo exemplo de determinação e competência e, pela amizade  
indispensável em todas as horas;*

*à amiga Rita, por sua dedicação, cumplicidade e amizade, por estar sempre  
disposta a ajudar nas horas difíceis e por compartilhar as vitórias e alegrias;*

*aos queridos tio Jorge e tia Magda por todo carinho e por compartilharem  
comigo alegrias e aflições;*

*à tia Dala, pelo apoio constante e por seu exemplo de força e coragem;*

*ao meu mano Marcelo, por sua dedicação e compreensão, e por seu amor  
incondicional;*

*à minha mãezinha, por sempre acreditar nos meus sonhos, pelo incentivo e  
apoio constantes, pelo exemplo de perseverança e por cuidar da Layse;*

*ao meu pai, que embora eu não sinta sua presença física, seu amor e carinho, e  
seus ensinamentos permanecem em meu coração. Saudades!*

*à minha princesa Layse, por compreender minhas ausências e me ensinar o  
verdadeiro valor da vida. Te amo lindinha!*

*ao meu amor André, por todo incentivo, carinho, compreensão, paciência e  
amor. Pelo companheirismo em todas as horas e pela participação direta e  
fundamental neste trabalho. Por ter multiplicado as minhas alegrias e  
fracionado as minhas angústias e tristezas. Dé, te amo!*

*...à Deus, acima de todas as coisas.*

*Paula Ariotti*

## RESUMO

Esta dissertação apresenta um modelo conceitual do padrão de comportamento de pedestres em travessias semaforizadas. O modelo propõe uma estrutura de classificação dos pedestres de acordo com suas atitudes ao atravessar uma via. A análise envolve a consideração de fatores que podem influenciar as decisões dos pedestres sobre onde e quando iniciar a trajetória de travessia. O uso adequado das travessias semaforizadas é definido como conformidade de travessia. A conformidade de travessia pode ser de dois tipos: espacial, relacionada à localização em que o pedestre atravessa a via e, temporal, relacionada ao momento em que o pedestre decide iniciar a travessia. O modelo conceitual foi aplicado na área central da cidade de Porto Alegre. Com o objetivo de estimar as conformidades de travessia foram realizadas modelagens com redes neurais artificiais. Esta ferramenta proporciona o entendimento de problemas com alto grau de complexidade, que agregam variáveis com relações não-lineares entre si. As variáveis utilizadas na modelagem foram (i) *gap* máximo, (ii) *gap* crítico, (iii) 85° percentil de *gaps*, (iv) volume de pedestres, (v) volume de veículos, (vi) velocidade de veículos, (vii) largura da via, (viii) largura da travessia e, (ix) tempo de espera pelo verde no semáforo. Os resultados demonstraram que as características particulares de cada local têm influência nas conformidades de travessia. As análises de sensibilidade dos modelos indicaram que as variáveis relacionadas às características locais de geometria e condições de entorno das travessias exercem maior influência sobre a conformidade de travessia espacial. Por outro lado, a modelagem indicou que as características do regime do tráfego são os aspectos mais importantes na determinação da conformidade de travessia temporal.

Palavras-chave: pedestres, travessias semaforizadas, conformidades de travessia, redes neurais artificiais.

## ABSTRACT

This dissertation presents a conceptual model to analyze the pedestrian road crossing behavior at signalized intersections. It is proposed a classification framework, based on the pedestrians' attitudes while crossing the road. The analysis takes into account the factors that can influence the pedestrian's decision making process: where and when start crossing the road. The adequate crossing behavior is defined as a crossing compliance. The crossing compliance can be classified in two types: spatial, related to the road site where the pedestrian cross the road, and, temporal, related to the moment the pedestrian decide to cross the road. The conceptual model was applied in five signalized intersections in downtown Porto Alegre. In order to estimate the crossing compliance it was used Artificial Neural Networks techniques. These techniques can be very useful to understand complex problems that involve variables with non-linear relationships. The variables used on the model were: (i) maximum gap; (ii) critical gap; (iii) 85<sup>o</sup> gap percentile; (iv) pedestrian volume; (v) vehicle volume; (vi) vehicle speed; (vii) road width; (viii) road crossing width; (ix) waiting time for the green light period. The results show that the characteristics of each place can influence the crossing compliance. The sensitivity analysis has indicated that the variables related to the crossing environment and geometry characteristics are the major factors influencing in the spatial crossing compliance. In the other hand, the modeling process indicated that the traffic characteristics are the most important aspects in the temporal crossing compliance determination.

Key words: pedestrians, signalized crossings, compliance crossing, artificial neural networks.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Etapas da pesquisa.....	20
Figura 2	Modelo básico de um neurônio artificial .....	34
Figura 3	Estrutura de uma rede neural artificial genérica .....	37
Figura 4	Rede Neural Direta ou Não Recorrente .....	39
Figura 5	Rede Neural Recorrente .....	40
Figura 6	Área da Travessia (AT) e Área de Influência da travessia (AIT) .....	49
Figura 7	Estrutura do modelo conceitual de análise do comportamento de pedestres .....	51
Figura 8	Localização das travessias selecionadas para o estudo .....	57
Figura 9	Travessia de pedestres na rua Siqueira Campos .....	57
Figura 10	Travessia de pedestres na rua Prof. Annes Dias .....	58
Figura 11	Travessia de pedestres na av. Paulo Gama.....	59
Figura 12	Travessia de pedestres na rua Riachuelo.....	59
Figura 13	Travessia de pedestres na av. Alberto Bins.....	60
Figura 14	Questionário da pesquisa com pedestres.....	67
Figura 15	Histogramas do volume de pedestres e veículos para a rua Siqueira Campos.....	79
Figura 16	Histogramas do volume de pedestres e veículos para a rua Prof. Annes Dias.....	79
Figura 17	Histogramas do volume de pedestres e veículos para a av. Paulo Gama.....	79
Figura 18	Histogramas do volume de pedestres e veículos para a rua Riachuelo.....	80
Figura 19	Histogramas do volume de pedestres e veículos para a av. Alberto Bins.....	80
Figura 20	Tipos de usuários entrevistados .....	81
Figura 21	Frequência que os pedestres atravessam em locais sem travessia para pedestres.	82
Figura 22	Motivos pelos quais os pedestres atravessam fora das travessias .....	83
Figura 23	Correlação para os dados de treino e teste do modelo 94 para CTE.....	85
Figura 24	Correlação para os dados de treino e teste do modelo 27b para CTT.....	86

Figura 25	Importância relativa das variáveis no modelo 94 para CTE .....	88
Figura 26	Importância relativa das variáveis no modelo 27b para CTT .....	89
Figura 27	Variação da variável <i>gap</i> máximo.....	90
Figura 28	Variação da variável <i>gap</i> crítico .....	91
Figura 29	Variação da variável 85° percentil de <i>gaps</i> .....	92
Figura 30	Variação da variável volume de pedestres .....	93
Figura 31	Variação da variável volume de veículos.....	93
Figura 32	Variação da variável velocidade dos veículos .....	94
Figura 33	Variação da variável largura útil da via .....	95
Figura 34	Variação da variável largura da travessia.....	96
Figura 35	Variação da variável tempo de espera pelo verde.....	97
Figura 36	Conformidades de Travessia Espacial, com variação dos tempos de espera.....	98
Figura 37	Conformidades de Travessia Temporal, com variação dos tempos de espera.....	98
Figura 38	<i>Gap</i> crítico para a Rua Siqueira Campos .....	108
Figura 39	<i>Gap</i> crítico para a Rua Prof. Annes Dias .....	108
Figura 40	<i>Gap</i> crítico para a Av. Paulo Gama .....	109
Figura 41	<i>Gap</i> crítico para a Rua Riachuelo .....	109
Figura 42	<i>Gap</i> crítico para a Av. Alberto Bins.....	110

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Características dos locais de estudo.....	61
Tabela 2	Número de questionários por agrupamento.....	66
Tabela 3	Conformidades de travessia observadas .....	77
Tabela 4	Características dos respondentes das entrevistas.....	81
Tabela 5	Conformidades de travessia informadas.....	81
Tabela 6	Hierarquização dos fatores viário-ambientais considerados.....	83
Tabela 7	Melhores modelos para CTE .....	85
Tabela 8	Melhores modelos para CTT .....	86

## LISTA DE SIGLAS

Área da Travessia	AT
Área de Influência da Travessia	AIT
Categoria Especial	CE
Coeficiente de Variação	CV
Conformidade de Travessia Espacial	CTE
Conformidade de Travessia Temporal	CTT
Erro Relativo Absoluto Médio	ERAM
Erro Relativo Admissível	ER
<i>Multilayer Perceptron</i>	MPL
Redes Neurais Artificiais	RNA

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>15</b>
1.1 TEMA E SUA IMPORTÂNCIA .....	16
1.2 OBJETIVOS .....	18
1.2.1 Objetivo Geral .....	18
1.2.2 Objetivos Específicos .....	18
1.3 MÉTODO DE TRABALHO .....	19
1.4 DELIMITAÇÃO DO ESTUDO .....	21
1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	21
<b>2 REFERENCIAL TEÓRICO DO ESTUDO.....</b>	<b>23</b>
2.1 A CIRCULAÇÃO DE PEDESTRES EM ÁREAS URBANAS .....	23
2.1.1 Comportamento, Percepções e Atitudes de Pedestres.....	26
2.1.2 Travessias de Pedestres .....	28
2.1.2.1 Travessias com faixa para pedestres, sem semáforo .....	29
2.1.2.2 Travessias com faixa para pedestres, com semáforo.....	30
2.2 REDES NEURAIS ARTIFICIAIS .....	32
2.2.1 Conceitos Básicos de Redes Neurais Artificiais .....	32
2.2.2 O Neurônio Artificial .....	33
2.2.3 Arquitetura de Redes Neurais Artificiais .....	37
2.2.4 Topologia das Redes Neurais Artificiais.....	38
2.2.5 Tipos de Treinamento .....	40
2.2.6 O Algoritmo de Retropropagação de Erros.....	42
2.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	45
<b>3 MODELO CONCEITUAL DO PADRÃO DE COMPORTAMENTO DE PEDESTRES EM TRAVESSIAS SEMAFORIZADAS .....</b>	<b>47</b>
3.1 CONFORMIDADE DE TRAVESSIA ESPACIAL (CTE).....	48
3.2 CONFORMIDADE DE TRAVESSIA TEMPORAL (CTT) .....	50
3.3 ESTRUTURA DO MODELO .....	51

3.4	FATORES INTERVENIENTES NAS CONFORMIDADES DE TRAVESSIA .....	52
3.5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	54
<b>4</b>	<b>LEVANTAMENTO DOS DADOS .....</b>	<b>56</b>
4.1	LEVANTAMENTO DOS DADOS POR FILMAGENS .....	62
4.2	ENTREVISTAS COM PEDESTRES.....	65
4.3	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	69
<b>5</b>	<b>DESENVOLVIMENTO DOS MODELOS EM RNA.....</b>	<b>70</b>
5.1	DEFINIÇÃO DAS VARIÁVEIS DE CADA MODELO.....	70
5.2	CRITÉRIOS DE ESCOLHA DOS MELHORES MODELOS .....	71
5.3	FORMULAÇÃO DAS RÉPLICAS DAS RNA EM PLANILHA ELETRÔNICA .....	73
5.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	76
<b>6</b>	<b>ANÁLISE DOS RESULTADOS .....</b>	<b>77</b>
6.1	ANÁLISE DOS DADOS DAS FILMAGENS.....	77
6.2	ANÁLISE DAS ENTREVISTAS.....	80
6.3	MODELOS DE REDES NEURAIAS ARTIFICIAIS.....	84
6.3.1	Comparação e Escolha dos Melhores Modelos .....	84
6.3.1.1	<i>Melhores Modelos para Conformidade de Travessia Espacial.....</i>	<i>85</i>
6.3.1.2	<i>Melhores Modelos para Conformidade de Travessia Temporal .....</i>	<i>86</i>
6.3.2	Análise de Influência das Variáveis nos Modelos .....	87
6.3.2.1	<i>Relevância das Variáveis de Entrada na Modelagem.....</i>	<i>87</i>
6.3.3	Análise de Sensibilidade .....	89
6.3.3.1	<i>Análise da variável gap máximo .....</i>	<i>90</i>
6.3.3.2	<i>Análise da variável gap crítico .....</i>	<i>91</i>
6.3.3.3	<i>Análise da variável 85° percentil de gaps.....</i>	<i>91</i>
6.3.3.4	<i>Análise da variável volume de pedestres .....</i>	<i>92</i>
6.3.3.5	<i>Análise da variável volume de veículos .....</i>	<i>93</i>
6.3.3.6	<i>Análise da variável velocidade dos veículos.....</i>	<i>94</i>
6.3.3.7	<i>Análise da variável largura útil da via .....</i>	<i>94</i>
6.3.3.8	<i>Análise da variável largura da travessia .....</i>	<i>95</i>

6.3.3.9 <i>Análise da variável tempo de espera pelo verde</i> .....	96
6.3.4 Exemplo da aplicabilidade do modelo .....	97
6.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	99
<b>7 CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>100</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>104</b>
<b>APÊNDICE: GAPS CRÍTICOS PARA OS LOCAIS DE ESTUDO .....</b>	<b>108</b>

## 1 INTRODUÇÃO

As políticas de circulação viária envolvem a análise de aspectos essenciais para seu controle como fluidez, segurança, acessibilidade, nível de serviço, custo e qualidade ambiental (VASCONCELLOS, 2000). Como meio de organização das cidades, o planejamento de transportes e da circulação deve fazer parte do planejamento urbano.

O planejamento de transportes define os aspectos relacionados à infra-estrutura viária como vias, passeios, travessias, terminais, veículos de transporte público e frequência das viagens. O planejamento da circulação define a forma de uso da estrutura viária, tanto pelos pedestres quanto pelos veículos, tendo como atividades constituintes a legislação, a engenharia de tráfego, a educação e a fiscalização (VASCONCELLOS, 2000).

Observa-se na prática que o planejamento urbano e de transportes, geralmente, prioriza a circulação de longo percurso, favorecendo desse modo o transporte motorizado em detrimento das rotas de pedestres e ciclistas. No entanto, mesmo as viagens motorizadas envolvem trechos de caminhada, onde os motoristas e passageiros assumem as condições de pedestres.

As rotas de pedestres e ciclistas se caracterizam por não serem contínuas, sendo fragmentadas pela rede de tráfego dos veículos motorizados, que normalmente constitui a base do desenho geométrico urbano. O planejamento de rotas para caminhadas e bicicletas que se sobreponha e tenha prioridade sobre o transporte motorizado é pouco considerado, embora em alguns países venham surgindo intervenções urbanas, principalmente em áreas residenciais, onde o convívio harmonioso do homem com o espaço público passa a ter privilégio em relação aos automóveis (VASCONCELLOS, 2001).



Em concepções de projetos urbanos, a integração de pedestres, transporte coletivo eficiente e medidas de restrição ao uso de automóveis tem impacto positivo no desenvolvimento das cidades (MONHEIN, 2001). Desta forma, tornar a infra-estrutura para pedestres mais atraente e segura se reverte em melhoria da qualidade de vida das áreas urbanas tanto pelos ganhos provenientes da utilização de modos de transporte ambientalmente sustentáveis como pelo aumento da eficiência do sistema de transportes (SILVA; FERREIRA, 2004).

Assim, a sustentabilidade passa a ser a diretriz principal, ou o paradigma, de uma nova política de desenvolvimento urbano e de transportes. No seu conceito mais amplo, a sustentabilidade tem como propósitos não só a preservação e recuperação do patrimônio ambiental, mas também a equidade e justiça social na apropriação do solo e dos recursos, e também do espaço viário.

A provisão de infra-estrutura adequada para pedestres e ciclistas estimula a utilização desses modais como forma alternativa ao uso do transporte motorizado. Melhores condições de deslocamento qualificam as viagens onde os trajetos a pé ou por bicicleta se caracterizam como modos complementares às viagens motorizadas.

## 1.1 TEMA E SUA IMPORTÂNCIA

O relatório publicado pela ANTP (2004) que descreve o perfil da mobilidade, do transporte e do trânsito nos municípios brasileiros revela que 35% das viagens em cidades com mais de 60 mil habitantes são realizadas pelo modo a pé, 32% por transporte público e 28% por automóveis. Em Porto Alegre, de acordo com a pesquisa de entrevistas domiciliares realizada em 2003 (EDOM, 2004), 27,3% das viagens diárias são realizadas exclusivamente a

pé. Embora tenham significativa participação na divisão modal, os modos não motorizados não têm recebido, por parte das políticas públicas, a merecida atenção.

Os pedestres são os usuários mais vulneráveis do sistema viário composito, conforme pesquisas realizadas sobre acidentes de trânsito, o maior percentual entre vítimas fatais. Em Porto Alegre, 46% das mortes em acidentes de trânsito, em 2004, foram decorrentes de atropelamentos (EPTC, 2005). Os danos conseqüentes dos acidentes de trânsito, em especial os de natureza humana, e o incômodo gerado pela vivência cotidiana de situações de risco são as principais preocupações para prover um sistema de circulação viária adequado e seguro.

Neste contexto, a concepção de projetos de engenharia de tráfego com ênfase na circulação de pedestres deve considerar as preferências e percepções dos usuários, visando uma maior probabilidade de uso efetivo e correto das estruturas projetadas (SISIOPIKU; AKIN, 2003). A utilização adequada dos passeios para circulação e a realização das travessias em locais apropriados minimizam os conflitos entre veículos e pedestres, levando a um nível maior de segurança.

Este trabalho busca estudar o comportamento de pedestres em travessias semaforizadas. As preferências e os hábitos de pedestres são analisados com o objetivo de determinar suas práticas de travessia e, investigar as razões implícitas em suas escolhas. Através deste conhecimento, é possível identificar os parâmetros intervenientes na decisão dos pedestres e obter subsídios para um melhor planejamento da circulação de pedestres em áreas urbanas.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 **Objetivo Geral**

O objetivo geral deste trabalho é avaliar o padrão de comportamento de pedestres através de um modelo conceitual de análise que classifica os pedestres de acordo com suas atitudes ao transpor uma via.

### 1.2.2 **Objetivos Específicos**

Como objetivos específicos, esta pesquisa pretende:

- Reunir conceitos de diferentes autores para o desenvolvimento de um modelo conceitual que analisa o padrão de comportamento de pedestres;
- Identificar os fatores que influenciam a decisão dos pedestres no momento da realização da travessia;
- Determinar as condições de utilização de travessias através de índices que expressam o uso adequado dessas estruturas;
- Identificar a percepção dos pedestres em relação aos fatores que influenciam seu comportamento e,
- Desenvolver modelos em redes neurais artificiais (RNA) para auxiliar a compreensão da influência dos fatores intervenientes no comportamento de pedestres.

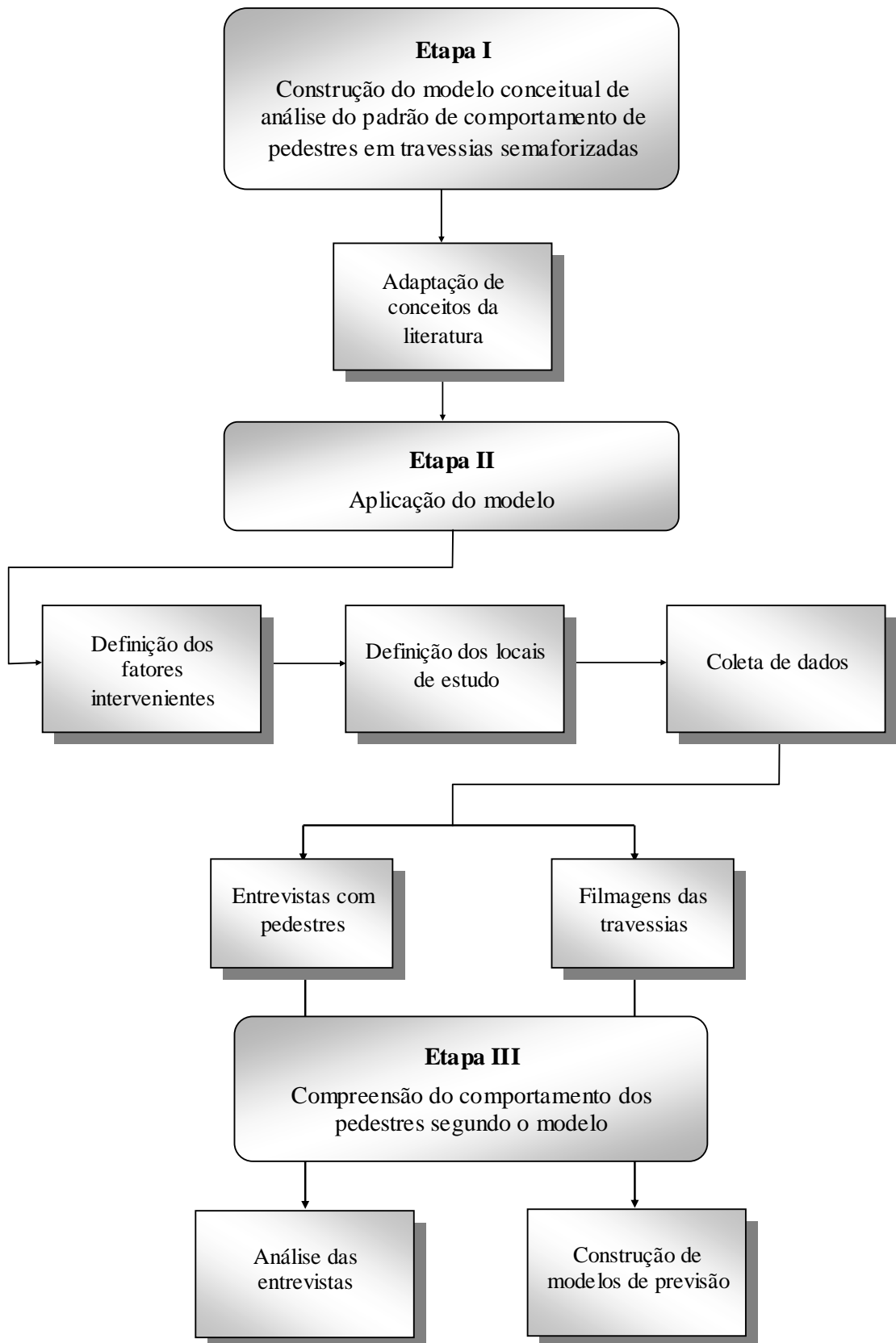
### 1.3 MÉTODO DE TRABALHO

Este trabalho é classificado como de natureza aplicada, onde é proposta uma metodologia para análise do comportamento de pedestres em travessias semaforizadas. A abordagem da pesquisa pode ser classificada como mista, envolvendo as abordagens qualitativa e quantitativa. A pesquisa possui um objetivo exploratório, pois investiga e analisa informações obtidas através de revisão bibliográfica, de levantamentos junto aos pedestres, de observação de imagens e de modelos de previsão.

Este estudo foi desenvolvido em três etapas principais. Estas etapas são ilustradas na Figura 1, juntamente com as etapas secundárias. A primeira etapa do trabalho abrangeu a construção da estrutura do modelo conceitual de comportamento de pedestres em travessias semaforizadas através da adaptação de conceitos baseados na literatura. A estrutura do modelo envolve a classificação dos pedestres segundo suas atitudes ao atravessar uma via.

A segunda etapa contemplou a aplicação dos conceitos propostos no modelo. Foram identificados os potenciais fatores influentes no comportamento de pedestres e definidos os locais de estudo, segundo critérios pré-determinados. Ainda, foi realizado o levantamento dos dados necessários sob duas formas: realização de entrevistas com pedestres e filmagem dos locais de estudo.

A terceira etapa da pesquisa envolveu a compreensão, de acordo com o modelo, do comportamento dos pedestres através da observação das filmagens, da análise das entrevistas realizadas em campo e dos modelos de previsão. Os modelos de previsão foram desenvolvidos com a utilização de redes neurais artificiais. Os dados para construção desses modelos foram provenientes das filmagens e de observação em campo.



**Figura 1** Etapas da pesquisa

#### 1.4 DELIMITAÇÃO DO ESTUDO

Embora a metodologia utilizada neste trabalho possa ser aplicada a outros contextos, os resultados obtidos são restritos ao ambiente e às condições modeladas.

#### 1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está estruturado em sete capítulos. O Capítulo 2 apresenta as bases teóricas utilizadas no desenvolvimento do estudo. São abordados aspectos do planejamento da circulação de pedestres no ambiente viário, do comportamento adotado por pedestres em travessias e dos critérios para o projeto de travessias em áreas urbanas. Ainda, são apresentados os conceitos de redes neurais artificiais, descrevendo as características do tipo de rede neural utilizada na modelagem deste trabalho.

O Capítulo 3 expõe o modelo conceitual proposto nesta dissertação. São apresentadas as características do modelo, as definições dos conceitos e a descrição dos fatores intervenientes na decisão dos pedestres ao atravessar uma via.

O Capítulo 4 descreve o processo de levantamento dos dados utilizados para aplicação do modelo conceitual apresentado no capítulo anterior.

O Capítulo 5 contempla o desenvolvimento dos modelos em redes neurais artificiais. Também é apresentada a formulação matemática para reprodução em planilha eletrônica dos melhores modelos obtidos.

O Capítulo 6 apresenta a análise dos resultados. Os índices de uso adequado das travessias para cada local de estudo são comparados, assim como são descritos os resultados

das entrevistas com pedestres. Também neste capítulo são apresentados os melhores modelos obtidos para as redes neurais artificiais e a análise de sensibilidade dos modelos.

O Capítulo 7 é composto pela conclusão do trabalho e recomendações para trabalhos futuros.

