ULISSES DEMARCHI SILVA TERRA

Arquitetura em espaços de fluxo

modelagem e simulação em estações metroferroviárias e espaços de multidão

EXEMPLAR REVISADO E ALTERADO EM RELAÇÃO
À VERSÃO ORIGINAL, SOB RESPONSABILIDADE DO
AUTOR E ANUÊNCIA DO ORIENTADOR.

O original se encontra disponível na sede do programa.

São Paulo, 25 de junho de 2014.

São Paulo

2014

ULISSES DEMARCHI SILVA TERRA

Arquitetura em espaços de fluxo

modelagem e simulação em estações metroferroviárias e espaços de multidão

Dissertação apresentada à Faculdade de
Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São
Paulo para obtenção do título de Mestre em
Arquitetura e Urbanismo.

Área de concentração: Tecnologia da Arquitetura

Orientador: Prof. Dr. Arthur Hunold Lara

São Paulo

2014

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

E-MAIL DO AUTOR: ulissesterra@yahoo.com.br

Terra, Ulisses Demarchi Silva
T323a Arquitetura em espaços de fluxo: modelagem e simulação em
estações metroferroviárias e espaços de multidão / Ulisses
Demarchi Silva Terra. -- São Paulo, 2014.
157 p. : il.

Dissertação (Mestrado - Área de Concentração: Tecnologia
da Arquitetura) – FAUUSP.
Orientador: Arthur Hunold Lara

1. Terminais de transportes 2. Circulação de pedestres
(Simulação; Modelos) 3. Mobilidade urbana 4. Projeto de arquitetura
I. Título

CDU725.312

Ao meu pai, em todo tempo, o grande inspirador de meus percursos (*in memoriam*)

AGRADECIMENTOS

Em tempos e espaços, agradeço ...

Ao professor Arthur Lara, paciente e dedicado orientador. Sempre em busca de novos conhecimentos, teorias, conceitos e práticas. Não foi só um professor, mas um amigo, fonte inesgotável de energias e idéias. Aos professores Marcelo Eduardo Giacaglia e Norberto Correa da Silva Moura, críticos e balizadores que trouxeram contribuições importantes ao desenvolvimento da pesquisa. À professora Gabriela Celani que além das construtivas críticas e importantes contribuições ampliou os conhecimentos sobre o tema e me encorajou a novos percursos.

Ao Cauê Guazzelli, grande amigo e irmão. Sem você esta pesquisa não seria a mesma. Não só pelas leituras, revisões e correções, mas também pelo apoio nos momentos de dúvida e nas ricas discussões sobre o tema. À Janete pela leitura, pelas revisões e recomendações.

Aos irmãos: Vinicius, que quase como um poeta, sempre me inspirou a entender o mundo com um outro olhar; Janaina, pelo eterno carinho e pelas leituras e críticas que tornaram este trabalho mais compreensivo e melhor organizado; Ao Helder, paciente e companheiro, que quase sem perceber foi um grande apoio todos os dias e em todos os abraço. À mãe, Dalva, aqui muito mais que uma mãe. Das comidinha às leituras, das sugestões, críticas e correções.

À vó Quinha, inspiração de vida, de força e energia. Às querias tias Helenir, Cenir e Ivanir. Pela paciência e pelo carinho mesmo em minha ausência.

Aos amigos todos, que dia após dia me incentivaram com palavras e energias para a conclusão deste trabalho e que também compreenderam minhas ausências. Ao grande amigo Pedro, sempre inspirador de uma arquitetura e de um ser humano melhor. À Patrícia, colega e amiga da FAU, com quem dividi conhecimentos e ansiedades de um mestrado em desenvolvimento.

À Rafaela, por todo carinho e pela paciência de me entender mesmo em meus momentos mais difíceis.

Aos arquitetos, engenheiros e técnicos da Logit Engenharia Consultiva, da Modelle Logística e Engenharia, e da Steer Davies Gleave, por todos os dados, entrevistas, reuniões e pela grande prestatividade. Aos técnicos da ViaQuatro, da Secretaria de Transportes do Rio de Janeiro, do Consórcio Minas Arenas e do Arena das Dunas Concessão e Eventos, pelos relatórios cedidos e pelas compreensão do fim desta pesquisa. À Fabiana Nonogaki, grande arquiteta e amiga, projetista do Metrô que muito auxiliou e inspirou esta pesquisa.

Aos amigos e colegas da UFABC que compreenderam e aceitaram minha licença para a conclusão desta pesquisa.