## **2 REFERENCIAL TEÓRICO DO ESTUDO**

Este capítulo está dividido em duas seções. A primeira apresenta os aspectos mais importantes dos deslocamentos de pedestres em áreas urbanas e as pesquisas realizadas internacionalmente em relação ao comportamento e percepções desses usuários no ambiente viário. Ainda, são descritos os principais dispositivos e técnicas utilizadas no projeto de travessias para pedestres em áreas urbanas.

Na segunda seção, são apresentados os conceitos básicos sobre redes neurais artificiais, formulações e características da estrutura de rede neural utilizada neste trabalho.

### **2.1 A CIRCULAÇÃO DE PEDESTRES EM ÁREAS URBANAS**

A categoria de usuários do sistema viário denominada “pedestres” engloba crianças, adultos e idosos com suas diferenças em agilidade e suas limitações (CTB, 1997). Os limites impostos à locomoção, no entanto, podem ser provenientes de deficiências de mobilidades ou motivos momentâneos, externos à aptidão física, como o transporte de carrinhos de bebês, carrinhos de compras, cadeiras de rodas, crianças de colo, entre outros (ZACHARIAS, 2001).

Devido à maior exposição dos pedestres aos conflitos com os veículos motorizados, busca-se medidas que minimizem a probabilidade de ocorrência de acidentes e garantam uma melhor operação do sistema. Além dos acidentes, outras situações cotidianas têm impacto na qualidade dos deslocamentos de pedestres. Miranda e Cabral (2002) dividem essas situações em dois grupos:



- Fatores influentes na segurança dos pedestres – são as condições que expõem os pedestres ao contato com o tráfego de veículos. Podem incluir:
  - Inadequabilidade das calçadas;
  - Ciclos semaforicos inadequados;
  - Abrigos de pontos de parada de ônibus de tamanho desproporcional em relação à calçada;
  - Pisos inadequados e em mau estado de conservação;
  - Travessias para pedestres em locais inadequados;
  - Desníveis abruptos entre a calçada e as rampas de garagem;
  - Entrada e saída de estabelecimentos comerciais mal sinalizadas;
  - Ausência de estruturas adequadas para pessoas com necessidades especiais;
  - Veículos estacionados indevidamente sobre as calçadas;
  - Obras ocupando o espaço das calçadas;
  - Outros.
  
- Fatores influentes na qualidade dos deslocamentos de pedestres – são as condições que contribuem para a diminuição da qualidade da circulação de pedestres. Podem incluir:
  - Calçadas com largura insuficiente;
  - Inadequabilidade de uso das calçadas, envolvendo a presença de vendedores ambulantes em excesso ou equipamentos comerciais, além dos limites dos estabelecimentos;
  - Má instalação de equipamentos urbanos;

- Travessias de pedestres mal sinalizadas ou mal projetadas;
- escoamento das águas pluviais provenientes de marquises e calhas ou depósito de lixo nas imediações das calçadas;
- Outros.

Observar-se que, apesar da divisão em dois grupos, os fatores citados possuem uma forte interface. Ou seja, um fator que afeta a segurança do pedestre também causa uma queda na qualidade do deslocamento e um fator que acarreta a perda da qualidade, pode prejudicar sua segurança por repeli-lo do passeio, empurrando-o para a via. Porém, ambos contribuem para inibir a circulação dos pedestres nos centros urbanos (MIRANDA; CABRAL, 2002).

Um ambiente viário agradável e seguro envolve, essencialmente, cinco elementos (SARKAR, 2003):

- a separação física de pedestres e do tráfego motorizado;
- o controle do fluxo de pedestres e veículos;
- as condições de visibilidade;
- a comunicação adequada através da sinalização e,
- a assistência aos pedestres com necessidades especiais.

Um projeto apropriado das estruturas para pedestres, baseado nos elementos mencionados, pode incentivar os deslocamentos a pé sem comprometer a segurança e a conveniência dos usuários (HANDY, 1996; SHRIVER, 1997). Além disso, a segurança e o conforto dos pedestres podem ser afetados por mudanças operacionais, como alterações nos tempos semafóricos (GARDER, 1989; LIU *et al.*, 2000).

Em vista de suas características, os pedestres apresentam, no ambiente viário, maior maleabilidade para circular do que qualquer outra modalidade de transporte, sobrepondo-se a todos os inconvenientes encontrados em seu trajeto (CARSTEN *et al.*, 1998; YAGIL, 2000). Para Gondim (2001), talvez este seja um motivo para a desatenção do poder público em relação a estruturas destinadas aos pedestres. Contudo, as formas urbanas e a composição do ambiente viário desempenham um efeito crucial no comportamento de viagem de pedestres (CHU *et al.*, 2003).

### 2.1.1 Comportamento, Percepções e Atitudes de Pedestres

Na literatura, ainda é limitado o número de pesquisas em relação às atitudes e percepções de pedestres, uma vez que a segurança é o motivo de maior preocupação devido ao elevado número de vítimas. Roupail (1984) publicou um dos primeiros estudos sobre percepções de pedestres em relação à infra-estrutura. Esta pesquisa investigou a percepção e a preferência dos usuários em travessias zebradas localizadas em meio de quadra. O autor constatou que os pedestres perceberam esse tipo de travessia não semaforizada como insegura. Entretanto, as mesmas travessias apresentaram alto grau de conveniência para os usuários pelo fato de apresentarem menores atrasos em seus percursos.

Tanaboriboon e Jing (1994) reportam as atitudes de pedestres na China, com relação à adequação das travessias e a espontaneidade dos usuários em utilizá-las. O estudo comparou travessias semaforizadas e travessias elevadas e subterrâneas. Os autores concluíram que usuários possuem maior preferência para travessias semaforizadas em nível frente às elevadas ou subterrâneas, embora as condições de exposição de risco nesse tipo de travessia sejam maiores.

Dentre os trabalhos mais recentes sobre o tema, Hakkert *et al.* (2002) estudaram os efeitos no comportamento de pedestres e motoristas da presença de um sistema luminoso para a detecção de pedestres. Este sistema foi instalado no pavimento da via, próximo às travessias não semaforizadas. As análises foram baseadas em observações do tipo antes e depois. Os resultados mostraram que o número de motoristas que oferece prioridade ao pedestre que está tentando atravessar a via aumentou em aproximadamente 40%. Os autores constataram ainda que, com a implementação dos dispositivos de detecção, o número de pedestres atravessando fora da área da travessia diminuiu em 10%.

Em Michigan, Sisiopiku e Akin (2003) estudaram as percepções e atitudes dos usuários através de entrevistas com pedestres e pesquisa de observação de imagens de vídeo. A análise contemplou tipos distintos de estruturas e dispositivos para pedestres como travessias em interseções (semaforizadas e não semaforizadas), travessias em meio de quadra (semaforizadas, zebreadas e protegidas com coberturas), barreiras físicas (vegetação, blocos de concreto), pavimento colorido e, dispositivos com a mensagem “atravesse apenas quando o tráfego estiver livre”. Os autores concluíram que travessias não semaforizadas localizadas em meio de quadra foram a preferência de 83% dos entrevistados. Ainda, a localização relativa dos pontos de origem e destino dos usuários é o fator que mais influencia a decisão de atravessar em local apropriado, alcançando 90% das respostas.

Keegan e O'Mahony (2003) avaliaram a mudança de comportamento de pedestres após a implementação de contadores de tempo em semáforos, na Irlanda. Os resultados obtidos revelaram que o número de pedestres que iniciavam a travessia após a indicação de luz verde aumentou de 65% para 76%.

No Brasil, não foram encontradas pesquisas com a abordagem do comportamento de pedestres em relação à infra-estrutura. Em vista disto, considera-se oportuno o desenvolvimento de técnicas que permitam avaliar como são utilizadas as estruturas projetadas para pedestres nas áreas urbanas. A seguir são apresentados os aspectos da implantação de travessias.

### 2.1.2 Travessias de Pedestres

As travessias de pedestres são elementos vitais do sistema de transporte. Travessias projetadas e localizadas adequadamente desempenham duas importantes funções (SISIOPIKU, 2000):

- Criar a expectativa dos motoristas de onde os pedestres poderiam atravessar a via e,
- Incentivar os pedestres para o uso adequado das estruturas.

De acordo com o manual de segurança de pedestres elaborado pelo DENATRAN (1979), a implantação de travessias deve restringir-se aos locais onde se possa garantir seu uso correto, buscando atingir o objetivo de aumentar a segurança dos pedestres. Assim, se um dispositivo de travessia em nível é raramente usado, até mesmo nas horas de pico, os motoristas acostumados a trafegar por esse ponto podem tornar-se propensos a conduzir seu veículo sem a devida atenção, ou até mesmo sentir-se impulsionado a não obedecer à sinalização.

Diante deste tipo de situação, um dispositivo de travessia pode transformar-se em uma armadilha, tornando o local mais perigoso do que antes de sua implantação

(DENATRAN, 1979). Desta forma, a escolha do tipo de travessia e sua localização deve, essencialmente, garantir a diminuição dos riscos de acidentes.

De forma geral, existem dois tipos de travessias em nível (DENATRAN, 1979):

- Travessias com faixa para pedestres, sem semáforo e,
- Travessias com semáforo, com faixa para pedestres.

#### 2.1.2.1 Travessias com faixa para pedestres, sem semáforo

As travessias com faixa para pedestres sem a presença de semáforo são indicadas para os locais onde a demanda de pedestres é variável ao longo do dia e a frequência de chegada de pedestres ao local é baixa, intensificando-se somente em alguns períodos. Além disso, o fluxo de veículos no local deve permitir que ocorram brechas entre veículos, de maneira que os pedestres possam atravessar a via com segurança. A implantação de um semáforo em um local com essas características provocaria um retardamento desnecessário para os veículos (DENATRAN, 1979).

No entanto, a simples implantação da faixa de segurança para pedestres representa uma melhoria para os usuários, uma vez que seu objetivo principal é canalizar as trajetórias de travessia, que ocorrem desordenadamente em diversos pontos, para um ponto específico (DENATRAN, 1979). Legalmente, segundo o Código de Trânsito Brasileiro (CTB, 1997), o pedestre que se encontra sobre a faixa de segurança exerce a preferência, devendo o veículo que se aproxima diminuir sua velocidade ou parar para permitir ao pedestre concluir a travessia. Este dever do condutor do veículo representa uma proteção ao pedestre.

No entanto, nem sempre esta recomendação ou obrigação é cumprida. Na prática, observa-se a necessidade de um esclarecimento através de campanhas que alertem os

motoristas quanto aos seus deveres e que divulguem as recomendações para o uso correto da faixa de segurança, tanto para motoristas como para os pedestres, incentivando-os a utilizá-la.

#### 2.1.2.2 Travessias com faixa para pedestres, com semáforo

A instalação de um semáforo em uma travessia se faz necessária em locais onde é indispensável interromper o fluxo de veículos para permitir que os pedestres atravessem a via. Também é recomendável em trechos com grande demanda de travessia de pedestres e com a presença de faixas exclusivas para ônibus, onde pode haver dificuldades de visibilidade por parte dos pedestres. Ainda, um semáforo é apropriado quando o fluxo de pedestres que atravessa a via gera perturbações na fluidez do tráfego veicular, aumentando o retardamento dos veículos (DENATRAN, 1979).

Em travessias dessa natureza, o controle dos semáforos pode ser de dois tipos:

- com tempo de ciclo fixo – neste caso, os períodos de verde, amarelo e vermelho para veículos e de verde e vermelho para pedestres são pré-determinados e cada um deles tem sempre a mesma duração durante a operação do plano semaforico. Porém, ao longo do dia, em decorrência da variação nas condições do tráfego, podem operar diferentes planos semaforicos para o mesmo semáforo.
- acionado pelo pedestre – neste tipo de semáforo, o tempo de amarelo e vermelho para veículos e de verde para pedestres são fixos e pré-determinados. Os períodos de verde para veículos e, conseqüentemente, de vermelho para pedestres variam, pois estes somente são interrompidos no caso de haver demanda de pedestres para atravessar. Nesse tipo de

programação semafórica, é determinado um tempo mínimo de verde para veículos de acordo com as características do fluxo de tráfego. Se o semáforo de pedestres for acionado durante o período mínimo de verde, ao final deste, será liberado o verde para pedestres. Caso contrário, o verde para veículos é contínuo. O tempo mínimo de verde definido pra este tipo de semáforo garante a fluidez do tráfego veicular mesmo se o botão do semáforo for acionado várias vezes seguidas.

As travessias para pedestres com semáforo acionado oferecem a vantagem da eliminação dos retardamentos desnecessários para os veículos nos períodos com reduzido movimento de pedestres, como os períodos noturnos. No entanto, a implantação de um semáforo acionado deve ser antecedida de análise, evitando assim, locais com alto volume de pedestres, onde este tipo de dispositivo passaria a funcionar como um semáforo de tempo de ciclo fixo, tornando o equipamento obsoleto.

A utilização dos semáforos acionados pelos pedestres foi estudada por Davies (1992), na Inglaterra. Os resultados dessa pesquisa mostraram que, em uma cidade de pequeno porte, mais da metade dos pedestres ingleses não utiliza esse tipo de dispositivo em semáforos (51%), enquanto que em Londres, o percentual de pedestres que não aciona o botão para atravessar a via foi 73%. Levelt (1992) realizou um estudo semelhante onde constatou que, em Toulouse, na França, apenas 18% dos pedestres faz uso dessa estrutura. No Brasil, não foram encontrados estudos sobre a utilização desse tipo de semáforo.

A próxima seção traz uma revisão teórica sobre redes neurais artificiais apresentando os conceitos utilizados neste trabalho.



## 2.2 REDES NEURAIIS ARTIFICIAIS

Redes Neurais Artificiais (RNA) podem ser utilizadas na solução de uma grande quantidade de problemas encontrados em diversas áreas. As redes neurais artificiais são eficientes, particularmente, na resolução de problemas que não possuem formulação analítica, ou conhecimento explícito do comportamento das variáveis de entrada, no tratamento de dados contaminados por ruídos ou quando o próprio problema modifica-se com o passar do tempo (OLIVEIRA, 2000). As RNA têm como vantagem, do ponto de vista prático, o fato de não necessitarem de conhecimentos de especialistas para tomar decisões, uma vez que suas respostas se baseiam unicamente em exemplos que lhes são fornecidos, sendo necessário um banco de dados prévio.

### 2.2.1 Conceitos Básicos de Redes Neurais Artificiais

As Redes Neurais Artificiais (RNA) são modelos computacionais compostos de elementos de processamento denominados neurônios artificiais (BRAGA; LUDERMIR, 2002). O objetivo das RNA é simular, de forma simplificada, o funcionamento do cérebro humano para o reconhecimento de padrões de dados. Segundo Haykin (2001), as redes neurais se assemelham ao cérebro humano em dois aspectos:

- O conhecimento é adquirido através da aprendizagem e,
- A intensidade das conexões entre os neurônios é usada para armazenar este conhecimento.

Cada neurônio artificial, em uma rede neural, representa uma unidade de processamento, que calcula determinada função matemática, normalmente não-linear. Os

neurônios artificiais são dispostos em camadas paralelas e conectados por canais de comunicação. Os canais de comunicação, ou conexões, estão associados a coeficientes ponderadores, denominados pesos sinápticos, que realizam operações matemáticas com seus dados locais, recebidos pelas correspondentes conexões. O comportamento “inteligente” das redes neurais artificiais provém das interações entre os neurônios de processamento (DOUGHERTY, 1995).

As principais propriedades das redes neurais artificiais são a capacidade de memorização, generalização e aprendizado. A memorização possui duas dimensões, sendo uma delas a memória temporária, constituída pelo estado recente do sistema como resposta a estímulos recém submetidos, e a outra a memória duradoura, constituída pelos pesos sinápticos resultantes do aprendizado.

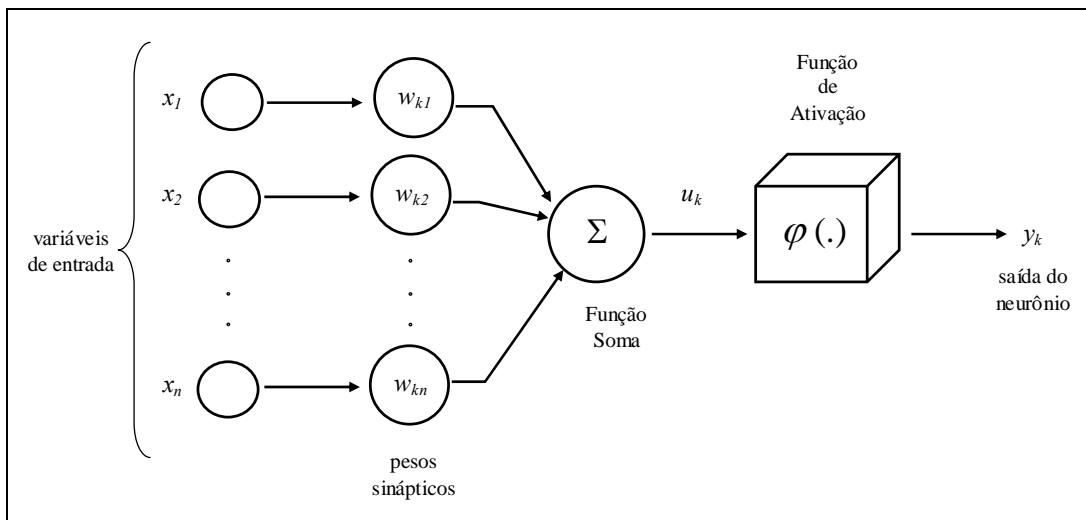
A generalização é a capacidade de uma rede neural artificial poder ser utilizada para casos diferentes daqueles presentes no treinamento, após ter sido treinada para reproduzir um fenômeno a partir de uma amostragem. O aprendizado ou treinamento constitui a capacidade mais notável das redes neurais artificiais, pois proporciona a adaptabilidade para produzir as respostas adequadas para as diversas situações submetidas. O treinamento constitui-se, especificamente, na adaptação dos pesos sinápticos segundo um procedimento matemático, com a finalidade de aproximar as respostas fornecidas e as desejadas, sendo necessário, para tal, um banco de dados prévio.

### 2.2.2 O Neurônio Artificial

A Figura 2 apresenta o modelo básico de um neurônio artificial proposto por McCulloch e Pitts. Estes dois autores desenvolveram o trabalho pioneiro sobre redes neurais

artificiais em 1943. Embora muitas pesquisas venham sendo desenvolvidas sobre o tema, as bases teóricas permanecem as mesmas.

No modelo de McCulloch e Pitts, um conjunto de entradas é aplicado ao neurônio artificial, multiplicado ao peso sináptico correspondente, gerando, dessa forma, entradas ponderadas. Estas entradas são então somadas, obtendo-se um valor que será comparado ao valor limite de ativação do neurônio. Se o valor limite for alcançado, ocorrerá a ativação, caso contrário ocorrerá inibição desse neurônio. O sinal de entrada é então processado pela função de ativação para produzir o sinal de saída. Se o sinal de saída não for igual a zero, este será transmitido adiante.



**Fonte:** adaptado de McCulloch e Pitts (1943) *apud* Cardoso (1999)

**Figura 2** Modelo básico de um neurônio artificial

O modelo de neurônio artificial baseia-se nos constituintes de um neurônio biológico composto de três elementos básicos:

Sinapses ou conexões: são as ligações entre os neurônios. As sinapses são caracterizadas pelos pesos sinápticos ( $w$ ), que representam a sua intensidade. Como já

mencionado, o papel do peso  $w_{kn}$  é multiplicar o sinal  $x_n$  na entrada da sinapse  $n$ , conectada a um neurônio  $k$ . Se o peso  $w_{kn}$  é positivo, então a sinapse associada é dita excitatória. Se o peso  $w_{kn}$  é negativo, a sinapse associada é dita inibitória.

Função Soma: combinação linear dos sinais de entrada ( $x_j$ ), os quais são ponderados pelos respectivos pesos sinápticos ( $w_{kj}$ ) associados. A função soma é representada pela equação (1).

$$u_k = \sum_{j=1}^n w_{kj} x_j \quad (1)$$

onde:

$u_k$  = combinador linear;

$w_{kn}$  = pesos sinápticos;

$x_n$  = variáveis de entrada.

Função de ativação: função responsável pelo envio do sinal de saída do neurônio, restringindo a amplitude desse sinal a um intervalo fechado, geralmente  $[0,1]$  ou  $[-1,1]$ .

$$y_k = \varphi(u_k + b_{0k}) \quad (2)$$

onde:

$y_k$  = sinal de saída do neurônio;

$u_k$  = combinador linear;

$b_{0k}$  = bias, parâmetro de ajuste que tem o efeito de aumentar ou diminuir o nível de excitação dos sinais que chegam ao neurônio;

$\varphi$  = função de ativação.

As funções de ativação mais utilizadas são (HAYKIN, 1994; HERTZ, *et al.*, 1991; LOESCH; SARI, 1996):

Função Limiar – essa função assume valores de 0 ou 1, onde:

$$\varphi(u) = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases} \quad (3)$$

A saída do neurônio, nesse caso será:

$$\begin{aligned} y &= 1 & \text{se } u &\geq 0 \\ y &= 0 & \text{se } u < 0 \end{aligned} \quad (4)$$

Função Linear – essa função assume que o fator de amplificação dentro da região linear de operação é a unidade. Para essa função tem-se que:

$$\varphi(u) = \begin{cases} 1 & u \geq 0,5 \\ u & -0,5 < u < 0,5 \\ 0 & u \leq -0,5 \end{cases} \quad (5)$$

Função Sigmóide – é a forma mais comum utilizada em RNA. É uma função estritamente crescente, que apresenta propriedades homogêneas e assintóticas. A função logística é um tipo de função sigmóide, definida por:

$$\varphi(u) = \frac{1}{1 + e^{(-au)}} \quad (6)$$

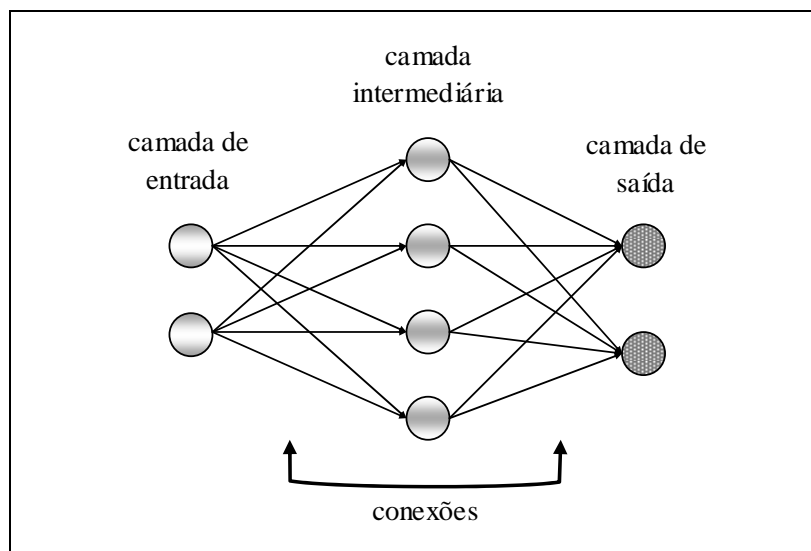
onde:

$a$  = parâmetro de inclinação da função sigmóide. Este parâmetro representa a inclinação da curva da função e pode assumir valores no intervalo fechado de 0 a 1. Quando o

valor de  $a$  tende ao infinito, a função sigmóide torna-se a própria função limiar. A função limiar assume o valor de 0 ou 1, enquanto que a função sigmóide pode assumir valores em uma faixa contínua entre 0 e 1.

### 2.2.3 Arquitetura de Redes Neurais Artificiais

A estrutura das RNA é formada por camadas. A entrada da rede neural não é contabilizada como uma camada pelo fato de apenas distribuir os padrões (WASSERMAN, 1989). Assim, as RNA podem ser de camada única, apresentando somente a camada de saída, ou multicamadas, onde existe a presença de uma ou mais camadas intermediárias ou ocultas. A Figura 3 apresenta em exemplo de uma rede neural artificial com uma camada intermediária.



Fonte: adaptado de Haykin (1994)

**Figura 3** Estrutura de uma rede neural artificial genérica

As arquiteturas de redes de múltiplas camadas (MLP – *Multilayer Perceptron*) constituem os modelos de RNA mais utilizados, envolvendo a solução de problemas com alto grau de não-linearidade. Nessa configuração, os sinais de entrada são propagados camada a

camada pela rede em uma direção positiva, isto é, da entrada para a saída.

As redes MLP possuem um tipo específico de treinamento, denominado supervisionado. A descrição deste treinamento é apresentada na seção 2.2.5. O algoritmo utilizado pelas redes MLP, chamado de retro-propagação do erro, é baseado em uma regra de aprendizagem que corrige o erro durante o treinamento (HAYKIN, 1994).

O processo de retro-propagação do erro é constituído de duas fases: uma fase de propagação do sinal funcional (*feedforward*) e uma de retro-propagação do erro (*backpropagation*). Na primeira fase, os vetores de dados são aplicados nas unidades de entrada, e seu efeito se propaga pela rede, camada a camada. Um conjunto de saídas é produzido com resposta da rede. Durante a fase de propagação, os pesos das conexões são mantidos fixos.

Na retro-propagação do erro, por outro lado, os pesos são ajustados de acordo com uma regra de correção do erro. A resposta da rede em um instante de tempo é subtraída da saída desejada para produzir um sinal de erro. Este sinal de erro é propagado da saída para a entrada, por cada camada, originando a denominação “retropropagação de erro”. Os pesos são ajustados de forma a minimizar a diferença entre a resposta da rede e a resposta desejada. Os passos do algoritmo são apresentados na seção 2.2.6.

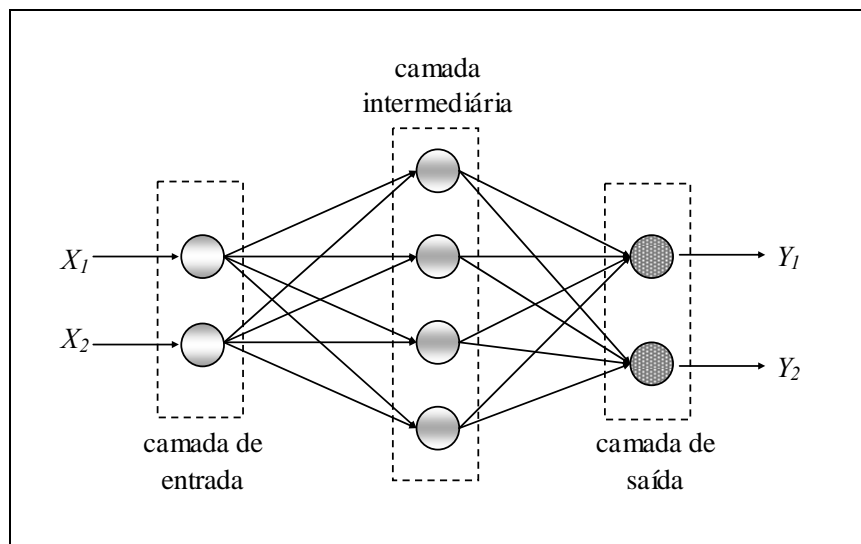
#### 2.2.4 Topologia das Redes Neurais Artificiais

As topologias de redes neurais, de forma geral, podem ser divididas em duas categorias (LAWRENCE, 1994):

- Diretas ou não-Recorrentes e,
- Recorrentes

As RNA diretas são aquelas que não possuem realimentação de suas saídas para suas entradas e por isso são também ditas "sem memória". Esse tipo de rede pode ser considerado um aproximador universal de funções, sendo que seu nível de precisão dependerá principalmente do número de neurônios, bem como da escolha eficiente do conjunto de exemplos (HAYKIN, 1994). O formato de uma RNA direta é ilustrado na Figura 4.

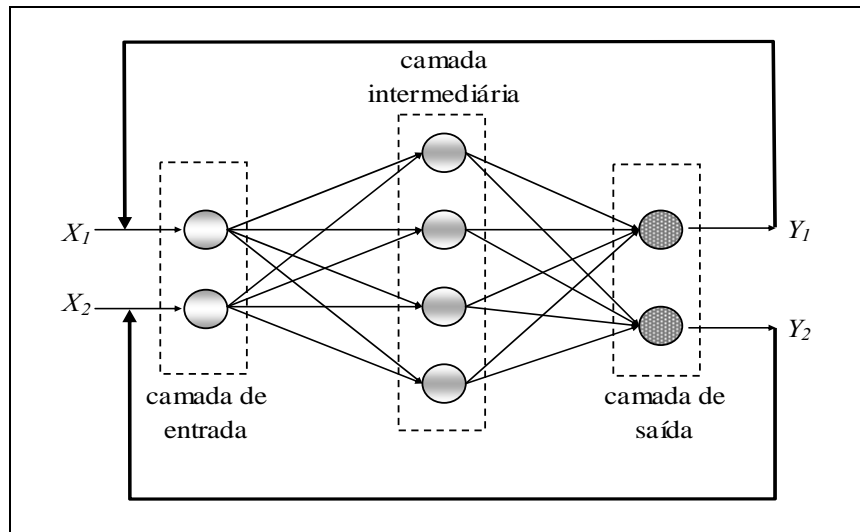
As redes neurais recorrentes são aquelas que contém pelo menos um ciclo de realimentação. Os dados de saída ajudam a determinar, em conjunto com o processamento da rede, os novos dados de saída, caracterizando um processo iterativo de diminuição da grandeza do erro. As estruturas das RNA recorrentes não são obrigatoriamente organizadas em camadas. No entanto, quando a organização é através de camadas, essas redes podem possuir interligações entre neurônios da mesma camada e entre camadas não consecutivas, gerando conexões mais complexas que nas redes diretas (ROISENBERG, 1999). A Figura 5 apresenta um exemplo de rede neural recorrente.



Fonte: adaptado de Fu (1994)

**Figura 4** Rede Neural Direta ou Não Recorrente





Fonte: adaptado de Fu (1994)

**Figura 5** Rede Neural Recorrente

Nas RNA recorrentes, os neurônios têm conexões com eles mesmos ou com outros neurônios, excitadores ou inibidores. Depois de determinada troca de sinais, os neurônios que possuem uma saída ativa permitem aos neurônios de sua camada atualizarem seus pesos. No caso de redes estáveis, ou seja, redes que podem convergir a um resultado ótimo, esse processo é realizado várias vezes, produzindo variações nas saídas até atingir o resultado ótimo.

### 2.2.5 Tipos de Treinamento

O objetivo do treinamento de uma RNA é fazer com que a aplicação de um conjunto de entradas produza um conjunto de saídas desejado ou, no mínimo, um conjunto de saídas consistentes. Cada conjunto de entrada ou saída é chamado de vetor. O treinamento é realizado pela aplicação sequencial dos vetores de entradas, ou em alguns casos também os de saída, enquanto os pesos da rede são ajustados de acordo com um procedimento de treinamento pré-determinado. Durante o treinamento, os pesos da rede convergem

gradualmente para determinados valores, tal que a aplicação dos vetores de entrada produza as saídas necessárias.

Os procedimentos de treinamento que permitem que as RNA aprendam determinadas tarefas podem ser classificados em dois tipos:

- Supervisionado
- Não Supervisionado

O treinamento supervisionado necessita de um par de vetores composto do vetor de entrada e do vetor alvo que se deseja como saída. Juntos, estes vetores são chamados de par de treinamento ou vetor de treinamento. As RNA são treinadas com vários vetores de treinamento.

O procedimento de treinamento funciona da seguinte forma: o vetor de entrada é aplicado. A saída da rede é calculada e comparada com o correspondente vetor alvo. O erro encontrado é então realimentado através da rede e os pesos são atualizados por meio de um algoritmo a fim de minimizar este erro. Este processo de treinamento é repetido até que o erro para os vetores de treinamento tenha alcançado um nível aceitável estabelecido.

O treinamento não supervisionado, por sua vez, não requer vetor alvo para as saídas e, obviamente, não faz comparações para determinar a resposta ideal. O conjunto de treinamento modifica os pesos da rede de forma a produzir saídas que sejam consistentes, isto é, tanto a apresentação de um dos vetores de treinamento como a apresentação de um vetor similar irão produzir o mesmo padrão nas saídas.

Este tipo de treinamento é usado em sistemas de classificação, quando não existem dados de saída desejados para o treino da rede neural. O processo de treinamento extrai as propriedades estatísticas do conjunto de treinamento e agrupa os vetores similares em classes.

A aplicação de um vetor de uma determinada classe à entrada da rede irá produzir um vetor de saída específico. No entanto, não existe maneira de se determinar, antes do treinamento, qual o padrão que será produzido na saída para um vetor de entrada de uma determinada classe. Se um novo padrão é identificado e este não possui classe definida, uma nova classe é criada para associá-lo. Desta forma, a saída de algumas RNA deve ser transformada em uma forma compreensível após o processo de treinamento, tornando-se um simples problema de identificação das relações entre entradas e saídas da rede.

No que diz respeito aos algoritmos de treinamento usados, existe uma grande variedade, tanto para o treinamento supervisionado, como para o não supervisionado. Entre estes, o mais difundido é o algoritmo de retropropagação de erros, ou *backpropagation*. Este algoritmo é utilizado neste trabalho e sua descrição é apresentada a seguir.

#### 2.2.6 O Algoritmo de Retropropagação de Erros

O algoritmo de retropropagação do erro, também conhecido com regra delta generalizada, fornece à rede um conjunto de pares de entradas e saídas, onde para cada entrada do treinamento tem-se uma saída desejada. Este algoritmo é um método de gradiente descendente, que não garante a obtenção do mínimo erro global. De forma geral, pode ser dividido em cinco passos (LOESCH; SARI, 1996):

Passo 1 – Apresentação de um padrão de entrada e da saída desejada.

Utilizando uma determinada estratégia de apresentação, são alocados os padrões de entrada e saída nas suas respectivas camadas, e então é ativado o passo de cálculo dos valores da saída.

Passo 2 – Cálculo dos valores de saída.

A partir da primeira camada, é permitido que cada camada produza valores da saída até atingir a camada de saída e, então, é ativado o passo de ajuste dos pesos da camada de saída.

Passo 3 – Ajuste dos pesos da camada de saída.

Para cada neurônio  $j$  da camada de saída, são atualizados todos os pesos  $w_{ij}$  conforme a equação (7), quando então é ativado o passo de ajuste dos pesos das camadas escondidas.

$$\Delta w_{ij} = \eta \delta_j o_i \quad (7)$$

onde:

$\eta$  = taxa de aprendizado

$o_i$  = saída do neurônio

$\delta_j$  = diferença correspondente ao erro entre a saída computada e a saída desejada do neurônio  $j$ , que pode ser calculada segundo a equação (8):

$$\delta_j = o_j (d_j - o_j)(1 - o_j) \quad (8)$$

onde:

$d_j$  = saída desejada de  $n_j$

Passo 4 – Ajuste dos pesos das camadas intermediárias.

Para ajustar os pesos de todas as camadas intermediárias, é atualizado o peso  $w_{ij}$  de um neurônio  $n_i$  de uma camada intermediária que está ligado a outro neurônio  $n_k$  na camada anterior, conforme a equação (9).

$$\Delta w_{ij} = \eta \delta / i o_k \quad (9)$$

onde:

$\eta$  = taxa de aprendizado

$o_k$  = saída do  $n_k$ , estimula  $n_i$  via  $w_{ki}$

$\delta / i$  = erro relativo do neurônio  $n_i$ , dado pela equação (10).

$$\delta / i = o_i (1 - o_i) \sum w_{ij} \delta_j \quad (10)$$

Depois que todas as conexões tenham sido ajustadas é ativado o passo de verificação da magnitude do erro.

#### Passo 5 – Verificação da magnitude do erro

Para a verificação da magnitude do erro, pode-se adotar várias estratégias diferenciadas quanto à forma de aceitar o erro como desprezível. Uma regra comum é verificar se o erro global da saída da rede é menor que um dado erro pré-definido. Se a condição adotada é satisfeita, então a rede aprendeu o conjunto de treinamento, caso contrário deve-se voltar ao passo de apresentação de um padrão de entrada e da saída desejada. Assim, o algoritmo é finalizado.

O algoritmo de retropropagação do erro pode ser utilizado em uma arquitetura com qualquer número de camadas. O passo 4 é ativado recursivamente até atingir a camada de entrada. Para aumentar a velocidade de convergência é possível introduzir na equação (8) um multiplicador chamado *momentum*, que considera o efeito dos ajustes feitos anteriormente.

### 2.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Dentre os trabalhos encontrados na literatura sobre a circulação de pedestres em áreas urbanas, poucos são relacionados ao comportamento dos usuários em travessias semaforizadas. Destaca-se, porém, a importância deste tipo de travessia por apresentar a maior concentração de conflitos entre pedestres e veículos, resultando em pontos de grande risco para pedestres.

No que diz respeito ao projeto de travessias, considera-se oportuna a análise das condições de sua utilização. Assim, é possível julgar o efeito de sua implantação e comparar o comportamento dos pedestres e motoristas no local. Mediante a consolidação do uso da travessia, um acompanhamento sistemático poderia auxiliar em intervenções necessárias decorrentes das mudanças nos fluxos e rotas de pedestres e veículos ao longo do tempo.

Neste sentido, modelos que auxiliam a compreensão do comportamento de pedestres são úteis para o planejamento e monitoramento das condições das travessias. Neste trabalho utilizou-se RNA como ferramenta de previsão e análise do comportamento de pedestres. As técnicas de modelagem com RNA são usadas em diferentes áreas de pesquisa obtendo sucesso na solução de problemas com alta complexidade onde as variáveis obedecem a relações não-lineares. Na literatura são encontrados diversos trabalhos onde os autores optaram pela utilização de técnicas de inteligência artificial ao invés de modelos estatísticos de previsão (STARRETT; ADAMS, 1997; PARUELO; TOMASEL, 1997; RAMOS-NINO *et al.*, 1997; ÖZESMI; ÖZESMI, 1999; MANEL *et al.*, 1999). As principais áreas de pesquisa que utilizam RNA com sucesso envolvem o reconhecimento de padrões, controle de sistemas, otimização, processamento de sinais e previsão de dados.

O próximo capítulo contempla a proposição de um modelo conceitual que permite analisar como o padrão de comportamento de pedestres pode influenciar o uso de travessias controladas por semáforo. A contribuição do modelo está inserida no contexto de planejamento da implantação de travessias semaforizadas e no monitoramento das condições de sua operação.

### **3 MODELO CONCEITUAL DO PADRÃO DE COMPORTAMENTO DE PEDESTRES EM TRAVESSIAS SEMAFORIZADAS**

No ambiente viário, os pedestres possuem várias alternativas de escolha ao atravessar uma via. No entanto, a decisão de onde e em que momento realizar a travessia é influenciada pelas condições de todo o ambiente viário. Do ponto de vista da engenharia de tráfego, os principais fatores que influenciam as perspectivas operacionais e de segurança dos usuários envolvem:

- a localização de preferência dos pedestres para a travessia;
- as condições sob as quais eles decidem atravessar a via e,
- as características do fluxo viário.

Contudo, a escolha do local para realização de uma travessia pelos pedestres pode estar relacionada a três fatores principais:

- o desejo do pedestre de percorrer uma menor distância;
- o desejo de realizar uma travessia no menor tempo e,
- a necessidade de reduzir a exposição ao risco de acidentes.

A literatura sugere que o comportamento adotado pelos pedestres no processo que envolve a tarefa de atravessar uma via caracteriza a conformidade de travessia (ROUPHAIL, 1984). A conformidade de travessia representa a adequação ao uso das estruturas pelos pedestres. No caso das travessias semaforizadas, ela pode ser de dois tipos: espacial e temporal. A descrição de ambas é apresentada nas próximas seções.

A análise do comportamento de pedestres pode ser realizada a partir da categorização das diferentes classes de usuários em função de seus padrões de comportamento. Sisiopiku e



Akin (2003) sugerem a classificação dos pedestres em relação à conformidade de travessia espacial. Liu *et al.* (2000), na descrição do modelo de simulação de movimentos de pedestres e veículos, classificam os pedestres de acordo com o conceito de conformidade de travessia temporal.

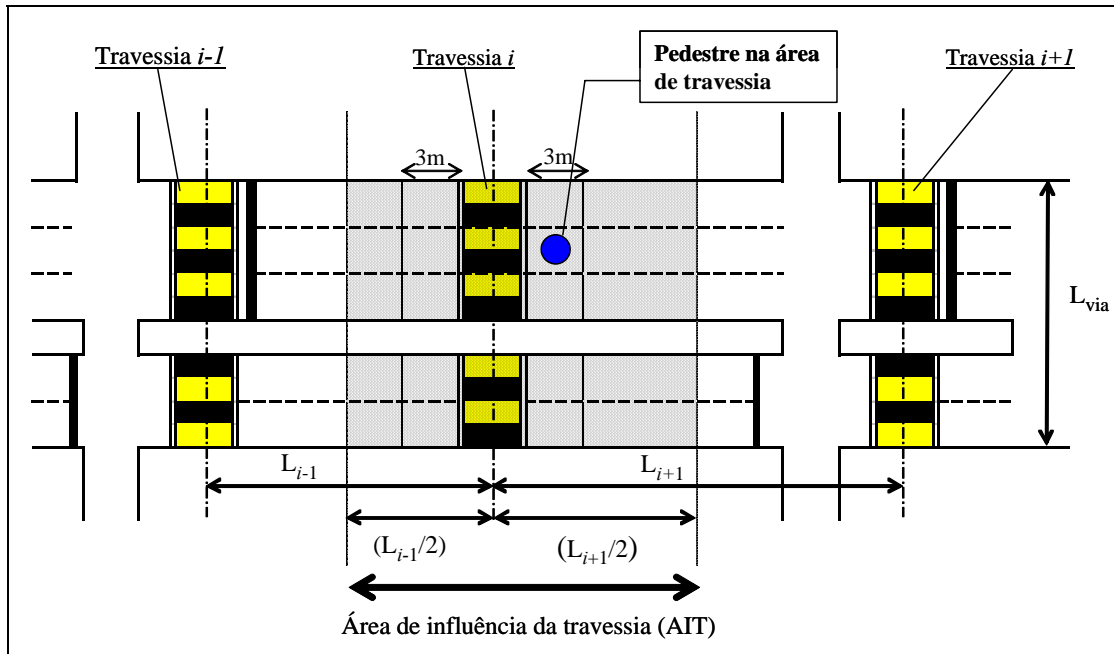
A partir dessas considerações, o modelo conceitual desenvolvido neste trabalho agrega as duas abordagens do comportamento de pedestres e propõe uma estrutura para compreensão de suas atitudes ao realizarem uma travessia, de acordo com o local e o momento escolhidos. O objetivo do modelo é analisar o padrão de comportamento de usuários e identificar os fatores que influenciam suas ações e percepções em relação às travessias semaforizadas. A seguir são apresentadas as definições de conformidade de travessia espacial e temporal.

### 3.1 CONFORMIDADE DE TRAVESSIA ESPACIAL (CTE)

O conceito de conformidade de travessia espacial (CTE) é baseado na hipótese de que cada travessia possui uma área de influência, para a qual atrai os pedestres que atravessam em determinada via. A área de influência da travessia (AIT) compreende a metade da distância entre duas travessias consecutivas, considerando uma linha imaginária a partir da linha central de cada uma, multiplicada pela largura da via. Na área de influência, a área da travessia (AT), propriamente dita, abrange a porção da via localizada dentro de três metros para ambos os lados da travessia multiplicada pela largura da via (SISIOPIKU; AKIN, 2003).

A Figura 6 representa as definições de área de travessia (AT) e área de influência de travessia (AIT) para uma travessia genérica  $i$ . As distâncias entre travessias consecutivas  $i-1$ ,

$i$ , e  $i+1$  são  $L_{i-1}$  e  $L_{i+1}$ . Logo, a AIT para a travessia  $i$  é o produto da soma  $L_{i-1}/2$  e  $L_{i+1}/2$ , pela largura da via  $L_{via}$ .



Fonte: adaptado de Sisiopiku e Akin (2003)

**Figura 6** Área da Travessia (AT) e Área de Influência da travessia (AIT)

Assim, a conformidade de travessia espacial expressa a quantidade de pedestres que atravessa a via em local apropriado para a travessia. Com relação à conformidade espacial, os pedestres podem ser classificados em dois tipos (SISIOPIKU; AKIN, 2003):

- **prudentes**, são aqueles que realizam a travessia na localização apropriada, ou seja, na área da travessia e;
- **imprudentes**, são aqueles que atravessam fora da área da travessia.

O índice correspondente à conformidade de travessia espacial é apresentado na equação (11).

$$CTE_i = \frac{P_i^{AT}}{P_i^{AIT}} * 100 \quad (11)$$

onde:

$P_i^{AT}$  : n° de pedestres atravessando na área da travessia (ped/intervalo de tempo)

$P_i^{AIT}$  : n° de pedestres na área de influência da travessia (ped/intervalo de tempo)

### 3.2 CONFORMIDADE DE TRAVESSIA TEMPORAL (CTT)

A conformidade de travessia temporal (CTT) é dada em relação à indicação de luz verde para os pedestres no semáforo. Esta medida proporciona informações sobre o grau de paciência dos pedestres frente ao tempo semafórico. Assim, em relação à conformidade de travessia temporal, os pedestres podem ser classificados em duas categorias (LIU *et al.*, 2000):

- **obedientes**, são pedestres que aguardam a indicação de luz verde no semáforo para iniciar a trajetória da travessia e;
- **oportunistas**, representam os pedestres que atravessam a via durante o sinal vermelho, se houver uma brecha disponível na corrente de tráfego de veículos.

O índice que expressa a conformidade de travessia temporal é apresentado na equação (12).

$$CTT_i = \frac{P_i^{TV}}{P_i^{AT}} * 100 \quad (12)$$

onde:

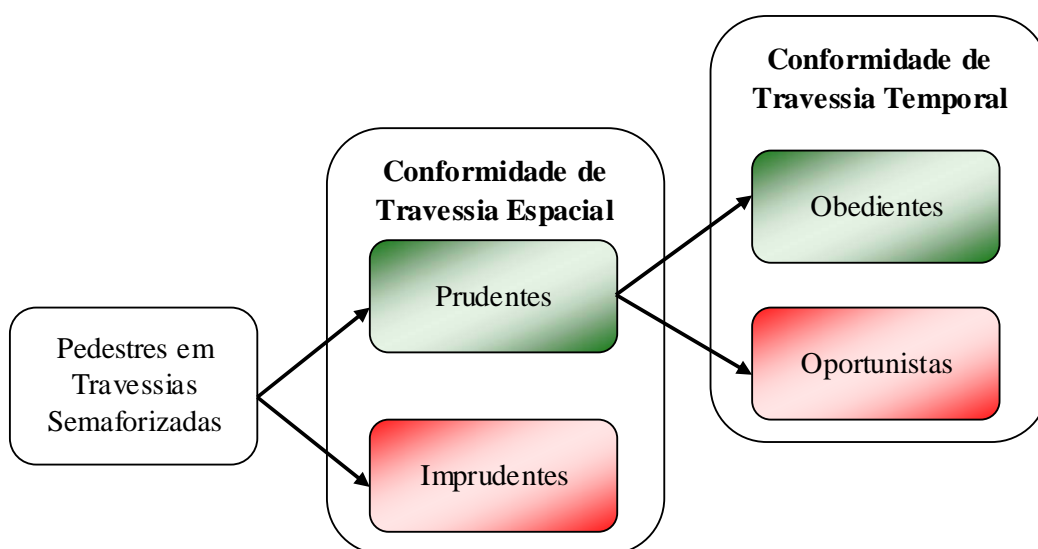
$P_i^{TV}$  : n° de pedestres atravessando na área da travessia com a indicação da luz verde para pedestres no semáforo (ped/intervalo de tempo)

$P_i^{AT}$  : n° de pedestres na área da travessia (ped/intervalo de tempo)

É importante ressaltar que as equações (11) e (12) diferem em seu denominador pelo fato de não ser conveniente considerar a conformidade temporal quando pedestres desobedecem a localização das travessias, realizando a trajetória de caminhada fora da área indicada. Assim, a conformidade espacial é a condição necessária para a conformidade temporal.

### 3.3 ESTRUTURA DO MODELO

Os conceitos de conformidade de travessia apresentado nas seções anteriores permitem a construção do modelo conceitual de análise do comportamento de pedestres em travessias semaforizadas. A Figura 7 representa a descrição esquematizada do modelo envolvendo os quatro grupos de pedestres.



**Figura 7** Estrutura do modelo conceitual de análise do comportamento de pedestres

De forma geral, os pedestres em conformidade com a travessia são representados pelos prudentes e obedientes. Os pedestres imprudentes e oportunistas compõem o grupo de usuários que está potencialmente em risco. No entanto, deve-se considerar que a conformidade de travessia é diretamente relacionada às características locais, à composição e regime do fluxo de veículos e à natureza dos conflitos que ocorrem na travessia. Desta forma, pode haver situações em que o comportamento adotado por esses usuários não revele situações de risco iminente.

#### 3.4 FATORES INTERVENIENTES NAS CONFORMIDADES DE TRAVESSIA

Como já apresentado anteriormente, ao realizar uma travessia, diversas características podem influenciar o comportamento de pedestres. No entanto, as condições ambientais mais importantes que intervêm na escolha do local e momento de iniciar uma travessia referem-se diretamente aos aspectos físicos de cada local e às características de intensidade, composição e velocidade do fluxo veicular. Assim, os fatores potencialmente responsáveis por alterações nas conformidades podem ser classificados em duas categorias:

- Fatores viário-ambientais fixos – representam as características locais da travessia e envolvem aspectos físicos de geometria e condições de entorno.

Podem incluir:

- Largura da via;
- Largura da travessia ou faixa de segurança;
- Tipo e condições de pavimento na via;
- Presença de estacionamento na via;
- Tempo de ciclo semafórico;

- *Gap* crítico;
- Outros.

Neste trabalho, foram considerados: largura da via, largura da travessia, *gap* crítico e tempo de espera pelo verde no semáforo. Este último representa o tempo máximo que o pedestre esperaria até o semáforo indicar luz verde para sua travessia. Na situação mais crítica, esse tempo corresponde ao estágio de verde para veículos, supondo a chegada do pedestre à beira da calçada quando esse período é iniciado.

- Fatores viário-ambientais variáveis – correspondem aos parâmetros que estão sujeitos a alterações em períodos distintos. Podem incluir:
  - Condições climáticas;
  - Presença de obras viárias;
  - Volume de pedestres;
  - Volume de veículos;
  - Velocidade dos veículos;
  - Distribuição de *gaps* na corrente de tráfego;
  - Outros.

Os fatores viário-ambientais variáveis analisados nesta pesquisa foram: volume de pedestres, volume de veículos, velocidade dos veículos e distribuição de *gaps*.

Um *gap*, ou brecha, na corrente de tráfego, corresponde ao tempo transcorrido entre a passagem do pára-choque traseiro de um veículo e o pára-choque dianteiro do veículo seguinte por um ponto determinado (FRICKER; WHITFORT, 2004). A análise de *gaps* descreve o comportamento dos usuários, como a probabilidade de aceitar uma brecha na

corrente de tráfego tendo em vista o desejo de atravessar uma via (PAPACOSTAS; PREVEDOUROS, 2001).