E finalmente, agradeço imensamente à todos os pesquisadores, arquitetos, engenheiros, designers, filósofos e escritores que mesmo sem me conhecer, dialogaram comigo constantemente e me inspiraram no desenvolvimento deste trabalho.

Enquanto tenho um corpo e através dele ajo no mundo, para mim o espaço e o tempo não são uma soma de pontos justapostos, nem tampouco uma infinidade de relações das quais minha consciência operaria a síntese e em que ela implicaria meu corpo; não estou no espaço e no tempo, não penso o espaço e o tempo; eu sou no espaço e no tempo, meu corpo aplica-se a eles e os abarca.

Maurice Merleau-Ponty

RESUMO

O objetivo desta pesquisa é investigar como o fluxo de pedestres interfere na concepção arquitetônica dos espaços que envolvem multidões. Tendo como objeto inicial as estações metroferroviárias, realizou-se um abrangente levantamento bibliográfico sobre o tema, buscando abordá-lo na complexidade que envolve o comportamento humano, a engenharia, a arquitetura e a construção. Conceitos sobre modelagem e simulação de fluxos de pedestres são apresentados e servem de base para o desenvolvimento de um estudo de caso sobre a concepção de distintos espaços arquitetônicos: O Estádio Arena das Dunas, em Natal; o Estádio Mineirão, em Belo Horizonte; o Parque Olímpico, no Rio de Janeiro; e a interligação metroviária Paulista-Consolação, em São Paulo. A presente pesquisa não tem a pretensão de apresentar soluções ou diretrizes de projeto para espaços que envolvem multidões, mas busca investigar como a concepção desses espaços pode ser alterada a partir de uma abordagem que coloca os pedestres como elemento determinante da arquitetura.

Palavras-Chave: terminais de transportes, circulação de pedestres (simulação; modelos), mobilidade urbana, projeto de arquitetura.

ABSTRACT

This essay aims at investigating how the pedestrian flow interferes the architectural design of the places full of people. Regarding the subway and rail stations as the initial objective, it was made a comprehensive bibliographic survey about this subject in order to speaking about the human behavior engineering, architecture and construction complexity. It is presented the modeling and simulation concepts of pedestrian flows which function as the basis for the development of a case study of different architectural spaces design: the Arena das Dunas Stadium in Natal, the Mineirão Stadium in Belo Horizonte, the Olympics Park in Rio de Janeiro and the subway stations interconnection Consolação-Paulista in São Paulo. This essay does not intend to present solutions or design guide lines for places full of people, but investigate how the design of these places can be changed from an approach that is considering the pedestrians as a determinant element of the architecture.