O comportamento de aceitação de brechas é um processo complexo. As condições física e mental do pedestre, a percepção de risco e as características do tráfego influenciam a decisão de aceitar ou rejeitar uma brecha (MATSON, *et al.*, 1995). Essa decisão também é influenciada, dentre outros fatores, pela velocidade de aproximação dos veículos, a largura da via, a distribuição de frequência dos *gaps* na corrente de tráfego e o tempo de espera (ROESS *et al.*, 2004).

Desta forma, cada pedestre assume um tipo de risco ao tentar a travessia. Esse risco refere-se ao tempo mínimo que um usuário considera necessário para realizar determinada trajetória com segurança. Esse tempo mínimo é denominado *gap* crítico (FRICKER; WHITFORT, 2004). Normalmente, *gaps* iguais ou maiores do que o crítico são aceitos e *gaps* menores são rejeitados. É importante ressaltar que os indivíduos podem assumir diferentes *gaps* críticos. Na maioria dos casos, é aceitável utilizar o *gap* crítico médio para descrever o comportamento de todos os indivíduos (PLINE, 1992).

### 3.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo apresentou um modelo conceitual que subsidia a compreensão do comportamento de pedestres em travessias semaforizadas. O comportamento dos usuários apresenta características bastante complexas, sendo resultado da interação entre fatores viário-ambientais fixos e variáveis, e características individuais dos pedestres.

A viabilidade de aplicação do modelo exige a consideração de variáveis objetivas e de fácil mensuração. O próximo capítulo apresenta o processo de coleta de dados realizado nos locais definidos para o estudo.



#### **4 LEVANTAMENTO DOS DADOS**

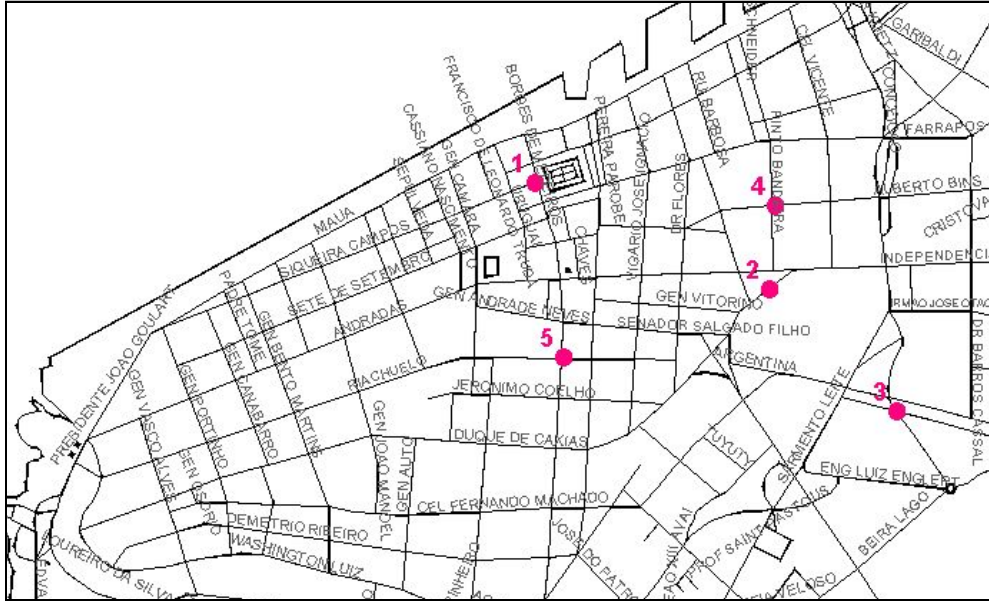
Para avaliar a viabilidade de utilização do modelo conceitual proposto neste trabalho foi realizado um levantamento de dados em Porto Alegre. As técnicas de coleta utilizadas envolveram a realização de filmagens de travessias e a aplicação de questionários aos pedestres das áreas de estudo. O objetivo do levantamento de dados através de imagens é permitir a observação de parâmetros do comportamento assumido pelos pedestres e quantificar as variáveis relacionadas com o tráfego veicular. A finalidade da realização de entrevistas é investigar as percepções dos pedestres sobre o seu comportamento e sobre os fatores que podem interferir em suas ações.

O estudo foi realizado em cinco travessias semaforizadas localizadas na região central da cidade. Os critérios utilizados para escolha das travessias consideraram aspectos de sua localização, da circulação de pedestres e das condições do tráfego de veículos. Assim, as características observadas para seleção das travessias foram:

- Via com alto volume de veículos;
- Região com alto volume de pedestres e,
- Distintas condições de uso do solo da região.

A Figura 8 mostra a localização das travessias selecionadas que correspondem à:

- 1** – Travessia na interseção entre a rua Siqueira Campos e a av. Borges de Medeiros;
- 2** – Travessia em meio de quadra na rua Prof. Annes Dias, em frente à praça Dom Feliciano;
- 3** – Travessia na interseção entre a av. Paulo Gama e a av. Osvaldo Aranha;
- 4** – Travessia na interseção entre a av. Alberto Bins e a rua Pinto Bandeira e;
- 5** – Travessia na interseção entre a rua Riachuelo e a av. Borges de Medeiros.



**Figura 8** Localização das travessias selecionadas para o estudo

A rua Siqueira Campos situa-se em uma área que dispõe de serviços administrativos e comerciais. A região abrange a Prefeitura, o Mercado Público Municipal e alguns dos principais terminais de ônibus do centro. O tráfego de pedestres nesta região é desordenado, onde os fluxos são dispersos na região próxima à travessia. A imagem dessa travessia é apresentada na Figura 9.



**Figura 9** Travessia de pedestres na rua Siqueira Campos

A rua Prof. Annes Dias situa-se em uma área que oferece serviços predominantemente relacionados à saúde, incluindo um complexo hospitalar. A região também abrange alguns importantes pontos de ônibus. O tráfego de pessoas próximo à travessia é ordenado devido à presença de dispositivos de canalização do fluxo de pedestres. A Figura 10 apresenta a imagem dessa travessia.

É importante destacar que, no trecho da via estudado, o fluxo viário possui dois sentidos. No entanto, devido ao baixo volume de veículos que trafega no sentido bairro-centro, foram considerados na coleta de dados somente os parâmetros do fluxo veicular no sentido centro-bairro.



**Figura 10** Travessia de pedestres na rua Prof. Annes Dias

A av. Paulo Gama está localizada próximo à duas importantes instituições de ensino, incluindo um *campus* universitário. O tráfego de pedestres nessa região é ordenado, uma vez que a travessia encontra-se no alinhamento natural da calçada. A Figura 11 mostra a imagem dessa travessia.





**Figura 11** Travessia de pedestres na av. Paulo Gama

A rua Riachuelo localiza-se em uma área que oferece serviços administrativos e comerciais. Nessa região, o tráfego de pedestres é ordenado, uma vez que a travessia é alinhada à calçada. A travessia da rua Riachuelo é apresentada na Figura 12.



**Figura 12** Travessia de pedestres na rua Riachuelo

A av. Alberto Bins situa-se em uma área predominantemente comercial. Nessa região, o tráfego de pedestres é desordenado, isto é, os trajetos não são canalizados para a travessia.



**Figura 13** Travessia de pedestres na av. Alberto Bins

A escolha dos locais de estudo buscou a maior diversidade possível de características para permitir que a influência de cada parâmetro sobre o comportamento dos pedestres pudesse ser melhor avaliada. Aspectos geométricos e de controle semafórico foram considerados.

A Tabela 1 descreve as principais características das travessias estudadas, onde o volume de pedestres, volume de veículos e sua velocidade correspondem aos valores observados na coleta de dados. A próxima seção descreve o processo utilizado para quantificação desses parâmetros.

**Tabela 1** Características dos locais de estudo

	<b>Rua Siqueira Campos</b>	<b>Rua Prof<sup>o</sup> Annes Dias</b>	<b>Av. Paulo Gama</b>	<b>Rua Riachuelo</b>	<b>Av. Alberto Bins</b>
Número de faixas	3	3	4	2	3
Largura da via	20 m	10 m	15 m	7 m	8 m
Largura da travessia de pedestres <sup>1</sup>	6m	5,5m	3,6m	4,5m	3,5m
Tempo de ciclo semafórico <sup>2</sup>	70 seg	100 seg	95 seg	40 seg	80 seg
Tempo de espera pelo verde no semáforo <sup>3</sup>	53 seg	84 seg	53 seg	15 seg	55 seg
Velocidade média coletada	26,5 km/h	23,8 Km/h	44,5 Km/h	30,5 Km/h	40,2 Km/h
Volume médio de pedestres observado	2395 ped/h	939 ped/h	1463 ped/h	1606 ped/h	429 ped/h
Volume médio de veículos observado	1795 veic/h	1707 veic/h	2631 veic/h	523 veic/h	865 veic/h

<sup>1</sup> De acordo com o Manual de Segurança de Pedestres (DENATRAN, 1979), a largura mínima de travessia é de 2m.

<sup>2</sup> Os semáforos das travessias estudadas operam com tempo de ciclo fixo em horários determinados.

<sup>3</sup> O tempo de espera pelo verde no semáforo pelos pedestres refere-se ao tempo de verde para veículos no ciclo semafórico.

#### 4.1 LEVANTAMENTO DOS DADOS POR FILMAGENS

As filmagens das travessias foram realizadas no período da tarde e tiveram duração de uma hora e meia em cada local, exceto para a rua Siqueira Campos onde foram realizadas duas horas e meia de coleta. A hora adicional desse local refere-se ao estudo piloto cujos dados também foram utilizados neste trabalho. O estudo piloto é apresentado em Ariotti e Cybis (2005). A observação das imagens subsidiou a determinação das conformidades de travessia através da contagem do número de pedestres nas áreas da travessia e áreas de influência da travessia.

Devido à variabilidade do regime de fluxo de veículos e pedestres ao longo do tempo e dos diferentes comprimentos dos ciclos semaforicos de cada local, o período de coleta foi fracionado em intervalos de dois minutos. Assim, considerou-se a observação de, pelo menos, um ciclo semaforico completo em cada intervalo de análise.

A observação das filmagens permitiu a quantificação dos volumes de pedestres, de acordo com a classificação sugerida pelo modelo conceitual. A partir desses dados, as conformidades de travessia espacial e temporal foram determinadas. As demais variáveis extraídas das filmagens envolveram as características do tráfego veicular, como volumes de veículos, velocidades e distribuição de *gaps*.

A determinação das variáveis ocorreu em quatro etapas. Desta forma, cada filmagem foi analisada quatro vezes, totalizando, no mínimo, 34 horas de observação. A primeira etapa, onde foram necessários dois observadores, contemplou a contagem dos pedestres prudentes e imprudentes, compondo os volumes totais de pedestres para cada travessia. Na segunda etapa,

foram determinados os volumes de veículos e o número de pedestres oportunistas. Essa etapa foi realizada por um observador.

As demais etapas do levantamento de dados a partir das filmagens foram realizadas com o auxílio de um temporizador. O temporizador foi construído em linguagem Java com o intuito de automatizar a captação dos tempos. O programa registra a passagem do tempo enquanto o observador aciona botões de ação identificando os eventos necessários para coleta de determinado dado.

A terceira etapa envolveu a determinação das velocidades dos veículos nas vias. Para isto, foram definidos, em campo, dois pontos na via que foram identificados na imagem de vídeo. O início da observação da filmagem ocorreu simultaneamente com o início do temporizador. Através deste, foi determinado o tempo gasto pelos veículos para percorrer a distância entre os dois pontos definidos. Os veículos escolhidos para a medição desse tempo foram selecionados aleatoriamente, desprezando aqueles que se encontravam no início da fila do semáforo. Com os dados de tempo coletados, as velocidades foram calculadas através da divisão da distância percorrida pelo tempo gasto. Para cada intervalo de análise de dois minutos, foi considerada a velocidade média dos veículos naquele intervalo.

A quarta etapa envolveu a determinação da distribuição de *gaps*, também com a utilização do temporizador. A partir da definição de um ponto de referência na imagem de vídeo foram registradas a passagem do pára-choque traseiro de um veículo, marcando o início do *gap* e, a passagem do pára-choque dianteiro do veículo seguinte, caracterizando o final do *gap*. No entanto, a coleta da distribuição de *gaps* só foi possível para uma das faixas de tráfego. Em função das condições de trafegabilidade das vias, adotou-se como critério, a definição da faixa de tráfego mais carregada, ou seja, a de maior fluxo. Assim, a partir da



distribuição de *gaps* de cada local, para cada intervalo de dois minutos, obteve-se o valor do *gap* máximo e do 85º percentil de *gaps*. A terceira e a quarta etapa também foram realizadas por um observador.

Ainda na quarta etapa, foram registrados quais dos *gaps* entre veículos foram aproveitados pelos pedestres para realizar a travessia. Desta forma, para cada local de estudo foram definidas as distribuições dos *gaps* aceitos e rejeitados. Em função das diferenças de escala entre os *gaps* aceitos e rejeitados, foram calculadas percentagens acumuladas para o tratamento dos dados na mesma base. A partir disto, foram definidas duas curvas de frequências acumuladas para os *gaps* observados. O ponto de cruzamento das duas curvas caracterizou o *gap* crítico ( $t_c$ ) daquele local. A equação (13) representa a expressão matemática de interpolação das curvas para o cálculo do *gap* crítico.

$$t_c = t_1 + \frac{(t_2 - t_1)[R(t_1) - A(t_1)]}{[A(t_2) - R(t_2)] + [R(t_1) - A(t_1)]} \quad (13)$$

onde,

$t_1$  = comprimento do *gap* que define o limite inferior do intervalo que compreende o ponto de interseção das curvas.

$t_2$  = comprimento do *gap* que define o limite superior do intervalo que compreende o ponto de interseção das curvas.

$A(t_i)$  = nº de *gaps* de comprimento  $i$  aceitos

$R(t_i)$  = nº de *gaps* de comprimento  $i$  rejeitados

As curvas das frequências acumuladas para os *gaps* observados e a determinação do *gap* crítico para cada local de estudo são apresentadas no apêndice. É importante observar que a definição de *gap* crítico utilizada neste trabalho não é propriamente a definição tradicional,

devido à simplificação necessária de considerar apenas uma faixa de tráfego para viabilizar a coleta de dados.

## 4.2 ENTREVISTAS COM PEDESTRES

As entrevistas com pedestres foram realizadas com o objetivo de obter informações sobre os hábitos e preferências dos pedestres em relação à sua escolha do local e do momento para realizar determinada travessia e, ainda, investigar se os pedestres percebem a influência dos fatores fixos e variáveis em seu comportamento. A realização dessa pesquisa ocorreu nas imediações das cinco travessias estudadas. Os pedestres entrevistados foram escolhidos aleatoriamente e abordados enquanto caminhavam pelas calçadas ou quando estavam em pontos de espera de ônibus próximos da travessia. As entrevistas ocorreram em diferentes dias da semana e em diversos horários do dia, porém não coincidentes com a coleta de imagens.

Uma amostra foi dimensionada utilizando-se a metodologia proposta por Ribeiro *et al.* (2000). Considerou-se como variável de estratificação a localização da travessia, devido às características particulares de cada local de estudo. Assim, têm-se cinco níveis para a variável de estratificação.

O número de estratos é o produto do número de níveis das variáveis de estratificação (Ribeiro *et al.*, 2000). No caso deste trabalho, o número de estratos é igual a cinco. O número máximo de agrupamentos por estrato é o produto do número de níveis das duas variáveis de estratificação que apresentam o maior número de níveis (Ribeiro *et al.*, 2000). Assim, o número máximo de agrupamentos corresponde a cinco. Para calcular o número de questionários por agrupamento toma-se a aproximação pela distribuição normal como

satisfatória para estabelecimento de tamanho de amostra (Ribeiro *et al.*, 2000). A equação (14) apresenta o cálculo do número de questionários por agrupamento.

$$n = \left( z_{\alpha/2} * \frac{CV}{ER} \right)^2 \quad (14)$$

onde:

$z_{\alpha/2}$  : Nível de Significância;

CV : Coeficiente de Variação;



ER : Erro Relativo Admissível.

A Tabela 2 apresenta o número de questionários por agrupamento em função do nível de significância desejado ( $z_{\alpha/2}$ ), do coeficiente de variação (CV), e do erro relativo admissível (ER). Considerando um nível de significância moderado,  $\alpha=0,05$ , um erro relativo admissível de 5% e uma população de pedestres com um grau médio de homogeneidade em suas respostas, ou seja, um coeficiente de variação moderado (CV = 10%), chega-se a um número de questionários por agrupamento igual a 15,4. O número total de questionários da amostra é igual ao produto entre o número de questionários por agrupamento e o número de agrupamentos. Assim, a amostra calculada é de 77 questionários. No entanto, foi estabelecido o número de 20 questionários por local de estudo, totalizando uma amostra de 100 questionários.

**Tabela 2** Número de questionários por agrupamento

		Nível de Significância Elevado			Nível de Significância Moderado			Nível de Significância Baixo		
		a = 0,01 $z_{\alpha/2} = 2,575$			a = 0,05 $z_{\alpha/2} = 1,960$			a = 0,10 $z_{\alpha/2} = 1,645$		
		ER			ER			ER		
		Baixo	Médio	Alto	Baixo	Médio	Alto	Baixo	Médio	Alto
		2,5%	5%	10%	2,5%	5%	10%	2,5%	5%	10%
CV	Baixo 5%	26,5	6,6	1,7	15,4	3,8	1	10,8	2,7	0,7
	Moderado 10%	106,1	26,5	6,6	61,5	15,4	3,8	43,3	10,8	2,7
	Alto 15%	424,4	106,1	26,5	245,9	61,5	15,4	173,2	43,3	10,8

O questionário da pesquisa, apresentado na Figura 14, é composto por oito questões, sendo que sua parte inicial corresponde às informações pessoais dos entrevistados como idade, sexo e escolaridade. Estas variáveis foram consideradas como variáveis de controle da população entrevistada.

	<p>Esta pesquisa faz parte de uma dissertação de mestrado que estuda a circulação de pedestres em Porto Alegre. Contamos com sua colaboração, pois sua opinião é muito importante.</p>																																	
<p>Pesquisador: _____ Local: _____ Data: _____</p>																																		
<table style="width: 100%; border: none;"> <tr> <td style="width: 33%;"><b>Idade</b></td> <td><input type="checkbox"/> menos de 21 anos</td> <td><input type="checkbox"/> de 22 a 55 anos</td> <td><input type="checkbox"/> mais de 55 anos</td> <td rowspan="3" style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;">C.E. <input type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td><b>Sexo</b></td> <td><input type="checkbox"/> feminino</td> <td><input type="checkbox"/> masculino</td> <td></td> </tr> <tr> <td><b>Escolaridade</b></td> <td><input type="checkbox"/> até 1º grau</td> <td><input type="checkbox"/> até 2º grau completo</td> <td><input type="checkbox"/> nível superior</td> </tr> </table>			<b>Idade</b>	<input type="checkbox"/> menos de 21 anos	<input type="checkbox"/> de 22 a 55 anos	<input type="checkbox"/> mais de 55 anos	C.E. <input type="checkbox"/>	<b>Sexo</b>	<input type="checkbox"/> feminino	<input type="checkbox"/> masculino		<b>Escolaridade</b>	<input type="checkbox"/> até 1º grau	<input type="checkbox"/> até 2º grau completo	<input type="checkbox"/> nível superior																			
<b>Idade</b>	<input type="checkbox"/> menos de 21 anos	<input type="checkbox"/> de 22 a 55 anos	<input type="checkbox"/> mais de 55 anos	C.E. <input type="checkbox"/>																														
<b>Sexo</b>	<input type="checkbox"/> feminino	<input type="checkbox"/> masculino																																
<b>Escolaridade</b>	<input type="checkbox"/> até 1º grau	<input type="checkbox"/> até 2º grau completo	<input type="checkbox"/> nível superior																															
<p><b>1. Quantas vezes por semana você anda a pé nesta região?</b>  <input type="checkbox"/> pelo menos 3 dias por semana    <input type="checkbox"/> 1 ou 2 dias por semana    <input type="checkbox"/> quase nunca</p>																																		
<p><b>2. Onde você normalmente atravessa esta via?</b>  <input type="checkbox"/> nas faixas de segurança para pedestres    <input type="checkbox"/> em qualquer lugar que eu achar melhor</p>																																		
<p><b>3. Em que momento você normalmente atravessa esta via?</b>  <input type="checkbox"/> apenas quando há luz verde para os pedestres na sinaleira  <input type="checkbox"/> quando não há veículos na via  <input type="checkbox"/> quando sente que pode atravessar, mesmo com veículos se aproximando</p>																																		
<p><b>4. Com qual frequência você atravessa em locais onde NÃO há travessias para pedestres, nesta via?</b>  <input type="checkbox"/> nunca    <input type="checkbox"/> raramente    <input type="checkbox"/> às vezes    <input type="checkbox"/> frequentemente    <input type="checkbox"/> quase sempre</p>																																		
<p><b>5. Se você escolhe atravessar em locais onde não há travessias de pedestres, qual é a principal razão?</b>  <input type="checkbox"/> porque é mais perto    <input type="checkbox"/> porque é mais rápido    <input type="checkbox"/> porque não vejo perigo em relação aos carros</p>																																		
<p><b>6. Você tem ou sente algum problema físico que lhe dificulte atravessar a rua?</b>    Sim <input type="checkbox"/>    Não <input type="checkbox"/></p>																																		
<p><b>7. Se sim, de que tipo?</b> _____</p>																																		
<p><b>8. Nas situações a seguir, diga o quanto você se dispõe a procurar uma travessia de pedestres:</b></p> <table style="width: 100%; border: none;"> <tr> <td>Quando existe um alto volume de veículos na via</td> <td><input type="checkbox"/> sempre</td> <td><input type="checkbox"/> às vezes</td> <td><input type="checkbox"/> nunca</td> </tr> <tr> <td>Quando a velocidade dos veículos na via é alta</td> <td><input type="checkbox"/> sempre</td> <td><input type="checkbox"/> às vezes</td> <td><input type="checkbox"/> nunca</td> </tr> <tr> <td>Quando a travessia está próxima de onde você está</td> <td><input type="checkbox"/> sempre</td> <td><input type="checkbox"/> às vezes</td> <td><input type="checkbox"/> nunca</td> </tr> <tr> <td>Quando você não está com pressa</td> <td><input type="checkbox"/> sempre</td> <td><input type="checkbox"/> às vezes</td> <td><input type="checkbox"/> nunca</td> </tr> <tr> <td>Quando há outros pedestres tentando atravessar na travessia</td> <td><input type="checkbox"/> sempre</td> <td><input type="checkbox"/> às vezes</td> <td><input type="checkbox"/> nunca</td> </tr> <tr> <td>Quando existe uma brecha no tráfego de veículos</td> <td><input type="checkbox"/> sempre</td> <td><input type="checkbox"/> às vezes</td> <td><input type="checkbox"/> nunca</td> </tr> <tr> <td>Quando a largura da via é pequena</td> <td><input type="checkbox"/> sempre</td> <td><input type="checkbox"/> às vezes</td> <td><input type="checkbox"/> nunca</td> </tr> <tr> <td>Quando o tempo de espera para atravessar é pequeno</td> <td><input type="checkbox"/> sempre</td> <td><input type="checkbox"/> às vezes</td> <td><input type="checkbox"/> nunca</td> </tr> </table>			Quando existe um alto volume de veículos na via	<input type="checkbox"/> sempre	<input type="checkbox"/> às vezes	<input type="checkbox"/> nunca	Quando a velocidade dos veículos na via é alta	<input type="checkbox"/> sempre	<input type="checkbox"/> às vezes	<input type="checkbox"/> nunca	Quando a travessia está próxima de onde você está	<input type="checkbox"/> sempre	<input type="checkbox"/> às vezes	<input type="checkbox"/> nunca	Quando você não está com pressa	<input type="checkbox"/> sempre	<input type="checkbox"/> às vezes	<input type="checkbox"/> nunca	Quando há outros pedestres tentando atravessar na travessia	<input type="checkbox"/> sempre	<input type="checkbox"/> às vezes	<input type="checkbox"/> nunca	Quando existe uma brecha no tráfego de veículos	<input type="checkbox"/> sempre	<input type="checkbox"/> às vezes	<input type="checkbox"/> nunca	Quando a largura da via é pequena	<input type="checkbox"/> sempre	<input type="checkbox"/> às vezes	<input type="checkbox"/> nunca	Quando o tempo de espera para atravessar é pequeno	<input type="checkbox"/> sempre	<input type="checkbox"/> às vezes	<input type="checkbox"/> nunca
Quando existe um alto volume de veículos na via	<input type="checkbox"/> sempre	<input type="checkbox"/> às vezes	<input type="checkbox"/> nunca																															
Quando a velocidade dos veículos na via é alta	<input type="checkbox"/> sempre	<input type="checkbox"/> às vezes	<input type="checkbox"/> nunca																															
Quando a travessia está próxima de onde você está	<input type="checkbox"/> sempre	<input type="checkbox"/> às vezes	<input type="checkbox"/> nunca																															
Quando você não está com pressa	<input type="checkbox"/> sempre	<input type="checkbox"/> às vezes	<input type="checkbox"/> nunca																															
Quando há outros pedestres tentando atravessar na travessia	<input type="checkbox"/> sempre	<input type="checkbox"/> às vezes	<input type="checkbox"/> nunca																															
Quando existe uma brecha no tráfego de veículos	<input type="checkbox"/> sempre	<input type="checkbox"/> às vezes	<input type="checkbox"/> nunca																															
Quando a largura da via é pequena	<input type="checkbox"/> sempre	<input type="checkbox"/> às vezes	<input type="checkbox"/> nunca																															
Quando o tempo de espera para atravessar é pequeno	<input type="checkbox"/> sempre	<input type="checkbox"/> às vezes	<input type="checkbox"/> nunca																															

**Figura 14** Questionário da pesquisa com pedestres

A primeira questão buscou agrupar os pedestres em três tipos: a) habituais, que circulam pelo local de estudo pelo menos três dias por semana e, b) ocasionais, que freqüentam a região um ou dois dias por semana e, c) raros, que quase nunca trafegam pelo local. A segunda questão investigou onde os pedestres normalmente costumam atravessar na região que compreende a travessia. As respostas a essa pergunta refletem indicativos sobre a conformidade de travessia espacial.

A terceira questão buscou identificar o momento em que o pedestre tipicamente escolhe cruzar a via quando está em uma travessia, caracterizando seu provável comportamento em relação à conformidade de travessia temporal. A quarta questão objetivou testar a consistência das respostas da segunda questão, buscando mensurar a freqüência com que o pedestre atravessa em locais onde não há travessias para pedestres.

A questão número cinco condicionou o pedestre a uma situação em que ele atravessa em local onde não há travessia, e identificou o principal motivo desta escolha. As questões seis e sete buscaram indícios de dificuldades de mobilidade dos pedestres. Na tabulação das respostas, os questionários em que os pedestres declararam alguma deficiência de mobilidade foram identificados como uma categoria especial (CE). A questão número oito envolveu a investigação da percepção dos pedestres frente aos fatores que poderiam influenciar duas decisões. Na questão oito, os questionários com marcação CE foram analisados separadamente.

A realização das entrevistas foi antecedida por um treinamento dos pesquisadores. Este treinamento envolveu a explicação da estrutura e importância do questionário para a pesquisa e as orientações quanto à forma adequada de abordagem dos pedestres e condução da entrevista.

### 4.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A coleta de dados através de filmagens permitiu a observação do comportamento real dos usuários e forneceu subsídios para o levantamento de parâmetros distintos. As entrevistas com pedestres permitiram a análise das percepções dos pedestres, dando indícios de suas prováveis atitudes em travessias semaforizadas.

A técnica de coleta de imagens apresenta-se como uma alternativa conveniente para este tipo de pesquisa, pois permite que a observação dos parâmetros seja realizada em períodos distintos. Por outro lado, o processo global desta técnica é bastante oneroso e demorado. Idealmente, os dados utilizados poderiam ser provenientes de instrumentos de coleta instalados nas vias e o processamento dos dados ocorrer de forma informatizada.

Na ausência de instrumentos automáticos de coleta, é imprescindível a escolha adequada do local para realização da filmagem. Aspectos relacionados à altura, ângulo e presença de obstáculos podem comprometer a qualidade das informações. Outro ponto a ser destacado é quanto ao posicionamento da câmera para registro das imagens, uma vez que se essa for instalada anteriormente ao semáforo, as condições de visibilidade da troca de luz no semáforo são melhor observadas, qualificando a coleta dos dados.

A pesquisa por entrevistas foi utilizada neste estudo com o objetivo de identificar tendências de comportamento dos pedestres. A elaboração do questionário e o treinamento dos pesquisadores são etapas fundamentais para a qualidade dos resultados.

Para auxiliar a compreensão do comportamento de pedestres em travessias semaforizadas utilizou-se a ferramenta de redes neurais artificiais. O próximo capítulo apresenta a construção dos modelos de previsão.

## 5 DESENVOLVIMENTO DOS MODELOS EM RNA

Este capítulo apresenta a abordagem adotada para o desenvolvimento de modelos de redes neurais artificiais. O objetivo da modelagem é estimar as conformidades de travessia espacial e temporal e avaliar os efeitos decorrentes de alterações das variáveis consideradas no estudo. Ainda, são descritos os critérios para escolha dos melhores modelos de RNA e o processo para réplica desses modelos em planilha eletrônica de dados.

O *software* utilizado na construção dos modelos, envolvendo o treinamento e o teste das redes, foi o *BrainMaker Professional* versão 3.7 (CALIFORNIA SCIENTIFIC SOFTWARE, 1998). As redes neurais artificiais desenvolvidas nesta pesquisa são não-recorrentes do tipo MLP (*Multilayer Perceptron*). A função de ativação neural utilizada é a sigmóide logística e o algoritmo de aprendizado é supervisionado do tipo retro-propagação de erro. Todos os modelos apresentados neste trabalho possuem somente uma camada intermediária de neurônios. Do conjunto de dados geral, oitenta por cento (80%) dos dados foram utilizados para treinamento, e vinte por cento (20%) para teste dos modelos de RNA.

### 5.1 DEFINIÇÃO DAS VARIÁVEIS DE CADA MODELO

A escolha das variáveis para o processo da modelagem com redes neurais artificiais não possui uma metodologia consolidada, dependendo de testes estatísticos e do bom senso de cada pesquisador (SMITH, 1993). Neste trabalho, a escolha das variáveis para os modelos foi baseada na consideração dos fatores viário-ambientais fixos e variáveis determinados anteriormente.

Assim, para o modelo que estima a conformidade de travessia espacial, foram escolhidas as variáveis *gap* máximo, *gap* crítico, 85° percentil de *gaps*, volume de pedestres, volume de veículos, velocidade de veículos, largura da via, largura da travessia e tempo de espera pelo verde.

Para o modelo que estima a conformidade de travessia temporal, foram escolhidas as variáveis *gap* máximo, *gap* crítico, 85° percentil de *gaps*, volume de pedestres, volume de veículos, velocidade de veículos, largura da via e tempo de espera pelo verde.

A largura da via, considerada neste trabalho, corresponde à largura útil para atravessar a via, ou seja, a distância que necessita ser efetivamente vencida. Esta consideração foi feita pelo fato de que a maioria dos pedestres posiciona-se ao lado de veículos estacionados na via, no caso desta via permitir o estacionamento lateral. Nas vias onde não é permitido estacionamento, essa largura corresponde à própria largura da via.

## 5.2 CRITÉRIOS DE ESCOLHA DOS MELHORES MODELOS

Ao final do processo de modelagem, foi obtida uma grande quantidade de modelos que estimam cada uma das variáveis de saída, conformidades de travessia espacial e temporal. Os critérios de escolha dos melhores modelos envolveram as medidas de desempenho citadas a seguir.

- **Erro Relativo Absoluto Médio (ERAM)** – esta medida de desempenho representa a média das diferenças absolutas de um modelo e corresponde ao erro médio deste modelo. As diferenças absolutas são dadas através do módulo da diferença entre os valores reais e os estimados, dividido pelos



valores reais. A equação (15) apresenta a formulação matemática do erro relativo absoluto médio.

$$ERAM = \frac{\sum_{i=1}^n \left| \frac{real_i - estimado_i}{real_i} \right|}{n} \quad (15)$$

- **Gráficos de dispersão (*scattergram*)** – esta medida consiste na comparação dos valores reais com os valores estimados pelo modelo de redes neurais. Neste trabalho, optou-se em considerar no eixo  $x$  o valor previsto pelas RNA e, no eixo  $y$ , o valor alvo, correspondente ao valor real. Para um modelo ideal, os pontos devem formar uma linha de  $45^\circ$  que passa pela origem dos pontos. Quando se possui um valor alvo  $x_1$ , é desejável que a estimativa seja a mais precisa possível, o que significa dizer que  $y_1 = x_1$ . Logo, para todo conjunto de observações, o resultado ideal seria um conjunto de pares cartesianos  $(x_i, y_i)$ , onde todo  $y_i = x_i$ .
- **Coefficiente de Determinação ( $R^2$ )** – esta medida de desempenho corresponde a uma comparação dos valores estimados e reais, de forma semelhante ao processo empregado em análises de regressão. O valor do coeficiente de determinação varia entre 0 e 1. Quanto mais próximo o valor estiver de 1, maior será a correlação entre os valores estimados e reais, sendo o modelo útil para previsão da variável da saída. A expressão matemática para o cálculo do  $R^2$  é apresentada na equação (16).

$$R^2 = \left\{ \frac{n(\sum XY) - (\sum X)(\sum Y)}{\sqrt{[n\sum X^2 - (\sum X)^2][n\sum Y^2 - (\sum Y)^2]}} \right\}^2 \quad (16)$$

onde:

$X$  = valor real

$Y$  = valor estimado

$n$  = número de pares de observações ( $X, Y$ )

A partir da avaliação das três medidas de desempenho de cada modelo, foi possível selecionar as RNA que melhor estimam os padrões dos dados de entrada. Os melhores modelos escolhidos foram replicados em planilha eletrônica para possibilitar uma melhor avaliação dos dados de saída.

### 5.3 FORMULAÇÃO DAS RÉPLICAS DAS RNA EM PLANILHA ELETRÔNICA

O procedimento de réplica das redes neurais artificiais consiste em reproduzir, em planilha eletrônica, o modelo obtido através do *software* de redes neurais. Na área de transportes esse procedimento foi utilizado por Bocanegra (2002) para estimar tempos de viagens em cidade do interior de São Paulo e por Oliveira (2004) para analisar tempos de atendimento em cabines de pedágio no Rio Grande do Sul. A vantagem desta técnica é a possibilidade de realizar análises de sensibilidade mais simples e diretas, não restringindo o estudo apenas à utilização de um *software* de redes neurais (BOCANEGRA, 2002).

O processo de réplica da rede neural artificial ocorre em duas etapas. A primeira envolve o cálculo dos valores de saída entre a camada de entrada e a camada intermediária

através da função de ativação. Estes valores calculados são, então, utilizados para o cálculo dos valores de saída entre a camada intermediária e a camada de saída. As equações (17) e (19) apresentam a função sigmóide logística empregada para cada caso. Os valores  $a_{0j}$  e  $b_{0k}$  correspondem aos ajustes adicionais entre camadas de neurônios e são fornecidos pelo *software* de redes neurais artificiais.

$$F(u_j) = \frac{1}{1 + e^{-u_j}} \quad (17)$$

onde,  $u_j$  é igual a:

$$u_j = a_{0j} + \sum_{i=1}^I a_{ij} x_i \quad (18)$$

onde:

$a_{ij}$  = pesos do nó de entrada  $i$  para o nó de intermediário  $j$

$x_i$  = valor de entrada do nó  $i$

$a_{0j}$  = valor de ajuste do nó intermediário  $j$

$I$  = número de nós de entrada

$$F(v_k) = \frac{1}{1 + e^{-v_k}} \quad (19)$$

onde,  $v_k$  é igual a:

$$v_k = b_{0k} + \sum_{j=1}^J b_{jk} y_j \quad (20)$$

onde:

$b_{jk}$  = pesos do nó intermediário  $j$  para o nó de saída  $k$

$y_j$  = valor de saída para o nó intermediário  $j$

$b_{0k}$  = valor de ajuste do nó de saída  $k$

$J$  = número de nós intermediários

Para o emprego das equações (17) e (19) os dados de entrada devem estar normalizados entre 0 e 1, uma vez que este procedimento é realizado pelo *software* de redes neurais que devolve os valores dos pesos e valores de ajuste dos dados normalizados. A normalização dos dados é realizada através da equação (21).

$$Y_i = \left[ \frac{(X_i - X_{\min})(Y_{\max} - Y_{\min})}{X_{\max} - X_{\min}} \right] + Y_{\min} \quad (21)$$

Para  $i = 1, \dots, n$

onde:

$Y_i$  = valor normalizado

$X_i$  = valor a ser normalizado

$X_{\min}$  = menor valor do intervalo de origem de normalização

$X_{\max}$  = maior valor do intervalo de origem de normalização

$Y_{\min}$  = menor valor do intervalo de destino de normalização (zero)

$Y_{\max}$  = maior valor do intervalo de destino de normalização (um)

$n$  = número de dados a serem normalizados

Ao final do processo de réplica, os valores resultantes devem ser desnormalizados para que seja possível a comparação com os dados de entrada, tanto para os dados de treino como para os dados de teste. A comparação com os dados de entrada envolve os cálculos dos erros relativos absolutos médios (ERAM) e coeficientes de determinação ( $R^2$ ) para treino e teste, em cada modelo, evidenciando, assim, a qualidade do modelo.

A verificação da validade da réplica da rede neural artificial em planilha eletrônica é realizada a partir da comparação dos resultados obtidos através da aplicação das fórmulas com os resultados gerados pelo *software* em que a rede neural foi treinada e testada. Se o procedimento foi realizado corretamente, os resultados de ambos devem ser idênticos.

#### 5.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A escolha da utilização de redes neurais artificiais para as modelagens deste trabalho foi baseada na complexidade das relações não lineares entre as variáveis de entrada, e na inexistência de conhecimentos prévios do comportamento em conjunto dessas variáveis sobre as conformidades de travessia espacial e temporal.

No próximo capítulo são apresentados os resultados da pesquisa e as análises realizadas neste trabalho.

## 6 ANÁLISE DOS RESULTADOS

A compreensão do comportamento de pedestres em travessias semaforizadas foi realizada através da análise de três elementos. O primeiro corresponde às conformidades observadas, verificadas a partir dos dados das filmagens. O segundo envolve as conformidades informadas e as percepções dos pedestres, obtidas através das entrevistas com pedestres. O terceiro elemento contempla os efeitos dos fatores viário-ambientais considerados sobre as conformidades de travessia, através dos modelos de redes neurais artificiais.

### 6.1 ANÁLISE DOS DADOS DAS FILMAGENS

As diferentes características dos locais de estudo podem ter influência nas conformidades de travessia. A Tabela 3 apresenta as conformidades de travessia espacial e temporal calculadas com os dados coletados através das filmagens.

**Tabela 3** Conformidades de travessia observadas

<b>Local de estudo</b>	<b>CTE</b>	<b>CTT</b>
Rua Siqueira Campos	0,73	0,88
Rua Prof. Annes Dias	0,97	0,78
Av. Paulo Gama	0,87	0,96
Rua Riachuelo	0,87	0,89
Av. Alberto Bins	0,81	0,79

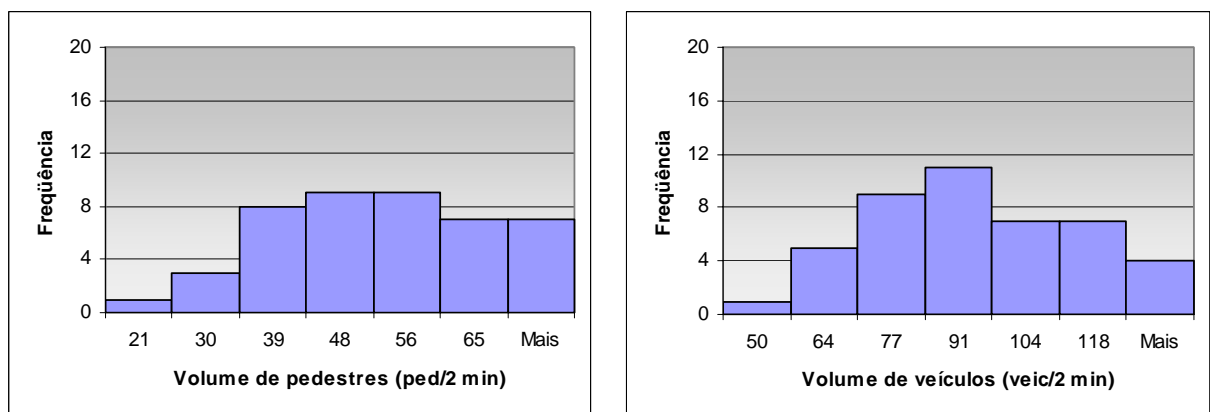
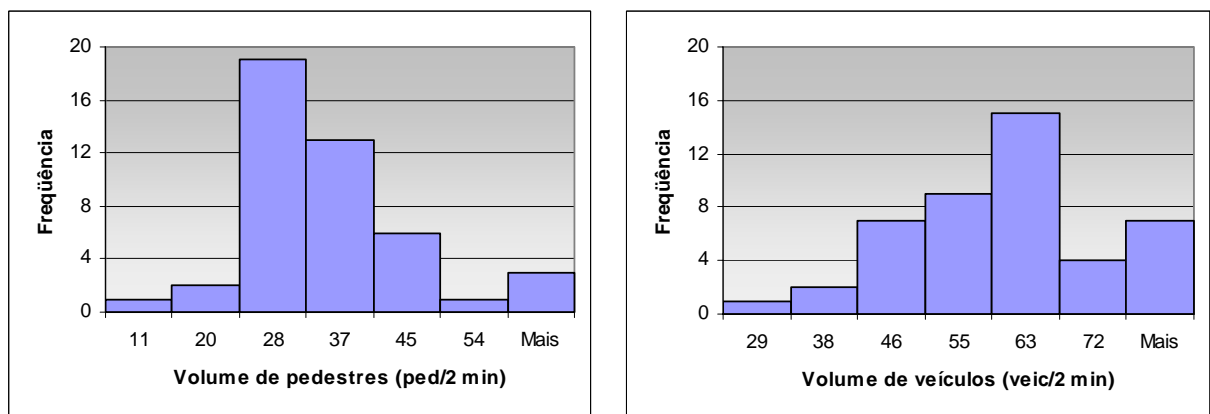
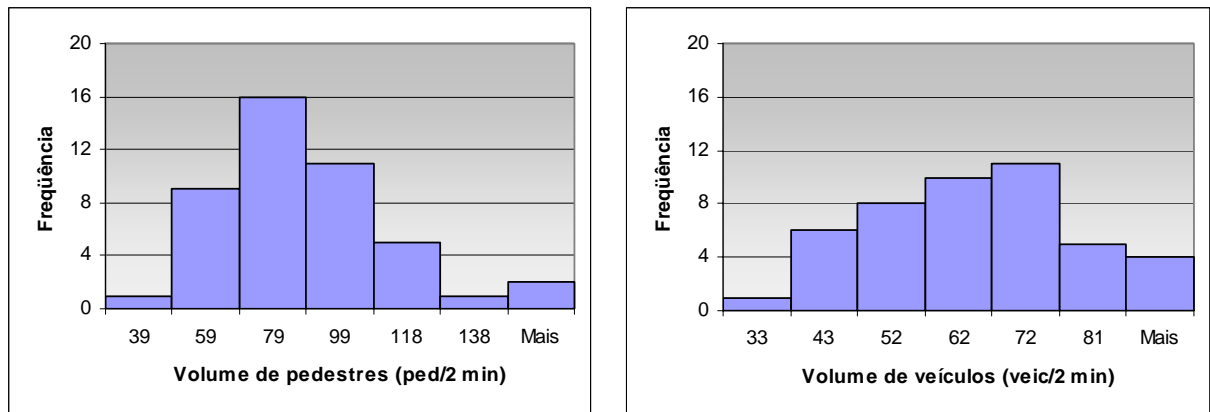
Com relação à conformidade de travessia espacial (CTE), observa-se que na rua Siqueira Campos e na av. Alberto Bins, onde o tráfego de pedestres é desordenado, os índices de conformidade foram os mais baixos. Por outro lado, na rua Prof. Annes Dias, onde há a presença de blocos de concreto para concentrar o fluxo de pedestres próximo da travessia, a conformidade de travessia espacial aproxima-se do valor máximo. As demais travessias alcançaram índices de aproximadamente 90% de conformidade espacial.

Em relação à conformidade de travessia temporal (CTT), observa-se que na rua Prof. Annes Dias e na av. Alberto Bins, os valores encontrados foram os mais baixos. Uma possível explicação pode estar relacionada ao fato de que o tempo de espera imposto aos pedestres até o início do tempo apropriado para suas travessias corresponde a 84% e 68% do ciclo semafórico, respectivamente. A grande proporção do tempo de verde para veículos frente ao de pedestres pode influenciar a agressividade e o risco assumido pelos usuários.

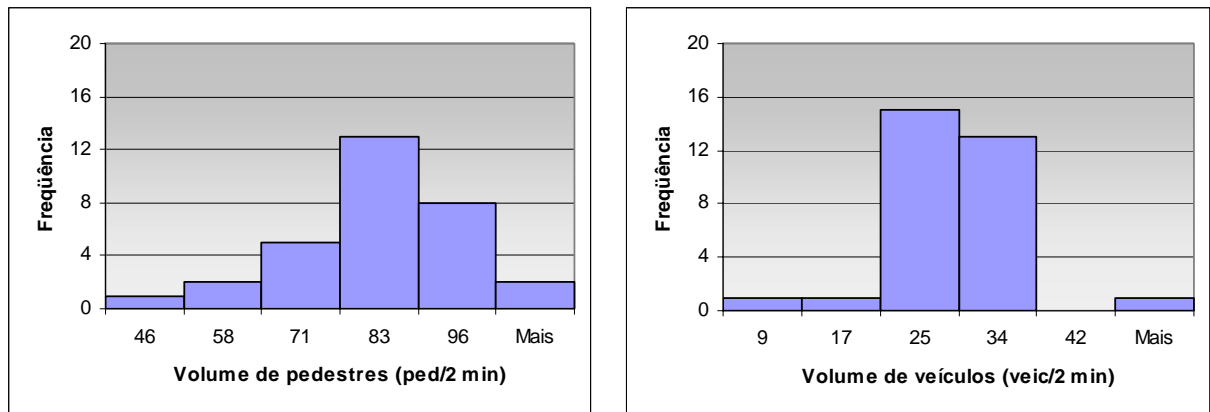
A travessia estudada na av. Paulo Gama apresentou a taxa de conformidade de travessia temporal mais alta. Atribui-se esse fato a uma possível relação com as condições do tráfego nesse local. O alto volume de veículos e sua velocidade podem causar sensação de risco aos pedestres, inibindo sua tentativa de atravessar antes do tempo apropriado. As demais travessias apresentaram índices de conformidade temporal próximos a 90%.

Para auxiliar a compreensão das conformidades observadas, as Figura 15, Figura 16, Figura 17, Figura 18 e Figura 19 apresentam a variabilidade dos volumes de pedestres e veículos para cada travessia. Observa-se que, na rua Siqueira Campos, na rua Prof. Annes Dias e na rua Riachuelo, o volume de pedestres apresenta-se mais concentrado em torno de um valor intermediário por intervalo de dois minutos. Nas avenidas Paulo Gama e Alberto Bins, a distribuição dos volumes de pedestres mostrou-se mais homogênea.

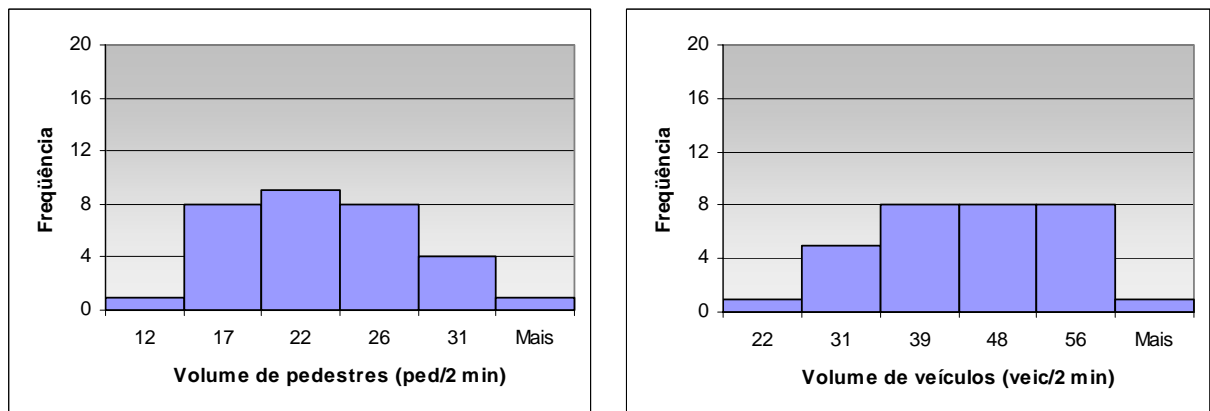
Com relação aos volumes de veículos, os cinco locais apresentaram comportamentos bastante distintos. A av. Alberto Bins apresentou a distribuição mais homogênea, enquanto que na rua Riachuelo observou-se pouca variabilidade nos volumes de veículos em intervalos de dois minutos.







**Figura 18** Histogramas do volume de pedestres e veículos para a rua Riachuelo



**Figura 19** Histogramas do volume de pedestres e veículos para a av. Alberto Bins

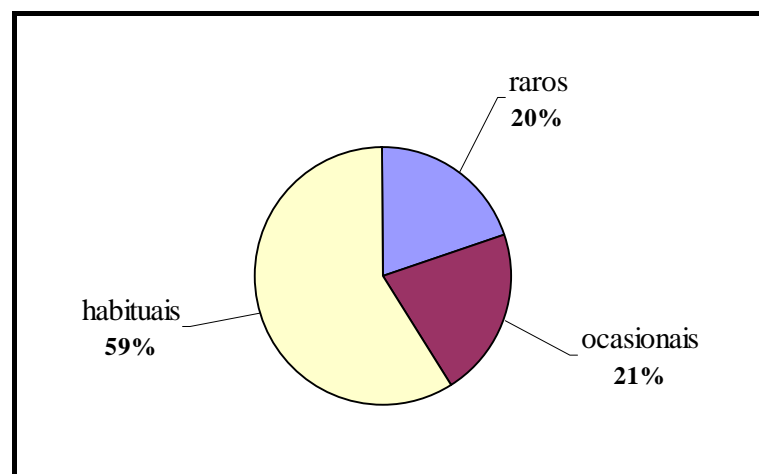
## 6.2 ANÁLISE DAS ENTREVISTAS

As entrevistas com pedestres buscaram identificar tendências e percepções a respeito dos fatores que influenciam suas decisões quanto ao uso adequado das travessias. Foram realizadas 20 entrevistas em cada local de estudo. As características dos entrevistados são apresentadas na Tabela 4.