Key words: transport terminals, pedestrian traffic (simulation; models), urban mobility, architectural design.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1-1. Representação de concentração de passageiros no metrô de São Paulo.....	3
Figura 3-2. Desenvolvimento de diagrama de sistema de colunas com base em fios de lã molhada. ..	30
Figura 4-1. Diagrama de elementos funcionais da estação.	36
Figura 4-2. Níveis de conforto.	39
Figura 5-1. Duas partículas em interação com relação de massa, aceleração e movimento, e <i>Scripts</i> com uso do <i>plug-in Grasshopper</i>	54
Figura 5-2. Representação do modelo de rede com os tipos de <i>links</i> e os <i>nós</i>	59
Figura 5-3. Esquema de simulação da capacidade de passagem de pedestre em situações de grande aglomeração.	61
Figura 5-4. Velocidade de Caminhada X Espaço por pedestre.	63
Figura 5-5. Modelo de simulação desenvolvido por Guazzelli no software <i>Arena</i>	63
Figura 6-1. <i>The Horse in Motion</i> . "Sallie Gardner" by Leland Stanford, 1978. Fonte : http://www.loc.gov/pictures/resource/cph.3a45870/	66
Figura 6-2. Cronofotografia em desenvolvimento do processo fotográfico feita por Marey, 1886. Fonte: BRAUN, 1992, p. 106, <i>apud</i> TERRA, 2002, p.17.....	67
Figura 6-3. Cronofotografia geométrica parcial. Imagens sucessivas de uma marcha, 1883.	68
Figura 6-4. Detecção e análise de pedestres utilizando ferramenta de processamento de vídeo PeTrack.	72
Figura 6-5. Mapas de ocupação por número de pessoas e mapa de fluxos. Fonte: TOMÉ; HEITOR, 2011, p.155.....	75
Figura 6-6. Gráfico com variação horária dos valores máximos para os índices de ocupação: tempo e número de pessoas. Fonte: TOMÉ; HEITOR, 2011, p.162.....	76
Figura 7-1 Fluxograma base para o desenvolvimento dos estudos de modelagem e simulação de fluxo de pedestres.	81
Figura 7-2. Diagrama de modelo de forças sociais para dinâmica de pedestres.	83
Figura 7-3. Diagrama de assimetria de forças do VISSIM.	84
Figura 7-4. Diagrama de ambiente arquitetônico com campo das forças de atração.	84
Figura 7-5. Estudos e análise de movimento de pedestres para o aprimoramento do software Legion.	86
Figura 7-6. Diagrama de interações do software Legion relativos a satisfação do pedestre.....	87
Figura 7-7. Maquete eletrônica do projeto do Estádio Arena das Dunas.....	89
Figura 7-8. Corte de maquete eletrônica do Estádio Arena das Dunas.....	90
Figura 7-9. Corte do estádio com demarcação de áreas de segurança e áreas de segurança relativa....	93
Figura 7-10. Planta do estádio com codificação dos acessos.....	94
Figura 7-11. Gráfico com tempo de evacuação dos setores do estádio.....	95
Figura 7-12. Esquema gráfico dos setores B11 e B12 do estádio e respectivos túneis de saída.	95
Figura 7-13. Gráfico de tempo de evacuação do público geral da arquibancada superior.....	96
Figura 7-14. Simulação da evacuação do público no estádio Arena das Dunas no software VISSIM.	98
Figura 7-15. Prancha do projeto vencedor do concurso Parque Olímpico da empresa AECOM.	99
Figura 7-16. Esquema gráfico do estudo de dimensionamento de via na Av. Aberlardo Bueno.....	103
Figura 7-17. Áreas de acesso e saída do Parque Olímpico.....	104
Figura 7-18. Organização e dimensões sugeridas para a passarela de acesso à Estação Rio 2.....	106
Figura 7-19. Simulação de fluxo de pedestres no software VISSIM para Estação Rio 2.	107

Figura 7-20. Nível de serviço obtidos em horas determinadas com a largura das passagens indicadas.	108
Figura 7-21. Simulação da operação dos bloqueios no Terminal Parque Olímpico.	108
Figura 7-22. Dimensionamento de bloqueios para o Terminal Parque Olímpico.	109
Figura 7-23. Maquete eletrônica do projeto do Estádio Mineirão - BCMF Arquitetos.	109
Figura 7-24. Implantação do estádio com setorização e representação esquemática do fluxo de pedestres.....	112
Figura 7-25. Eixos de saída da arquibancada superior.....	113
Figura 7-26. Circulação vertical da arquibancada superior até o nível 0 da esplanada.....	114
Figura 7-27. Setores e rotas de saída da arquibancada inferior.....	114
Figura 7-28. Esquema da circulação vertical da rota de fuga da arquibancada inferior.....	115
Figura 7-29. Nível de serviço nos <i>gangways</i> de cada setor da arquibancada inferior.....	116
Figura 7-30. Figura 1 - Tempo de evacuação da arquibancada superior.....	117
Figura 7-31. Figura 1 - Gráfico de tempo de evacuação do Estádio.	118
Figura 7-32. Fotografia do túnel de interligação entre as estações Consolação e Paulista.	119
Figura 7-33. Simulação de estação metroviária e análise de congestionamentos no software Legion.	122

LISTA DE TABELAS

Tabela 4-1. Nível de serviço em área de espera.	40
Tabela 4-2. Nível de serviço em área de locomoção.....	40
Tabela 7-1 Ficha síntese dos projetos analisados no estudo de caso.....	79
Tabela 7-2. Tabela com resultados do estudo para dimensionamento de bloqueios e espaços de fila.	102
Tabela 7-3. Tabela síntese do estudo de dimensionamento de bloqueios da Estação Rio Centro.	103
Tabela 7-4. Quadro do volume crítico de pedestres no acessos nos dias do evento esportivo.....	105
Tabela 7-5. Tabela de Nível de serviço segundo o Highways Capacity Manual.	107