**Tabela 4** Características dos respondentes das entrevistas

Variável	Níveis	Porcentagem
Idade	Até 21 anos	23%
	De 22 a 55 anos	66%
	Mais de 55 anos	11%
Sexo	Masculino	53%
	Feminino	47%
Escolaridade	Até 1º grau	22%
	Até 2º grau	38%
	Superior ou mais	40%

A Figura 20, referente à questão número um, apresenta os tipos de usuários de acordo com a frequência que circulam pelas regiões de estudo. Os pedestres que responderam que quase nunca trafegam por essas áreas, considerados raros, foram extraídos das próximas análises.

**Figura 20** Tipos de usuários entrevistados

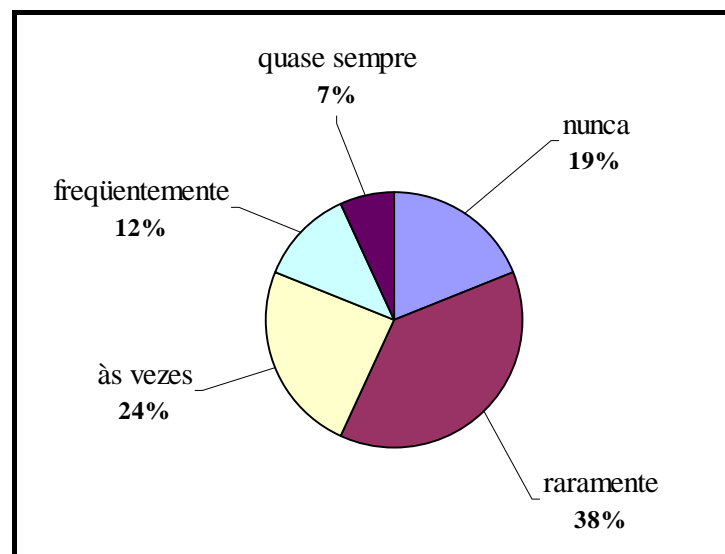
A questão número dois fornece indicativos da conformidade de travessia espacial, enquanto que, a questão três apresenta a tendência da conformidade temporal. A Tabela 5 apresenta esses resultados.

**Tabela 5** Conformidades de travessia informadas

Local de estudo	CTE	CTT
Rua Siqueira Campos	0,78	0,52
Rua Prof. Annes Dias	0,90	0,44
Av. Paulo Gama	0,86	0,71
Rua Riachuelo	0,74	0,39
Av. Alberto Bins	0,78	0,47

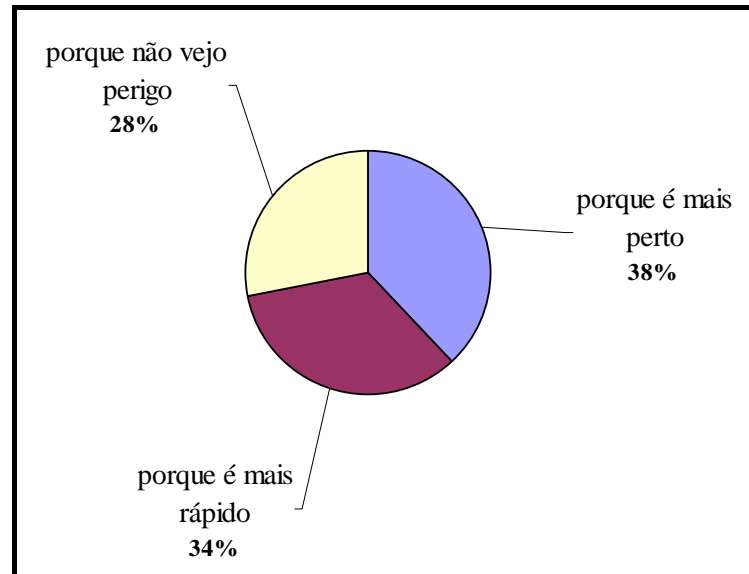
De forma geral, observa-se que, com relação à conformidade de travessia espacial, houve pouca variação entre o comportamento dos usuários observado nas filmagens e informado através das entrevistas. No entanto, as conformidades de travessia temporal informadas foram notadamente menores do que as observadas. Isto indica que, felizmente, os pedestres assumem comportamentos mais defensivos, provavelmente, devido às características de intensidade e continuidade do fluxo de veículos.

A Figura 21 mostra a proporção das respostas da questão número quatro, onde os pedestres foram questionados em relação à frequência com que atravessam em locais onde não há faixa de segurança para pedestres. Observa-se que a maioria dos pedestres, 57%, se enquadra potencialmente na classe de pedestres prudentes, declarando que nunca ou raramente atravessam fora dos locais apropriados.



**Figura 21** Frequência que os pedestres atravessam em locais sem travessia para pedestres

A questão número cinco investigou os principais motivos pelos quais os usuários atravessam em locais onde não há a presença de travessias para pedestres. A Figura 22 apresenta os resultados obtidos.



**Figura 22** Motivos pelos quais os pedestres atravessam fora das travessias

As questões números seis e sete buscaram diferenciar as respostas dos pedestres que declararam possuir algum tipo de deficiência de mobilidade que influenciasse sua travessia, sendo classificados com uma categoria especial. Na análise da questão oito, as respostas dos pedestres da categoria especial foram avaliadas separadamente. A proporção de pedestres da categoria especial na amostra foi de 12%.

A questão oito buscou identificar a percepção dos usuários em relação aos fatores viário-ambientais considerados. A Tabela 6 apresenta a hierarquização dos fatores percebidos pelos pedestres.

**Tabela 6** Hierarquização dos fatores viário-ambientais considerados

<b>Pedestres da Categoria Especial</b>		<b>Demais Pedestres</b>
1°	Volume de veículos	Distância até a travessia
2°	Distância até a travessia	Volume de veículos
3°	Velocidade dos veículos	Velocidade dos veículos
4°	Largura da via	<i>Gaps</i> na corrente de tráfego
5°	Outros pedestres tentando atravessar na travessia	Tempo de espera pelo verde
6°	Tempo disponível (sem pressa)	Largura da via
7°	<i>Gaps</i> na corrente de tráfego	Outros pedestres tentando atravessar na travessia
8°	Tempo de espera pelo verde	Tempo disponível (sem pressa)

Observa-se que os fatores mais percebidos pelos pedestres referem-se à distância entre seu ponto de origem e seu destino e às características de volume e velocidade dos veículos. Diferenças entre as percepções dos pedestres da categoria especial e os demais pedestres foram observadas.

A seguir são apresentados os resultados da modelagem realizada com redes neurais artificiais.

### 6.3 MODELOS DE REDES NEURAIIS ARTIFICIAIS

#### 6.3.1 Comparação e Escolha dos Melhores Modelos

A seguir são apresentados os cinco melhores modelos para conformidade de travessia espacial e temporal. Para cada modelo, foram determinadas as medidas de desempenho anteriormente apresentadas, através das réplicas das RNA em planilha eletrônica.

A escolha do melhor modelo envolveu a consideração de três critérios. Desta forma, dentre os cinco modelos selecionados previamente, o melhor modelo é aquele que:

*i)* apresentou menor erro relativo absoluto médio (ERAM) para os dados de teste. Esta medida representa a capacidade do modelo replicar adequadamente valores que não foram incluídos no treino, mas que estão dentro do intervalo de validade do modelo. Para cada variável, o intervalo de validade é definido pelo seu valor mínimo e seu valor máximo.

*ii)* apresentou maior coeficiente de determinação para os dados de teste ( $R^2_{\text{teste}}$ ), e;

*iii)* apresentou maior coeficiente de determinação para os dados de treino ( $R^2_{\text{treino}}$ ).

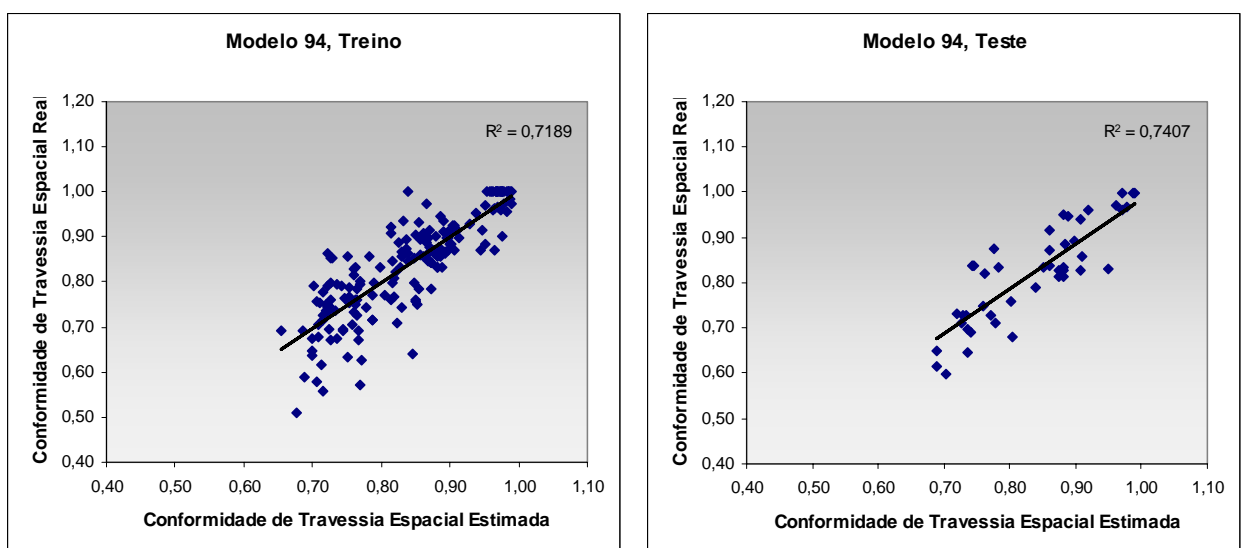
### 6.3.1.1 Melhores Modelos para Conformidade de Travessia Espacial

Foram realizadas 197 modelagens para a conformidade de travessia espacial. A Tabela 7 apresenta os melhores modelos obtidos e seus respectivos valores de coeficientes de determinação ( $R^2$ ) e erros relativos absolutos médios (ERAM) para os conjuntos de dados de treino e teste.

**Tabela 7** Melhores modelos para CTE

Modelo	No. de Neurônios	$R^2$ de Treino	$R^2$ de Teste	Erro Relativo Absoluto Médio	
				Treino	Teste
81a	10	0,7220	0,7074	0,0542	0,0742
86	11	0,7161	0,7112	0,0544	0,0740
93	11	0,7175	0,7207	0,0571	0,0613
<b>94</b>	<b>12</b>	<b>0,7189</b>	<b>0,7407</b>	<b>0,0562</b>	<b>0,0588</b>
96b	10	0,7109	0,7129	0,0572	0,0623

De acordo com os critérios definidos para escolha, o melhor modelo para CTE foi o modelo 94. A Figura 23 apresenta o gráfico tipo *scattergram* deste modelo. Os dados representados correspondem às relações entre os valores estimados através do modelo e os valores reais utilizados para treino e teste.



**Figura 23** Correlação para os dados de treino e teste do modelo 94 para CTE

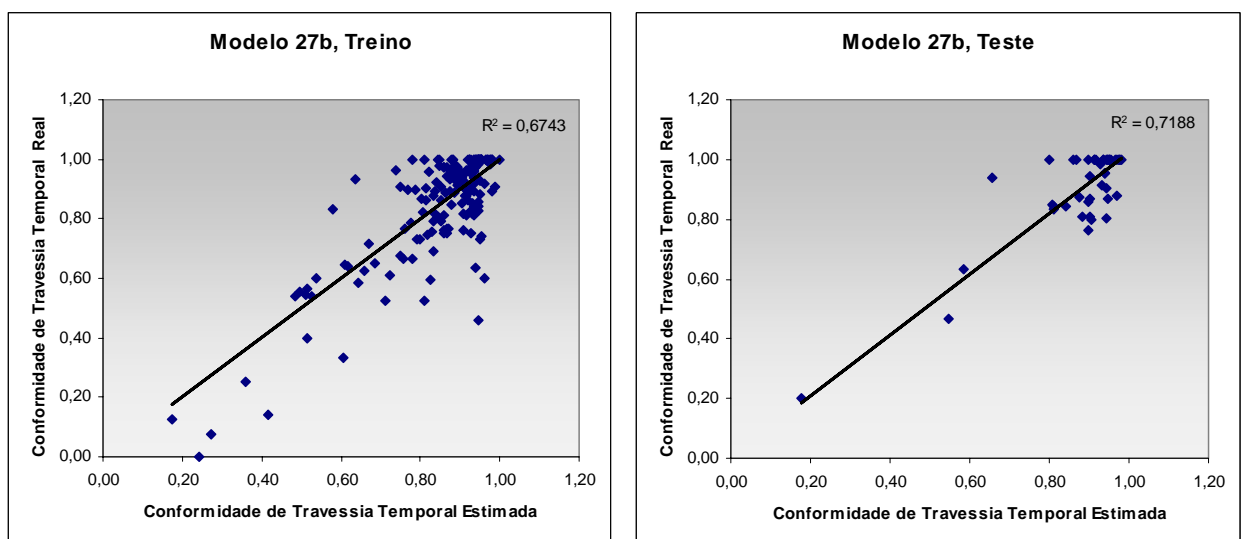
### 6.3.1.2 Melhores Modelos para Conformidade de Travessia Temporal

Foram realizadas 211 modelagens para estimar a conformidade de travessia temporal. A Tabela 8 apresenta os melhores modelos obtidos e seus respectivos valores de coeficientes de determinação ( $R^2$ ) e erros relativos absolutos médios (ERAM) para os conjuntos de treino e teste.

**Tabela 8** Melhores modelos para CTT

Modelo	No. de Neurônios	$R^2$ de Treino	$R^2$ de Teste	Erro Relativo Absoluto Médio	
				Treino	Teste
25	12	0,6232	0,6587	0,1360	0,0903
25c	11	0,6674	0,6286	0,1334	0,0778
27a	10	0,6267	0,6105	0,1441	0,0826
<b>27b</b>	<b>24</b>	<b>0,6743</b>	<b>0,7188</b>	<b>0,1275</b>	<b>0,0742</b>
29d	11	0,6804	0,6353	0,1301	0,0804

O modelo que apresenta melhor desempenho para conformidade de travessia temporal, de acordo com os critérios definidos para escolha foi o modelo 27b. Na Figura 24 é apresentado o gráfico *scattergram* para os dados desse modelo.



**Figura 24** Correlação para os dados de treino e teste do modelo 27b para CTT

### 6.3.2 Análise de Influência das Variáveis nos Modelos

A análise da influência das variáveis nas conformidades de travessia espacial e temporal foi realizada em duas etapas. Primeiramente, foram verificadas as relevâncias das variáveis de entrada para com as variáveis de saída. Num segundo momento foram realizadas análises de sensibilidade com o intuito de avaliar a influência relativa de cada variável nas conformidades espacial e temporal.

#### 6.3.2.1 Relevância das Variáveis de Entrada na Modelagem

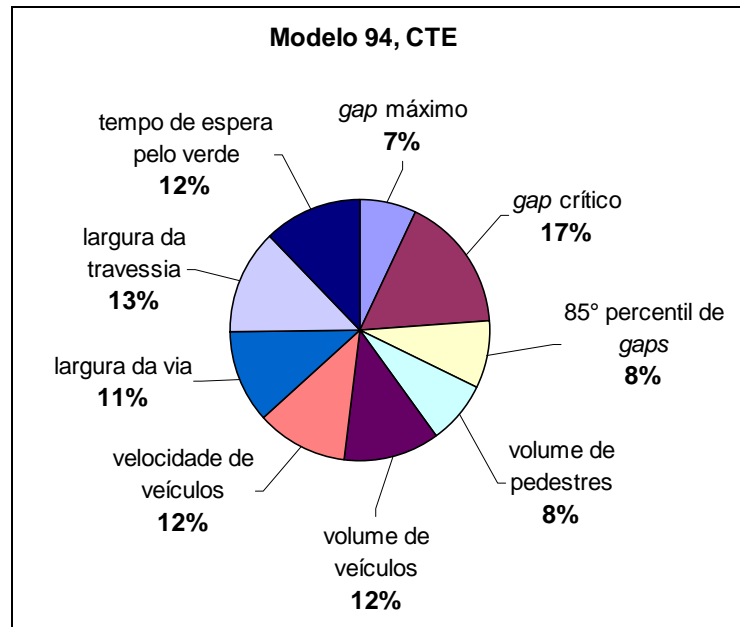
A análise da relevância de cada variável nos modelos de RNA foi realizada através do método proposto por Garson (1991). Este método consiste no particionamento dos pesos sinápticos entre a camada intermediária e a de saída em componentes associados com cada nó de entrada. Assim, o peso resultante associado com cada entrada é um reflexo de sua importância no modelo.

A metodologia foi aplicada para os melhores modelos escolhidos para as conformidades de travessia espacial e temporal, modelos 94 e 27b respectivamente. As Figura 25 e 26 demonstram as relevâncias das variáveis de entrada nas conformidades de travessia espacial e temporal.

Através da análise da Figura 25, observa-se que a variável *gap* crítico destaca-se das demais variáveis, exercendo a maior influência na determinação da conformidade de travessia espacial. Esta variável representa uma característica do local da travessia, uma vez que assume a média das características de um grupo de indivíduos. Sua relevância no modelo indica que a decisão dos pedestres em buscar o local adequado para realizar sua travessia

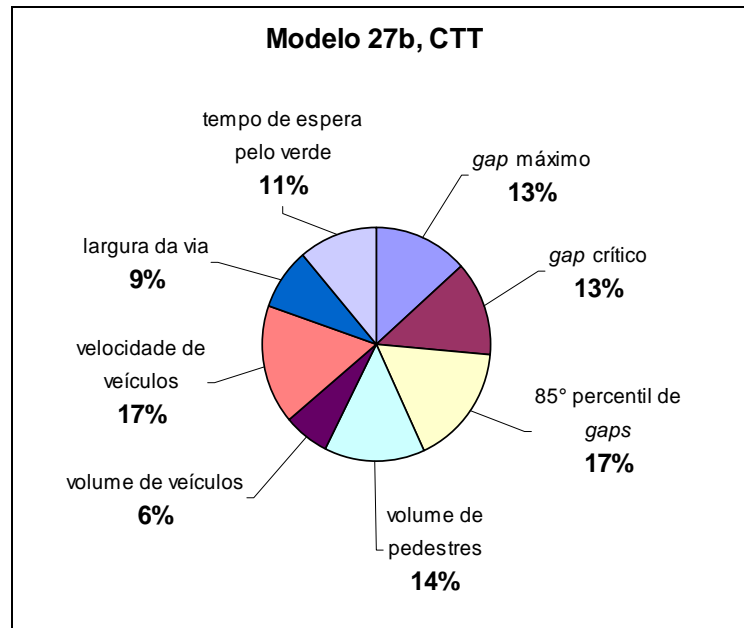


depende, antes de tudo, do tempo necessário até encontrar uma brecha aceitável no fluxo de tráfego. No entanto deve-se considerar que existem correlações entre as variáveis, isto é, algumas delas são dependentes ou influenciam as outras.



**Figura 25** Importância relativa das variáveis no modelo 94 para CTE

Convém destacar, ainda, que os fatores variáveis considerados como *gap* máximo, 85º percentil de *gaps*, volume de veículos, velocidade dos veículos e volume de pedestres representam 47% da importância no modelo. Assim, pode-se concluir que os fatores fixos, representados pelas características locais de cada travessia, como *gap* crítico, largura da via, largura da travessia e, tempo de espera pelo verde, exercem a maior influência no modelo de previsão da conformidade de travessia espacial, que corresponde a 53%.



**Figura 26** Importância relativa das variáveis no modelo 27b para CTT

As variáveis que apresentam maior relevância no modelo de previsão da conformidade de travessia temporal correspondem à distribuição de *gaps*, caracterizada pelo 85° percentil, e a velocidade dos veículos na via. De forma geral, pode-se concluir que os fatores variáveis têm uma relevância de 67% no modelo. Assim, as características do regime do tráfego são os aspectos mais importantes na decisão do pedestre em iniciar sua travessia.

### 6.3.3 Análise de Sensibilidade

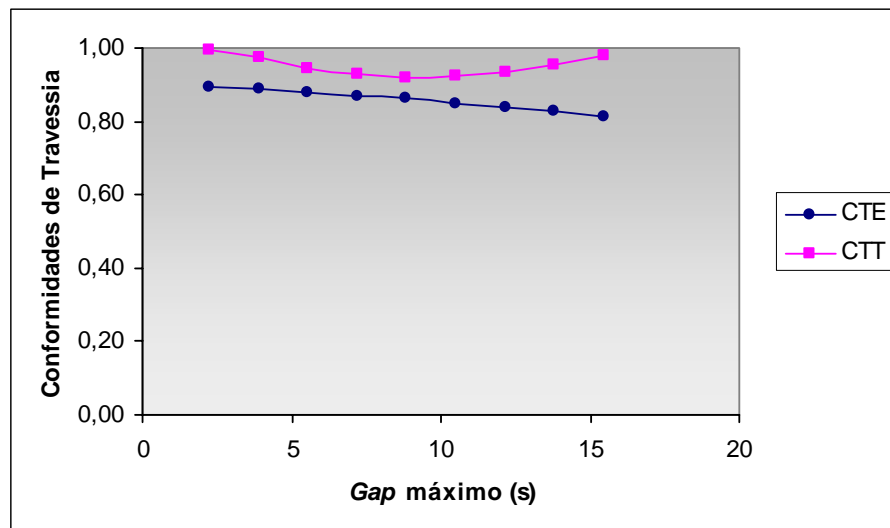
As análises de sensibilidade apresentadas neste trabalho permitem um melhor entendimento sobre a modelagem realizada. Elas pressupõem alterar valores de um dado de entrada particular, e avaliar o respectivo impacto nos parâmetros de saída de interesse, no caso, as conformidades de travessia espacial e temporal.

Foram construídos cenários para análise de cada variável de entrada, considerando as demais em suas condições médias. Convém destacar que as análises apresentadas a seguir

foram realizadas para os dados coletados em intervalos de dois minutos. Desta forma, o eixo  $x$  das Figura 27 a Figura 35 representa os valores de cada variável nesses intervalos.

### 6.3.3.1 Análise da variável *gap* máximo

A Figura 27 representa a influência da variável *gap* máximo sobre as conformidades de travessia. Através da análise, é possível observar que, à medida que o *gap* máximo aumenta há uma leve tendência de decréscimo da conformidade de travessia espacial. Isto significa que com a ocorrência de *gaps* cada vez maiores na corrente de tráfego, os pedestres tendem a atravessar fora da área da travessia. Já a conformidade de travessia temporal apresenta uma suave tendência decrescente até, aproximadamente, *gaps* de 10 segundos, onde passa a aumentar a partir deste valor.



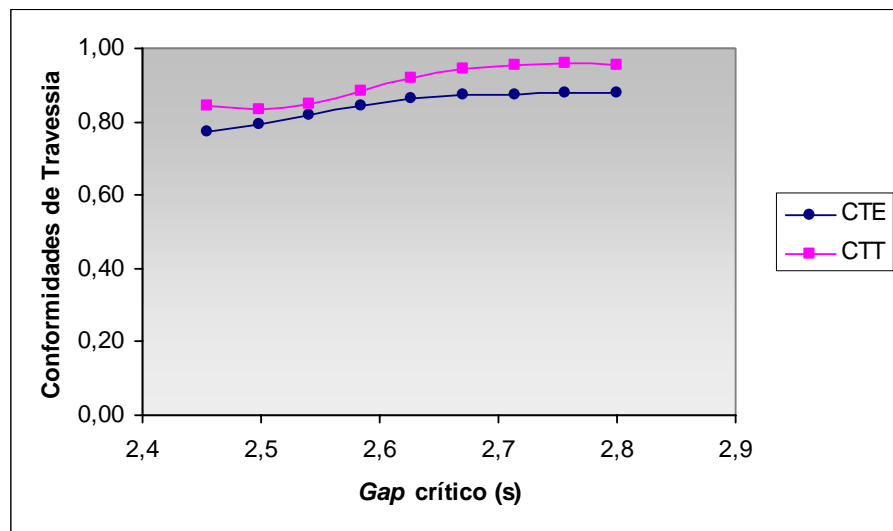
**Figura 27** Variação da variável *gap* máximo

É conveniente ressaltar que o *gap* máximo de cada intervalo de análise é uma variável que sofre variações em decorrência das condições do tráfego. A ocorrência de perturbações no fluxo viário e, até mesmo, a variação dos períodos do dia podem gerar alterações consideráveis na distribuição de *gaps* e no seu valor máximo.

### 6.3.3.2 Análise da variável *gap* crítico

A influência da variável *gap* crítico nas conformidades de travessia espacial e temporal é apresentada na Figura 28. Cabe lembrar que o *gap* crítico reflete o tempo necessário para que o pedestre aproveite a brecha na corrente de tráfego para realizar a travessia. É possível observar que, tanto a conformidade de travessia espacial como a temporal seguem uma suave tendência crescente à medida que o *gap* crítico aumenta.

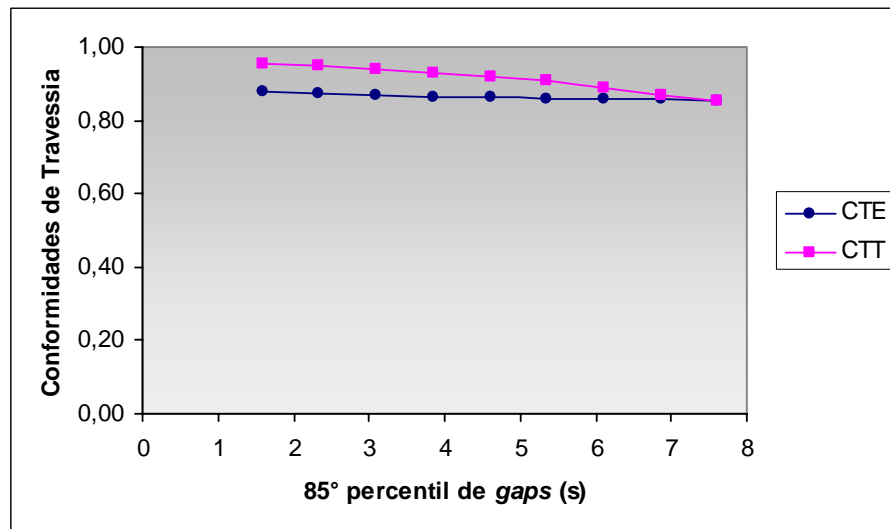
De forma geral, o aumento do *gap* crítico pode implicar em uma menor propensão de pedestres não-conformes. No entanto, é importante destacar que a variação dos *gaps* críticos realizada nesta análise é muito pequena.



**Figura 28** Variação da variável *gap* crítico

### 6.3.3.3 Análise da variável 85° percentil de *gaps*

A Figura 29 representa a variação do 85° percentil de *gaps*, considerando as condições médias das demais variáveis de entrada.



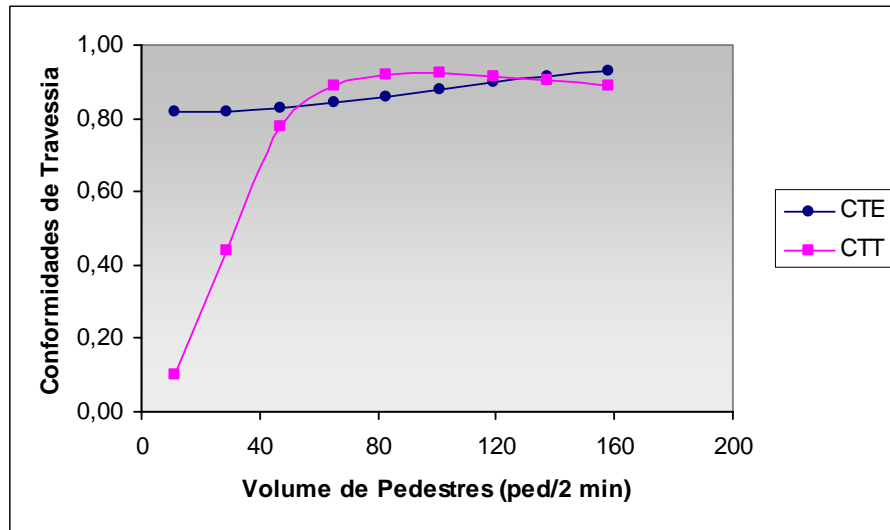
**Figura 29** Variação da variável 85º percentil de *gaps*

A análise permite observar que, de forma geral, não ocorre variação na conformidade de travessia espacial na medida em que o tamanho dos *gaps* na corrente de tráfego aumenta. Já a conformidade de travessia temporal apresenta uma tendência decrescente quando o tamanho dos *gaps* aumenta.

#### 6.3.3.4 Análise da variável volume de pedestres

A influência da variável volume de pedestres nas conformidades de travessia espacial e temporal é apresentada na Figura 30. A modelagem indica que a conformidade de travessia espacial apresenta uma tendência crescente com o aumento do volume de pedestres.

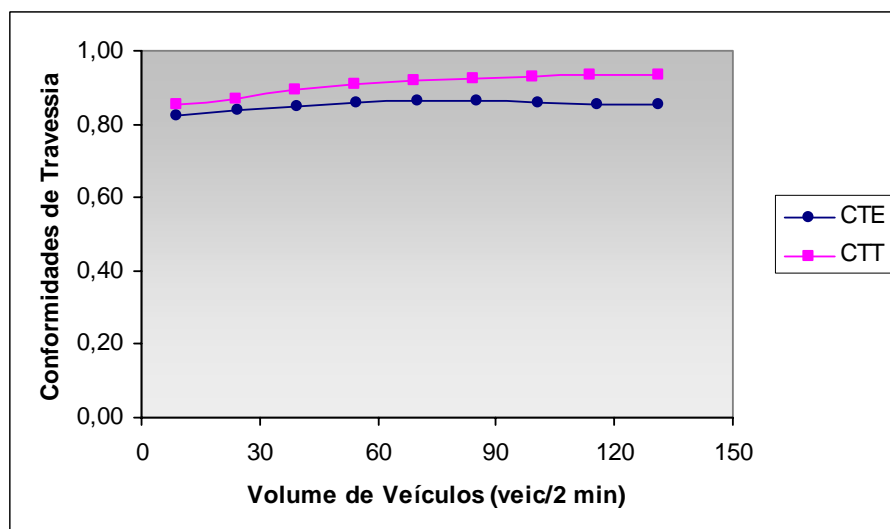
A conformidade de travessia temporal apresenta um aumento à medida que o volume de pedestres também aumenta até aproximadamente oitenta pedestres a cada dois minutos. A partir deste volume de pedestres, a conformidade temporal assume um comportamento levemente decrescente.



**Figura 30** Variação da variável volume de pedestres

#### 6.3.3.5 Análise da variável volume de veículos

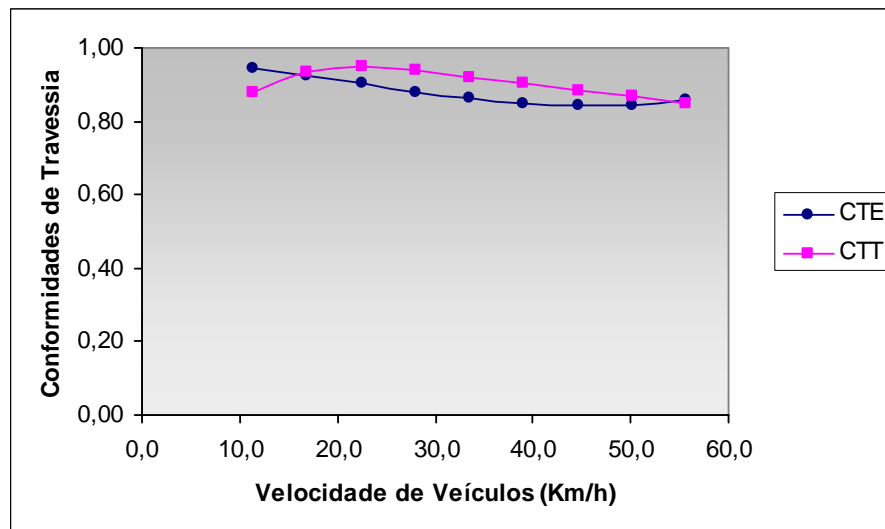
A Figura 31 representa a influência da variação do volume de veículos sobre as conformidades de travessia. Observou-se que, com o aumento do volume de veículos na via, ambas as conformidades de travessia espacial e temporal assumem uma tendência crescente.



**Figura 31** Variação da variável volume de veículos

### 6.3.3.6 Análise da variável velocidade dos veículos

A influência da variável velocidade dos veículos nas conformidades de travessia espacial e temporal é apresentada na Figura 32. Através da análise foi possível constatar que, com o aumento da velocidade dos veículos ocorrem tendências decrescentes em ambas conformidades de travessia.

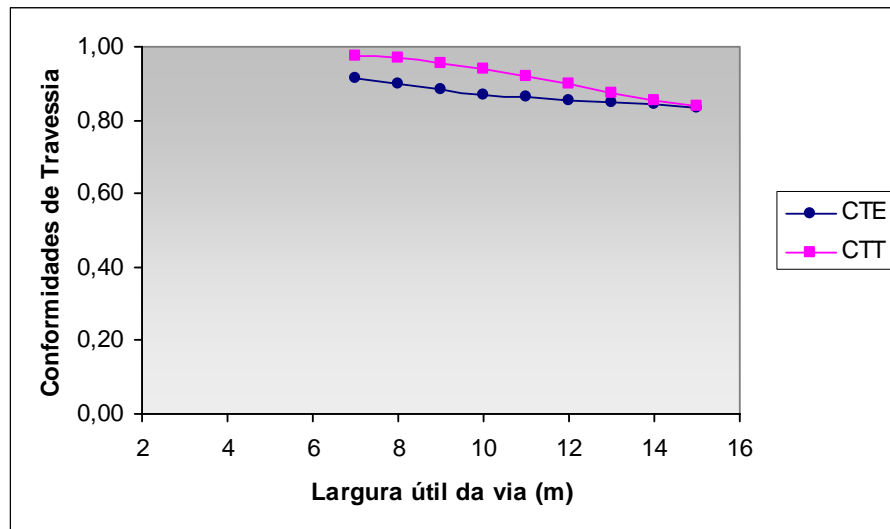


**Figura 32** Variação da variável velocidade dos veículos

Era esperada uma relação onde velocidades mais altas gerassem conformidades de travessia maiores. Uma possível explicação, de maneira geral, é que velocidades altas estão associadas a volumes de fluxo mais baixos e maiores *gaps* na corrente de tráfego. Nesta situação, o comportamento dos pedestres pode revelar-se mais ousado e contribuir para conformidades de travessia menores.

### 6.3.3.7 Análise da variável largura útil da via

A Figura 33 representa a variação das conformidades de travessia frente à variação da largura útil para travessia. A análise indica uma tendência decrescente em ambas conformidades.



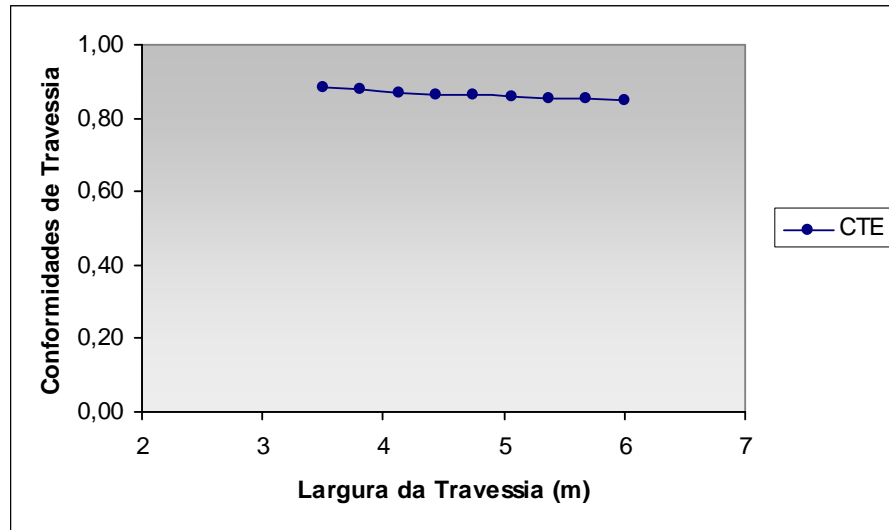
**Figura 33** Variação da variável largura útil da via

Esperava-se que larguras maiores para travessia produzissem variações crescentes nas conformidades. É importante ressaltar que a modelagem foi realizada com a observação de cinco locais de estudo. A consideração de outros valores de largura de via poderia qualificar a análise.

#### 6.3.3.8 Análise da variável largura da travessia

A variável largura da travessia foi incluída somente na modelagem de previsão para a conformidade de travessia espacial. A influência desta variável na conformidade é apresentada na Figura 34. No entanto, observa-se que, de forma geral, a largura da travessia exerce uma influência muito pequena sobre a conformidade de travessia espacial, apresentando uma leve tendência decrescente.





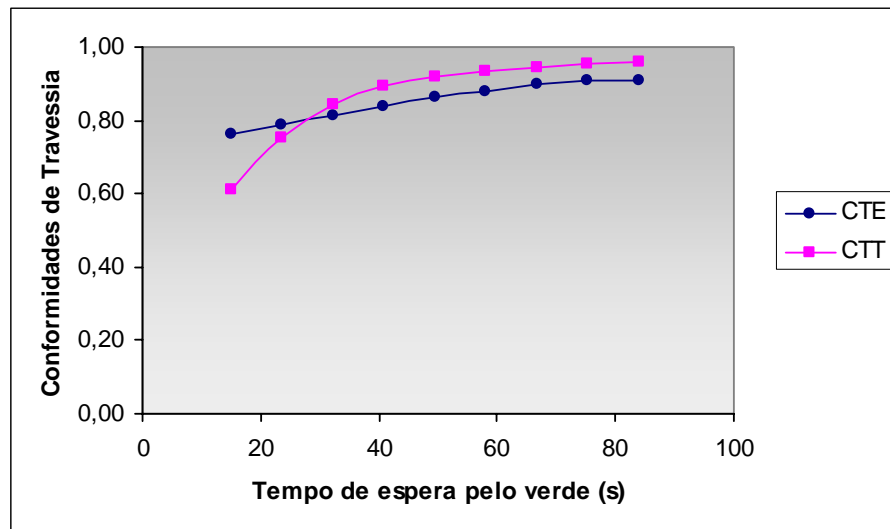
**Figura 34** Variação da variável largura da travessia

#### 6.3.3.9 Análise da variável tempo de espera pelo verde

A Figura 35 representa a variação da variável tempo de espera pelo verde no semáforo. A modelagem permite constatar que ambas conformidades assumem um comportamento levemente crescente quando esse tempo aumenta. Observa-se, porém, que na conformidade de travessia temporal essa tendência é mais acentuada até cerca de quarenta segundos.

Embora, se supusesse que o aumento do tempo que os pedestres esperam até a liberação do verde para travessia despertasse comportamentos agressivos e, conseqüentemente, conformidades de travessia menores, esta hipótese não foi confirmada.

A razão disto pode estar relacionada ao fato de que o tempo de espera para pedestres corresponde ao tempo de verde para veículos. Seu valor é calculado em função do fluxo de tráfego da via. Assim, como já visto anteriormente, o aumento do volume de veículos provoca também o aumento das conformidades de travessia.



**Figura 35** Variação da variável tempo de espera pelo verde

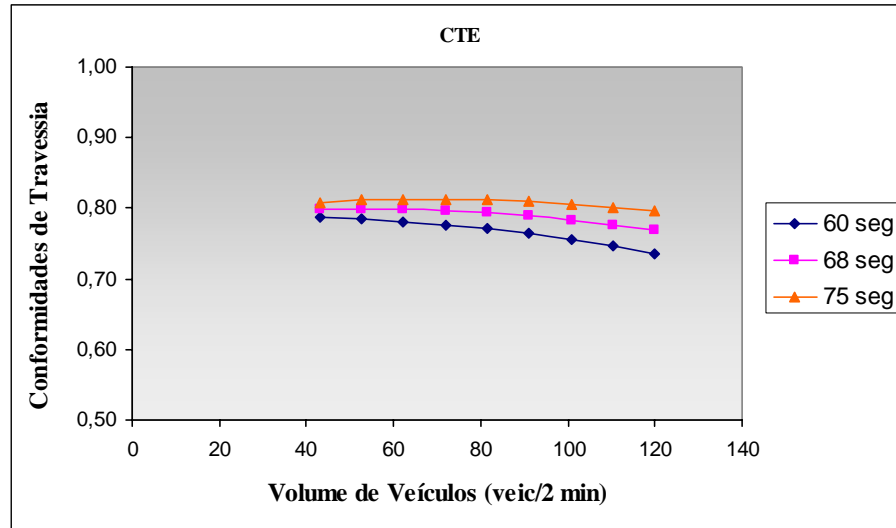
A seguir é apresentado um exemplo de possíveis aplicações do modelo.

#### 6.3.4 Exemplo da aplicabilidade do modelo

Na prática, a aplicabilidade do modelo pode auxiliar a avaliação das conformidades de travessia em decorrência de alterações nas características viárias. A seguir, é apresentado um exemplo de um situação hipotética que ilustra potenciais análises. O local escolhido para aplicação do exemplo foi a travessia da rua Siqueira Campos.

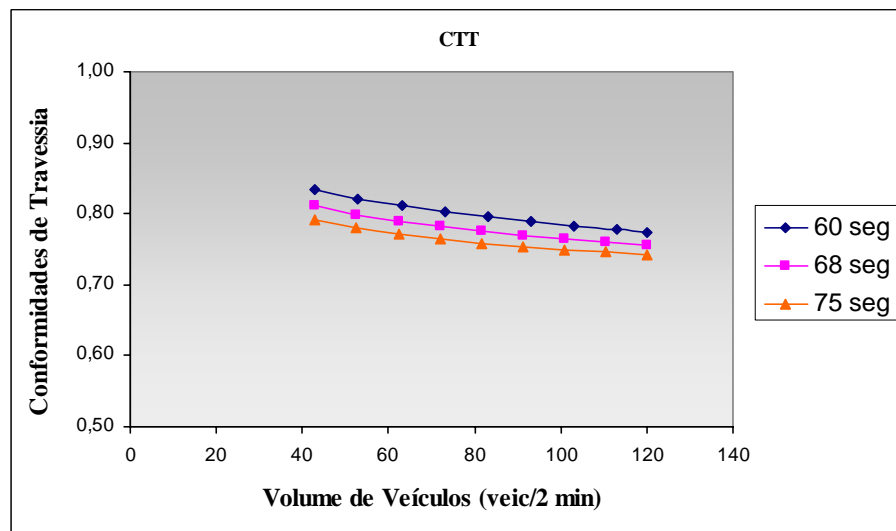
**Exemplo:** Supõe-se a existência de obras viárias em uma área localizada à montante da travessia, onde o tráfego é desviado para a rua Siqueira Campos. Hipoteticamente, considerou-se um aumento no volume de veículos de 30%. Em consequência, o ciclo semafórico que regula os fluxos na travessia deverá se adequar a essa nova situação. Assim, o tempo de espera pelo verde pelos pedestres tenderá a aumentar. Foram propostos tempos de ciclo semafórico de 80, 90 e 100 segundos. O modelo de previsão avalia a influência dessas alterações no comportamento de travessia dos pedestres. As Figura 36 e Figura 37 apresentam

a variação das conformidades considerando tempos de espera pelo verde pelos pedestres em 60, 68 e 75 segundos, respectivamente aos novos tempos de ciclo.



**Figura 36** Conformidades de Travessia Espacial, com variação dos tempos de espera

Observa-se que a conformidade de travessia espacial é maior quando os tempos de espera pelo verde são maiores. No entanto, a tendência observada neste cenário é decrescente. Uma possível explicação pode estar relacionada à saturação da via, onde os veículos trafegam em grandes volumes e baixas velocidades, contribuindo para conformidades de travessia espacial mais baixas.



**Figura 37** Conformidades de Travessia Temporal, com variação dos tempos de espera

A conformidade de travessia temporal, no cenário hipotético, também apresenta uma leve tendência decrescente. Observa-se ainda, que tempos de espera maiores geram conformidades de travessia mais baixas.

#### 6.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos através dos dados das filmagens permitiram a determinação dos índices de conformidades de travessia que ocorrem nas cinco travessias estudadas. As entrevistas forneceram as tendências dessas conformidades. Em relação à conformidade de travessia espacial, os resultados das duas técnicas de coleta não apresentaram grandes diferenças. Já a conformidade de travessia temporal informada nas entrevistas foi consideravelmente menor do que a observada nas imagens.

A modelagem com redes neurais artificiais permitiu a compreensão da influência dos fatores viário-ambientais fixos e variáveis nas conformidades de travessia. Através das análises de sensibilidade foi possível avaliar como os fatores interferem nas conformidades. É importante considerar que os dados utilizados neste trabalho correspondem a observações de cinco locais. De maneira geral, os fatores viário-ambientais fixos estudados (largura da via, largura da travessia, tempo de espera pelo verde e *gap* crítico) apresentam pouca flutuação, e por isso, sua análise torna-se limitada. Os fatores variáveis (volume de pedestres, volume de veículos, velocidades de veículos, *gap* máximo, 85° percentil de *gaps*) apresentam maiores variações, admitindo análises mais confiáveis.

O próximo e último capítulo traz as conclusões do trabalho e sugestões para continuidade e aperfeiçoamento desta linha de pesquisa.

## **7 CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

A implementação de políticas de transporte e circulação deve proporcionar o acesso amplo e democrático ao espaço urbano, através da priorização dos modos não motorizados e coletivos de transportes, de uma maneira socialmente inclusiva e ecologicamente sustentável. Assim, a disponibilidade de um sistema adequado e seguro para pedestres pode otimizar o uso das estruturas e, conseqüentemente, a segurança de todos os usuários.

Durante a revisão bibliográfica foi possível constatar a escassez de trabalhos abrangendo a influência que o ambiente viário exerce no comportamento de pedestres. As travessias para pedestres representam pontos cruciais na operação de um sistema de transportes, uma vez que, se utilizadas adequadamente, contribuem para o aumento da segurança dos pedestres e diminuem os desvios de atenção dos motoristas que trafegam pelas vias.

Este trabalho buscou o desenvolvimento de um modelo conceitual que auxilia a compreensão do padrão de comportamento de pedestres em travessias semaforizadas. A construção do modelo foi realizada através da agregação de diferentes abordagens sobre o comportamento dos usuários, atendendo ao primeiro objetivo específico da pesquisa. A estrutura do modelo conceitual propõe a classificação dos pedestres de acordo com suas atitudes ao atravessar uma via. Com relação à conformidade de travessia espacial, os pedestres classificam-se em prudentes e imprudentes. Em relação à conformidade de travessia temporal, os pedestres classificam-se em obedientes e oportunistas.

A identificação dos fatores que influenciam as decisões dos pedestres, correspondente ao segundo objetivo específico deste estudo, foi realizada através da análise

da literatura sobre o assunto. Os aspectos intervenientes no comportamento de pedestres em travessias semaforizadas foram classificados em fatores viário-ambientais fixos e variáveis. Os fatores viário-ambientais fixos considerados neste trabalho envolveram a largura da via, largura da travessia, tempo de espera pelo verde para pedestres no semáforo e *gap* crítico. Os fatores viário-ambientais variáveis considerados foram volume de pedestres, volume de veículos, velocidade dos veículos e características da distribuição de *gaps*.

Com os objetivos de determinar as condições de utilização das travessias através dos índices de conformidade e, identificar a percepção dos pedestres em relação aos fatores intervenientes em seu comportamento foi realizada uma coleta de dados em cinco travessias na região central de Porto Alegre. O processo de coleta envolveu filmagens das travessias e entrevistas com pedestres.

O desenvolvimento dos modelos de previsão com a utilização de redes neurais artificiais corresponde ao quinto objetivo específico desta pesquisa. A construção destes modelos foi procedida com o intuito de analisar os efeitos dos fatores viário-ambientais considerados sobre as conformidades de travessia espacial e temporal.

Desta forma, a avaliação do padrão do comportamento de pedestres em travessias semaforizadas foi realizada através da análise das conformidades observadas, verificadas a partir das filmagens e, das conformidades informadas, obtidas através das entrevistas com pedestres. Ainda, essa avaliação envolveu a análise da variação das conformidades de travessia decorrente de alterações dos fatores viário-ambientais estudados.

De forma geral, o padrão de comportamento nas travessias semaforizadas estudadas na região central de Porto Alegre indicou que, durante o período observado, 81% dos

pedestres foram prudentes e 19% imprudentes. Com relação à conformidade de travessia temporal, 89% comportaram-se como pedestres obedientes e 11% como oportunistas.

O modelo conceitual proposto neste trabalho pode auxiliar na compreensão sobre o uso das travessias semaforizadas. A utilização do modelo fornece subsídios para a implementação de melhorias no espaço viário, seja sob a forma de intervenções físicas na via ou operacionais, como mudanças nos tempos semafóricos. Para fins de planejamento, os resultados provenientes da análise podem auxiliar profissionais de engenharia de tráfego no projeto de estruturas mais eficientes. Os resultados da aplicação do modelo demonstraram que, de forma geral, as ações no sentido de concentrar o fluxo de pedestres podem disciplinar suas atitudes e contribuir para o aumento da segurança.

Com relação às técnicas de coleta de dados utilizadas, as filmagens ofereceram a vantagem de observação das condições do ambiente viário em períodos distintos. No entanto, o uso desta técnica depende da existência de condições adequadas para sua realização. A qualidade dos dados provenientes das entrevistas com pedestres depende da objetividade e clareza do questionário e da forma como são coletados. O treinamento de pesquisadores é essencial para sua motivação em conduzir as entrevistas adequadamente.

A principal contribuição desta pesquisa encontra-se no tipo de análise realizado e na utilização de uma técnica de inteligência artificial que subsidia a compreensão dos efeitos que influenciam as atitudes dos usuários. A utilização de redes neurais artificiais oferece um padrão de previsão diferenciado, uma vez que considera as relações não lineares existentes entre as variáveis. A metodologia de reprodução da modelagem de redes neurais em planilha eletrônica possibilitou um tratamento dos dados de saída mais rápido e fácil.

Como sugestão para trabalhos futuros, propõe-se a utilização de outras abordagens para análise dos dados, incorporando análises estatísticas. A consideração de outros locais com características distintas às estudadas nesta pesquisa poderia qualificar as análises. Da mesma forma, a investigação da influência de outros fatores diferentes daqueles utilizados neste trabalho poderia contribuir para uma melhor compreensão do problema. Supõe-se, que medidas de tratamento como elevação do nível da travessia, diferenciação do piso, melhor sinalização e iluminação das travessias de pedestres podem contribuir para o aumento dos índices de conformidade.

Outra sugestão envolve uma investigação qualitativa das correlações entre os fatores viário-ambientais fixos e variáveis evidenciadas pela modelagem com redes neurais artificiais. Ainda, sugere-se a utilização dos índices de conformidade de travessia em modelos de simulação de pedestres e veículos. A compreensão de como o tráfego afeta o comportamento dos pedestres, sob o ponto de vista dos pedestres, pode subsidiar a avaliação dos riscos existentes e auxiliar na implementação de formas alternativas de controle ou operação do tráfego.