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AG	Algoritmos Genéticos
BIM	Building Information Modeling ou Modelo de Informação da Construção
CAD	Computer Aided Design ou Desenho Assistido por Computador
CAE	Computer Aided Engineering ou Engenharia Auxiliada por Computador
CAM	Computer Aided Manufacturing ou Manufatura Auxiliada por Computador
CET	Companhia de Engenharia de Tráfego de São Paulo
CNC	Computer Numeric Control ou Controle Numérico Computadorizado
CoMET	Community of Metros ou Comunidade de Metrô
CPTM	Companhia Paulista de Trens Metropolitanos
EMTU	Empresa Metropolitana de Transportes Urbanos de São Paulo
FIFA	Federação Internacional de Futebol Associado
IAB	Instituto de Arquitetos do Brasil
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IST	Instituto Superior Técnico de Lisboa
IT	Instrução Técnica do Corpo de Bombeiros
METRÔ	Companhia do Metropolitano de São Paulo
Mbps	Abreviação para Megabit por segundo ou 1.000.000 de bits por segundo
PPP	Parceria Público-Privada
SENASP	Secretaria Nacional de Segurança Pública
SPTrans	São Paulo Transporte
RMSP	Região Metropolitana de São Paulo
UITP	International Association of Public Transport

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	OBJETIVOS	5
1.2	ESTRUTURA DE DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA	6
1.3	SÍNTESE DOS CAPÍTULOS	8
2	ARQUITETURA EM UM ESPAÇO-TEMPO TECNOLÓGICO.....	10
2.1	A ARTE DO MOTOR	10
2.2	VELOCIDADE, PERCEPÇÃO E CORPO	15
2.3	ARQUITETURA PARA MULTIDÕES.....	17
3	ARQUITETURA NA ERA DIGITAL.....	23
3.1	ARQUITETURA E TECNOLOGIA	23
3.2	CONCEPÇÃO ARQUITETÔNICA NA ERA DIGITAL	25
3.3	ARQUITETURA EM ESPAÇOS DE FLUXO	27
4	ESTAÇÕES METROFERROVIÁRIAS E ARQUITETURA.....	33
4.1	ARQUITETURA DAS ESTAÇÕES METROFERROVIÁRIAS	33
4.2	TERMINAIS DE TRANSPORTE DE PASSAGEIROS E ESTAÇÕES METROFERROVIÁRIAS	35
4.3	CAPACIDADE DAS ESTAÇÕES, SEGURANÇA E NÍVEL DE SERVIÇO.....	37
4.4	DIRETRIZES DE DIMENSIONAMENTO DAS ESTAÇÕES METROFERROVIÁRIAS	42
4.5	SOBRE AS ESTAÇÕES METROFERROVIÁRIAS EM SÃO PAULO	46
5	MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE FLUXO DE PEDESTRES	49
5.1	CONCEITOS DE MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE FLUXO DE PEDESTRES	49
5.2	ESTUDO DE MODELAGEM DE FLUXO DE PEDESTRES POR PARTÍCULAS.....	52
5.3	SEGURANÇA E COMPORTAMENTO DE PEDESTRES	54
5.4	MODELAGEM DE PROJETOS DE TERMINAIS DE PASSAGEIROS	55
5.5	MODELAGEM DE TERMINAIS METROFERROVIÁRIOS.....	57
6	VISÃO COMPUTACIONAL	65
6.1	O VISÍVEL E O MOVIMENTO HUMANO	65

6.2	A VISÃO COMPUTACIONAL	69
6.3	VISÃO COMPUTACIONAL E ARQUITETURA DE FLUXOS	70
6.4	VISÃO COMPUTACIONAL E FLUXO DE PEDESTRES	73
7	ESTUDO DE CASO	78
7.1	OBJETO DE ESTUDO	78
7.2	ABORDAGEM METODOLÓGICA	80
7.3	SOFTWARE DE SIMULAÇÃO DE PEDESTRE UTILIZADOS	82
7.3.1	SOFTWARE VISSIM	82
7.3.2	SOFTWARE LEGION	86
7.4	ESTÁDIO DE FUTEBOL ARENA DAS DUNAS	89
7.4.1	APRESENTAÇÃO GERAL DO PROJETO	89
7.4.2	ESTUDO DE FLUXO DE PEDESTRES	91
7.4.3	FLUXO DE PEDESTRES E CONCEPÇÃO ARQUITETÔNICA	97
7.5	PARQUE OLÍMPICO DO RIO DE JANEIRO	98
7.5.1	APRESENTAÇÃO GERAL DO PROJETO	99
7.5.2	ESTUDO DE FLUXO DE PEDESTRES	100
7.5.3	FLUXO DE PEDESTRES E CONCEPÇÃO ARQUITETÔNICA	105
7.6	ESTÁDIO DE FUTEBOL MINEIRÃO	109
7.6.1	APRESENTAÇÃO GERAL DO PROJETO	110
7.6.2	ESTUDO DE FLUXO DE PEDESTRES	111
7.6.3	FLUXO DE PEDESTRES E CONCEPÇÃO ARQUITETÔNICA	118
7.7	INTERLIGAÇÃO METROVIÁRIA CONSOLAÇÃO-PAULISTA	118
7.7.1	APRESENTAÇÃO GERAL DO PROJETO	119
7.7.2	ESTUDO DE FLUXO DE PEDESTRES	120
7.7.3	FLUXO DE PEDESTRES E CONCEPÇÃO ARQUITETÔNICA	122
8	CONSIDERAÇÕES FINAIS	124
9	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	129

1 INTRODUÇÃO

A questão da mobilidade compreende-se como a primeira revelação da mais intensa revolução dos modos de vida que se observou em toda a história das cidades (REICHEN, 2007). O emprego da máquina a vapor no século XIX foi o primeiro motor que representou significativa expansão das dimensões urbanas e tornou possível grandes concentrações humanas (MUMFORD, 1998).

Das grandes concentrações populacionais surgem as primeiras metrópoles e os primeiros sistemas de transporte urbano sobre trilhos. A primeira linha férrea subterrânea do mundo é inaugurada em 1863 em Londres e, em 1900, Paris consolida o que denominaríamos de metrô com a construção de um sistema de linhas independentes organizadas como uma rede unificada e articulada (ISODA, 2013).

No mundo contemporâneo existe uma estreita relação entre a dimensão da metrópole e os sistemas de transporte urbano de alta capacidade¹. Estes se configuram como elemento determinante da mobilidade metropolitana (SORT, 2006). Em uma abordagem tecnológica, o urbanismo é definido como uma configuração de redes de transporte e transmigração composta por sistemas de transferência, de trânsito e de transmissão (VIRILIO, 1993).

Na Região Metropolitana de São Paulo², quinta maior aglomeração urbana do mundo (EMPLASA, 2011), o transporte de passageiros por sistemas de alta capacidade é realizado por meio dos metrô e dos trens metropolitanos. Estes, impulsionados por uma política recente, funcionam em convergência para uma única rede com qualidade de metrô (ISODA, 2013). Em um futuro próximo³ é prevista ainda a existência de mais um sistema de transportes de alta capacidade na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), formado pelos monotrilhos.

Atualmente encontra-se em operação na RMSP um total de 332,9 km de linhas metroferroviárias sendo 258,6 km de trens metropolitanos (Companhia Paulista de Trens

¹ A alta capacidade de transporte de passageiros é definida em valor de passageiros por hora por sentido (pphs) em uma faixa que varia entre 20 mil e 60 mil pphps (ISODA, 2013). Na literatura científica, existe certa divergência sobre estes valores, mas utilizaremos esta faixa de passageiros por considerá-la a mais apropriada à nossa realidade.

² Formada administrativamente por 39 municípios, com 19,7 milhões de habitantes, em uma área de 7.947km² e PIB de 610,18 bilhões de reais (Censo 2010, IBGE).

³ A previsão do Governo do Estado de São Paulo é que em 2014 se dê o início da operação da linha 15 - prata do monotrilho de São Paulo.

Metropolitanos - CPTM) e 74,3 km de metrô (Metrô + ViaQuatro⁴), 5 linhas de metrô e 6 linhas de trens metropolitanos (ISODA, 2013). Pelas estações do sistema metroferroviário da RMSP passam diariamente, em média, 7,2 milhões de usuários (LOBO, 2013).

No ano de 2008, São Paulo passou a ter o sistema metroviário mais denso do mundo⁵ operando com uma relação de 10 milhões de passageiros transportados ao ano por quilômetro de linha. Em 2010, com a crescente demanda pelo serviço, o sistema chega a uma relação de 11,5 milhões de passageiros por quilômetro de linha e em 2012 14,7 milhões⁶.