## REFERÊNCIAS

- ANTP Perfil da Mobilidade, do Transporte e do Trânsito nos Municípios Brasileiros 2003. **Relatório Técnico**. Associação Nacional de Transportes Públicos e Ministério das Cidades. Brasil, 2004.
- ARIOTTI, P.; CYBIS, H. B. B. Modelo de análise do comportamento de pedestres em travessias semaforizadas. **Anais do XIX Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes**, ANPET, Recife, v. 2, p.1142-1153, 2005.
- BOCANEGRA, C. W. R. Procedimentos para Tornar mais Efetivo o Uso de Redes Neurais Artificiais em Planejamento de Transportes. **Dissertação de Mestrado**. Escola de Engenharia de São Carlos – USP, São Paulo, 2002.
- BRAGA, A. P.; LUDERMIR, T. B. **Redes Neurais Artificiais Teoria e Aplicações**. Editora LTC, Rio de Janeiro, 262p., 2002.
- CALIFORNIA SCIENTIFIC SOFTWARE. **BrainMaker Professional: User's Guide and Reference Manual**, 5ª edition, Nevada City, EUA, 1998.
- CARDOSO, A. A. Redes Neurais Artificiais na Avaliação de Concentração de Tensões em Juntas Tubulares Soldadas. **Tese de Doutorado**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Naval, USP, São Paulo, 1999.
- CARSTEN, O. M. J.; SHERBORNE, D. J.; ROTHENGATTER, J. A. Intelligent traffic signals for pedestrians: evaluation of trials in three countries. **Transportation Research Part C**, No.6, p. 213–229, 1998.
- CHU, X.; GUTTENPLAN, M.; BALTES, M. Why People Cross Where They Do – The Role of the Street Environment. **TRB Annual Meeting CD-ROM**. No. 03-3078, 2003.
- CTB **Código de Trânsito Brasileiro**. Lei Federal nº 9.503 de 23 de setembro de 1997.
- DAVIES, H. E. H. The puffin pedestrian crossing: experience with the first experimental sites. **Research Report 364**. Transport Research Laboratory, Crowthorne, UK, 1992.
- DENATRAN. Departamento Nacional de Trânsito. **Serviços de Engenharia: Manual de Segurança de Pedestres**. Brasília, DF, 1979.
- DOUGHERTY, M. A Review of Neural Networks Applied to Transport. **Transportation Research C**, Vol.3, No.4, p. 247-260, 1995.
- EDOM Pesquisa de Origem e Destino de Porto Alegre - Entrevista Domiciliar - EDOM 2003. **Relatório Técnico**. EPTC/Magna/TIS, Porto Alegre, 2004.

EPTC Empresa Pública de Transporte e Circulação. Porto Alegre. Disponível em [http://www.eptc.com.br/Seguran%E7a\\_Viaria/Seguranca.asp?codigo\\_estatistica%20=%200](http://www.eptc.com.br/Seguran%E7a_Viaria/Seguranca.asp?codigo_estatistica%20=%200), acessado em 10 de março de 2005.

FRICKER, J. D., WHITFORT, R. K. **Fundamentals of Transportation Engineering – A Multimodal Systems Approach**, Prentice Hall, 776p., 2004.

FU, L. **Neural Networks in Computer Intelligence**. New York, McGraw-Hill, 1994.

GARDER, P. Pedestrian safety at traffic signals: a study carried out with the help of a conflict technique. **Accident Analysis and Prevention**, No. 21, p. 435–444, 1989.

GARSON, D. G. Interpreting Neural-Network Connection Weights. **Artificial Intelligence Expert**, April, p. 47-51, 1991.

GONDIM, M. F. Transporte Não Motorizado na Legislação Urbana no Brasil. **Dissertação de Mestrado**. COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, 2001.

HAKKERT, A. S.; GITELMAN, V.; BEN-SHABAT, E. An evaluation of crosswalk warning systems: effects on pedestrian and vehicle behaviour. **Transportation Research Part F**, No. 5, p. 275–292, 2002.

HANDY, S. L. Urban form and pedestrian choices. **Transportation Research Record**, No. 1552, p. 135–144, 1996.

HAYKIN, S. **Neural Networks: A Comprehensive Foundation**. Hamilton: Prentice-Hall, 697p., 1994.

HAYKIN, S. **Redes neurais: princípios e práticas**. Trad. Paulo Martins Engel, 2ª ed., Porto Alegre: Bookman, 2001.

HERTZ, J.; KROGH, A.; PLAMER, R. G. **Introduction to the Theory of Neural Computation**. Ed. Adison-Wiley, Redwood City, EUA, 1991.

KEEGAN, O.; O'MAHONY, M. Modifying pedestrian behaviour. **Transportation Research Part A**, No. 37, p. 890–901, 2003.

LAWRENCE, J. **Introduction to Neural Networks – Design, Theory and Applications**. 6ª Edição, California Scientific Software, Nevada City, CA, EUA, 1994.

LEVELT, P. M. B. Improvement of pedestrian safety and comfort at traffic lights: results from French, British and Dutch tests. **Report of DRIVE Project V1061, PUSSYCATS, R-92-56**. SWOV Institute for Road safety Research, Leidschendam, Netherlands, 1992.

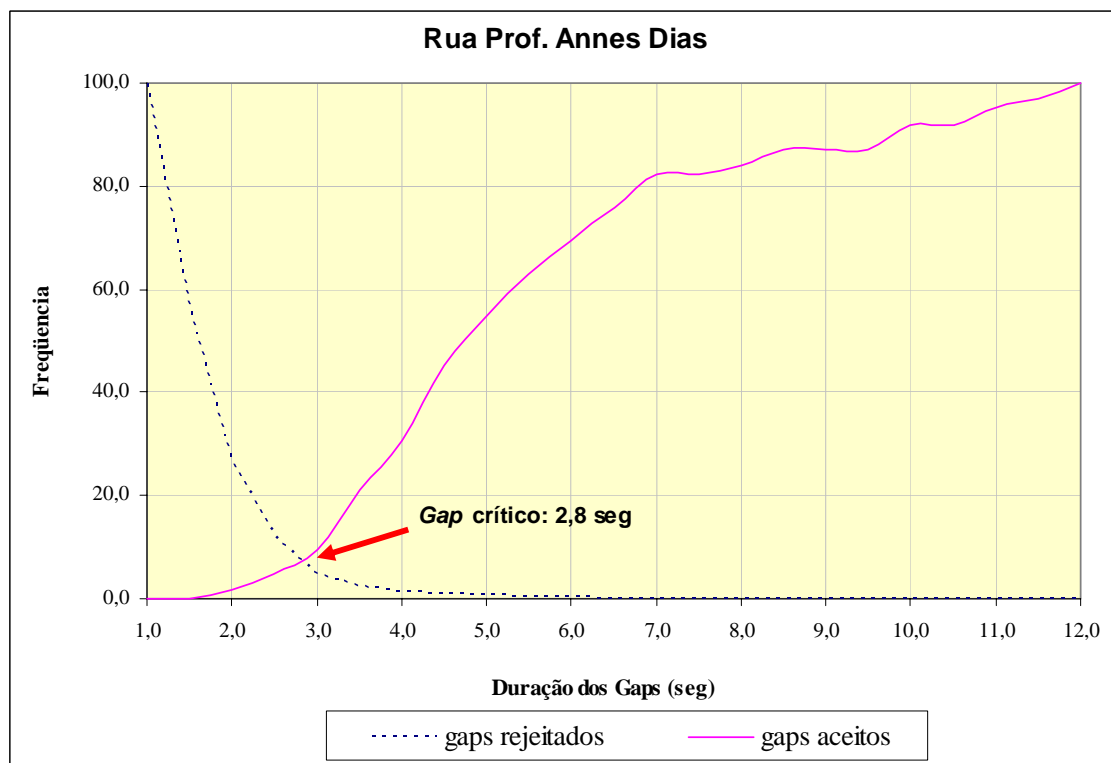
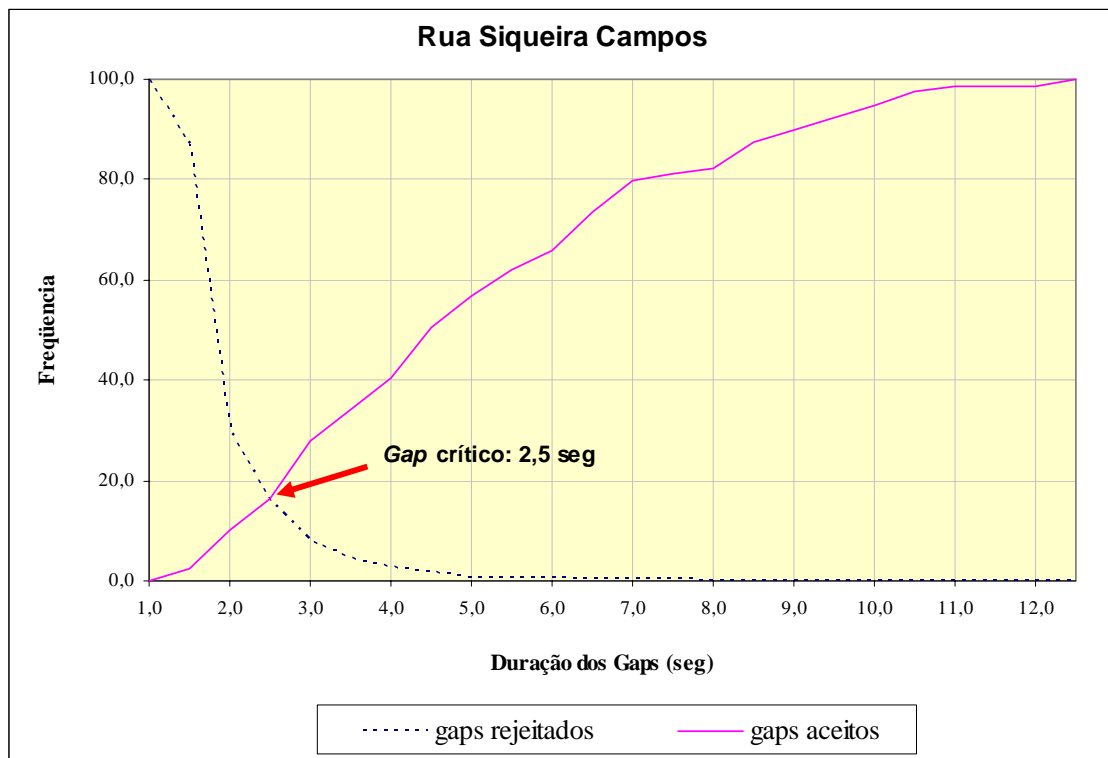
LIU, R.; SILVA, J. P.C.; SECO, A. J. M. A Bi-Modal Microsimulation Tool for the Assessment of Pedestrian Delays and Traffic Management. **9th International Association of Travel Behaviour Research Conference**, Gold Coast, 2000.

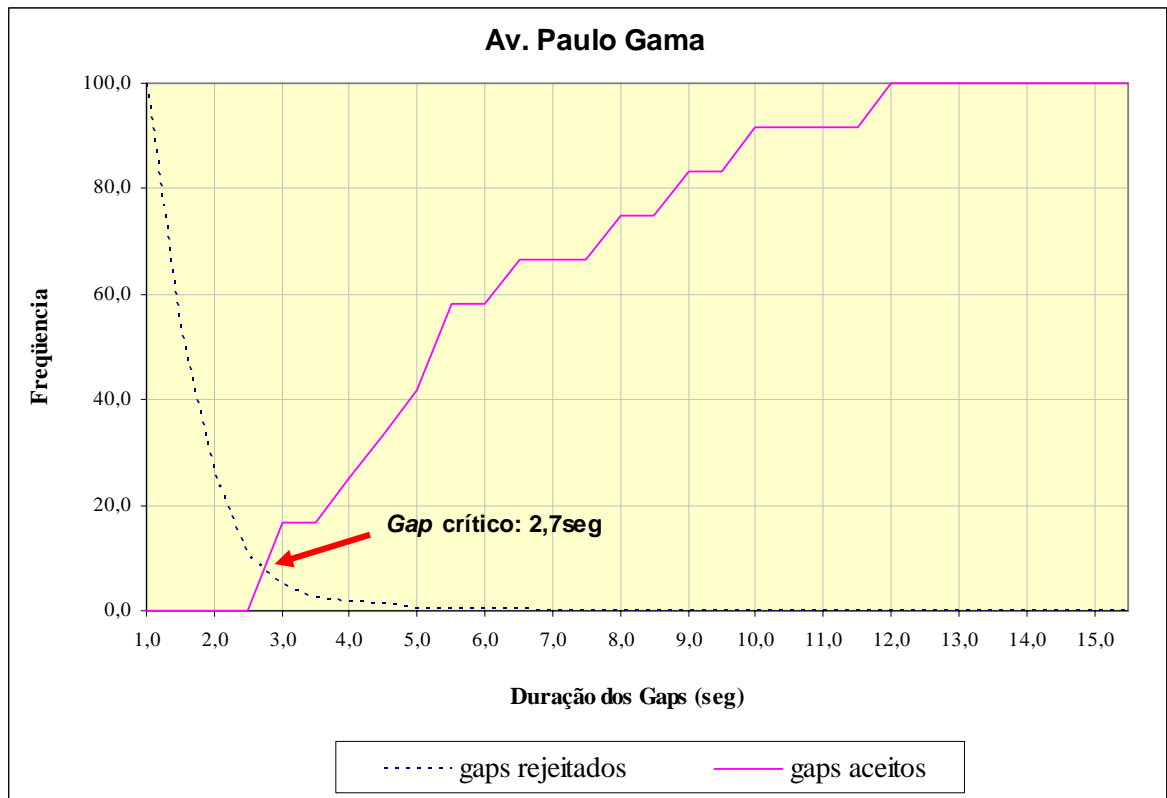
LOESCH, C.; SARI, S. T. **Redes Neurais Artificiais: Fundamentos e Modelos**. Blumenau, FURB, 1996.

- MANEL, S.; DIAS, J. M.; ORMEROD, S. J. Comparison Discriminant Analysis, Neural Networks and Logistical Regression for Predicting Species Distributions: A Case Study with a Himalayan River Bird. **Ecological Modelling** **120**, p. 337-347, 1999.
- MATSON, T.; SMITH, W. S.; HURD, F. W. **Traffic Engineering**. McGraw-Hill Book Company, 647p, 1995.
- MCCULLOCH, W. S.; PITTS, W. A Logical Calculus of the Ideas Immanent in Nervous Activity. **Mathematical Biophysics**, Vol.5, No.115, p.18-27, 1943.
- MIRANDA, V. A. A.; CABRAL, S. D. Os Conflitos Pedestres - Veículos no Entorno de Postos de Gasolina. **Anais do VII Congresso Nacional do Trânsito**, São Paulo, 2002.
- MONHEIN, R. The Role of Pedestrian Precincts in the Evolution of Germain City Centres from Shopping to Urban Entertainment Centres. **Australia: Walking the 21st Century**, p. 43-52, 2001.
- OLIVEIRA, M. E. **Redes Neurais Artificiais**. Disponível em: <http://geocities.com/CapeCanaveral/Runway/4303/engenharia.html>. Acessado em 29 de novembro de 2005, 2000.
- OLIVEIRA, M. L. Fatores Intervenientes na Capacidade de Atendimento de Praças de Pedágio. **Dissertação de Mestrado**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Porto Alegre, 2004.
- ÖZESMI, S. L.; ÖZESMI, U. An Artificial Neural Network Approach to Spatial Habitat Modelling with Interspecific Interaction. **Ecological Modelling** **116**, p. 15-31, 1999.
- PAPACOSTAS, C. S.; PREVEDOUROS, P. D. **Transportation Engineering and Planning**. Prentice Hall. New Jersey, 685p., 2001.
- PARUELO, J. M., TOMASEL, F. Prediction of Functional Characteristics of Ecosystems: A Comparison of Artificial Neural Networks and Regression Models. **Ecological Modelling** **98**, p. 173-186, 1997.
- PLINE, J. L. **Traffic Engineering Handbook**. Institute of Transportation Engineers. Prentice Hall, New Jersey, 481p., 1992.
- RAMOS-NINO, M. E.; RAMIREZ-RODRIGUEZ, C. A.; CLIFFORD, M. N.; ADAMS, M. R. A Comparison of Quantitative Structure-Activity Relationships for the Effect of Benzoic and Dinnamic Aids on Listeria Monocytogenes Using Multiple Linear Regression, Artificial Neural Network and Fuzzy Systems. **Journal of Applied Microbiology** **82**, p. 168-176, 1997.
- RIBEIRO, J. L., ECHEVESTE, M. E. E DANILEVICZ, A. QFD - **Desdobramento da Função Qualidade**, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Porto Alegre, 2000.
- ROESS, R. P., PRASSAS, E. S., MCSHANE, W. R. **Traffic Engineering**. Prentice Hall, 786p., 2004.

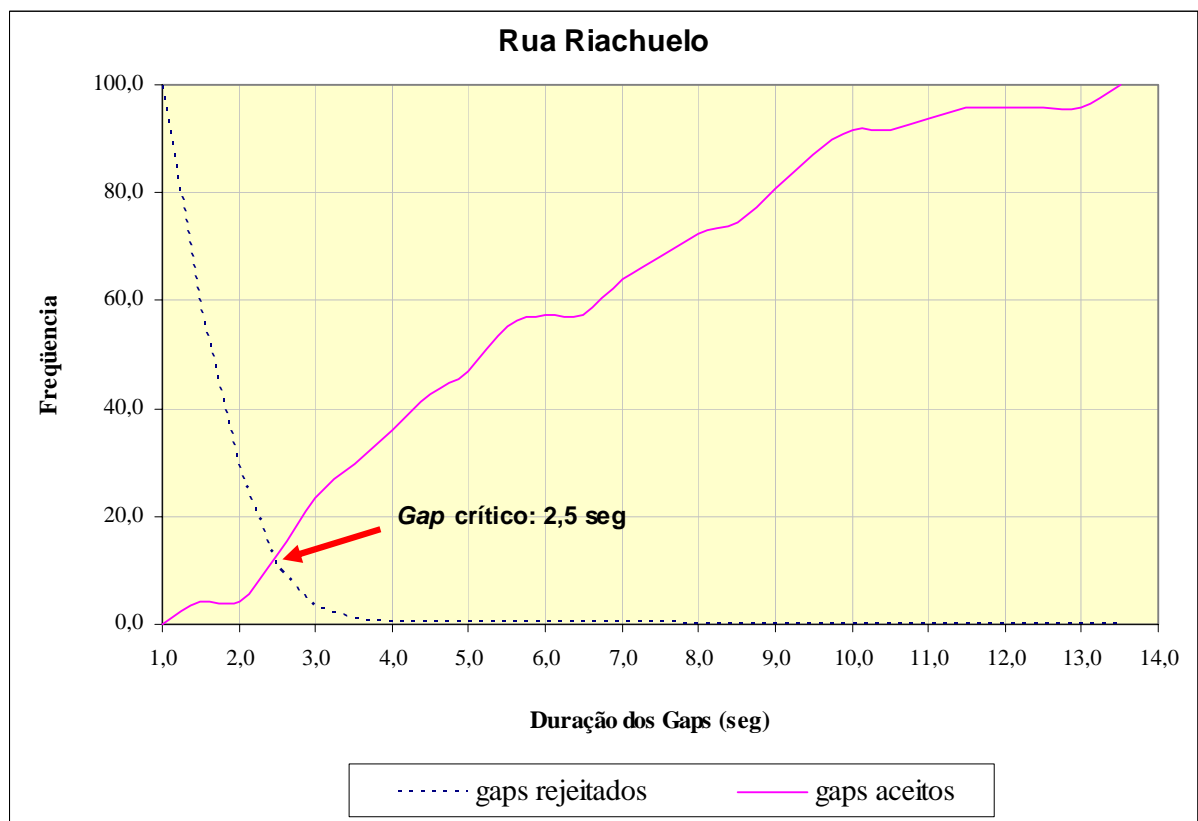
- ROISENBERG, M. Emergência de inteligência em agentes autônomos através de modelos inspirados na natureza. **Tese de Doutorado**, Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, 1999.
- ROUPHAIL, N. M. Midblock crosswalks: a user compliance and preference study. **Transportation Research Record**, No. 959, p.41–47, 1984.
- SARKAR, S. Qualitative Evaluation of Comfort Needs in Urban Walkways in Major Activity Centers. **TRB Annual Meeting CD-ROM**, 2003.
- SHRIVER, K. Influence of environmental design on pedestrian travel behavior in four Austin (TX, USA) neighborhoods. **Transportation Research Record**, No. 1578, p. 65–73, 1997.
- SILVA, R.M.; FERREIRA, D.L. O Planejamento na Secretaria de Trânsito e transportes de Uberlândia – MG, **Caminhos de Geografia**. No. 10, p. 150-167, 2004.
- SISIOPIKU, V. P. Pedestrian Crossing Compliance: Estimation Methods and Behavioral Analysis. 2000. Disponível em <http://ecthome.cs.depaul.edu/schan/blue15/proceedings%5C2000/Sisiopiku.pdf>. Acessado em agosto de 2005.
- SISIOPIKU, V. P.; AKIN, D. Pedestrian Behaviors at and Perceptions Towards Various Pedestrian Facilities: an Examination Based on Observation and Survey Data. **Transportation Research Part F**, No. 6, p. 249-274, 2003.
- SMITH, M. **Neural Networks for Statistical Modeling**. International Thomson Computer Press, London, 253p.,1993.
- STARRETT, S. K.; ADAMS, G. L. Using Artificial Neural Networks and Regression to Predict Percentage of Applied Nitrogen Leached Under Turfgrass. **Communications in Soil Science Plant Analytical**. No 28, p. 497-507, 1997.
- TANABORIBOON, Y.; JING, Q. Chinese pedestrians and their walking characteristics: case study in Beijing. **Transportation Research Record**, No. 1441, p. 16–26, 1994.
- VASCONCELLOS, E. A. **Transporte urbano nos países em desenvolvimento: reflexões e propostas**. Annablume, São Paulo, 2000.
- VASCONCELLOS, E. A. **Transporte Urbano, Espaço e Equidade: Análise das Políticas Públicas**. Annablume, São Paulo, 2001.
- WASSERMAN, P. D. **Advanced Methods in Neural Computing**. Van Nostrand Reinhold, New York, EUA, 1989.
- YAGIL, D. Beliefs, motives and situational factors related to pedestrians' self-reported behavior at signal-controlled crossings. **Transportation Research Part F**, No.3, p. 1-13, 2000.
- ZACHARIAS, J. Pedestrian Behavior and Perception in Urban Walking Environments. **Journal of Planning Literature**, Vol.16, No.1, p. 1-18, 2001.

## APÊNDICE: GAPS CRÍTICOS PARA OS LOCAIS DE ESTUDO

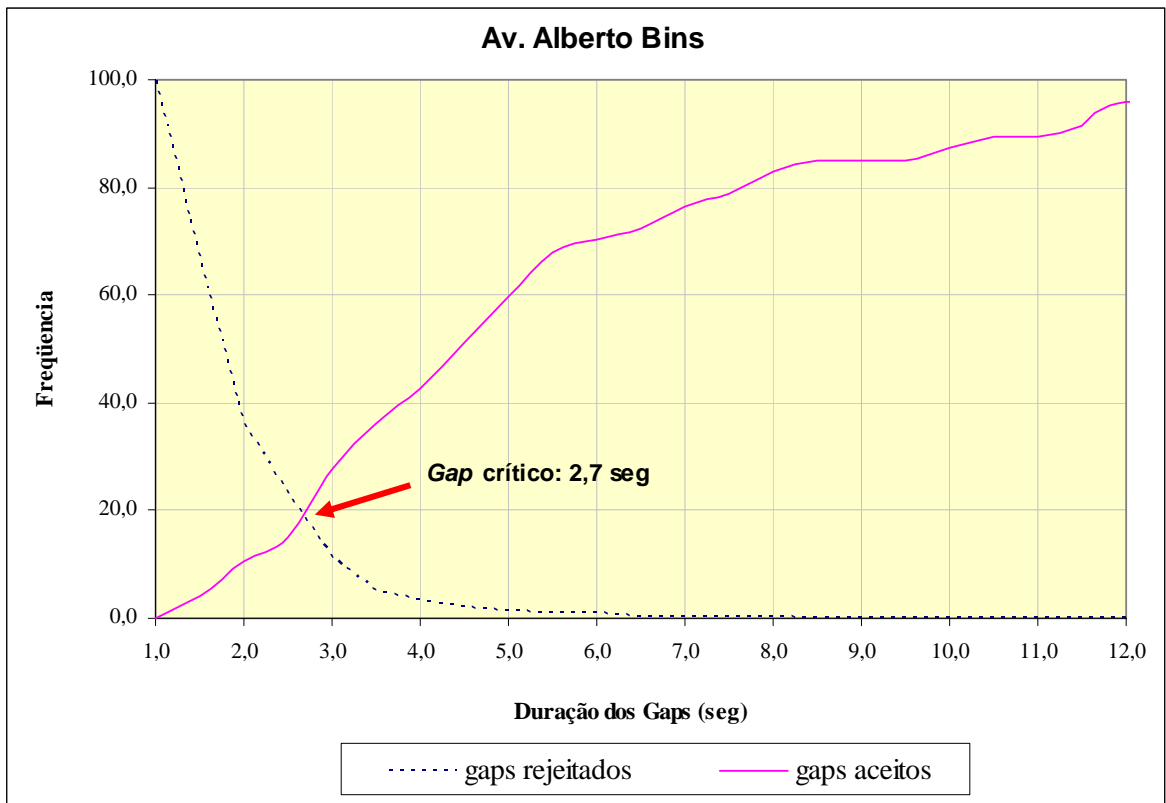




**Figura 40** *Gap* crítico para a Av. Paulo Gama



**Figura 41** *Gap* crítico para a Rua Riachuelo



**Figura 42** Gap crítico para a Av. Alberto Bins