Na RMSP o crescimento da prestação de serviço de transporte de alta capacidade é observado tanto no sistema metroviário como no sistema ferroviário. Em 1996 os trens metropolitanos transportavam em média 835 mil passageiros por dia, passando, em 2012, a transportar 2,3 milhões de pessoas (ISODA, 2013). Já o sistema metroviário passou de 2,8 milhões de passageiros transportados em média por dia em 2006 para 4,6 milhões no ano de 2013. O recorde da operação do sistema ocorreu em 06 de setembro de 2012, quando o sistema metroviário teve 4,7 milhões de passageiros transportados e o sistema ferroviário 2,8 milhões de passageiros, totalizando 7,5 milhões de passageiros (ESTADO DE SÃO PAULO, 2012).

Este crescimento da demanda de passageiros tem como principais motivos o aumento da renda familiar em relação ao custo da passagem e consequente maior possibilidade de acesso a este serviço pela população de baixa renda; políticas de integração tarifária entre ônibus, trem e metrô⁷; aprimoramento de políticas de gratuidade e redução de tarifa para partes específicas da população e, finalmente, o aumento da rede e dos pontos de integração entre linhas, atraindo novos usuários para o sistema. Só na estação Palmeiras-Barra Funda do metrô, a demanda de passageiros saltou de menos de 90 mil em 1999 para mais de 200 mil passageiros em 2011.

⁴ ViaQuatro é a empresa responsável pela operação e manutenção da linha 4 - Amarela do metrô de São Paulo, que funciona por meio de uma parceria público-privada em uma concessão de 30 anos.

⁵ Em 2008 a Community of Metros (CoMET), organização internacional que reunia dados dos maiores sistemas de transporte sobre trilhos do mundo, colocou o sistema metroviário de São Paulo como o mais denso do mundo com 10 milhões de passageiros por km de linha (AGÊNCIA ESTADO, 2008).

⁶ Em 2010 o sistema metroviário passou a operar com 11,5 milhões de passageiros por quilômetro de linha (CRUZ, 2011) e em 2012, tendo transportado no ano, de acordo com o Metrô, 1,1 bilhão de passageiros em 74,3 km de linha, chegou-se a mais de 14,7 milhões de passageiros.

⁷ Iniciadas em 2006 pelo uso de um bilhete único que facilita e reduz os valores da passagem para os usuários da integração.

Nos próximos anos, ainda que o Metrô conclua a maior expansão de sua rede na história⁸, São Paulo seguirá tendo um dos mais densos sistemas de transporte do mundo, pois a demanda de usuários deverá saltar dos atuais 4,6 milhões de passageiros para 10 milhões até o ano de 2021 (PEREIRA, 2013).

Esta crescente demanda se reflete diretamente na qualidade do serviço prestado aos passageiros e nos problemas relacionados a conflitos de fluxos, operação, manutenção e segurança. No início da operação do metrô em São Paulo, na década de 1970, o padrão de densidade adotado era de 4 passageiros por m² para os trens em horários de pico. Em 2005, com o aumento da demanda, os padrões de densidade para planejamento da oferta de lugares nos horários de pico passaram para 6 passageiros por m² (METRÔ, 2005). Atualmente, com a crescente demanda, a densidade no sistema metroferroviário atinge constantemente valores de passageiros em pé por m² superiores a 9.

Figura 1-1. Representação de concentração de passageiros no metrô de São Paulo.

Fonte: REVISTA ÉPOCA, 06.02.2011. Disponível em: <http://revistaepocasp.globo.com/Revista/Epoca/SP/0,,EMI126381-15368-2,00-TRANSPORTE+COLETIVO.html>

Os sistemas de transporte de passageiros de alta capacidade estão no centro das discussões e estudos a respeito da mobilidade nas metrópoles. O tamanho das redes de metrô e trens e a eficiência desses serviços públicos são um dos principais determinantes da dinâmica urbana. Os terminais metroferroviários são os pontos de acesso aos sistemas de transporte de alta capacidade para milhões de passageiros que se deslocam diariamente em todo o mundo.

⁸ Do início da operação do Metrô em 1972 até 2013 foram concluídos 74,3 km de linhas metroviárias. De 2014 até 2021 está prevista a realização de uma rede cerca de 1,7 vezes maior do que foi construída em toda a história do Metrô.

A concepção e operação desses terminais está diretamente relacionada à dinâmica do fluxo de seus usuários. No deslocar dos pedestres entre a entrada da estação e o ingresso nos trens configura-se a arquitetura das estações, relacionada diretamente às distintas demandas de uso ao longo dos dias. Nos horários de pico das grandes cidades, uma estação metroferroviária pode, em questão de minutos, ver a demanda por espaço e serviços ser multiplicada exponencialmente.

A complexidade arquitetônica relacionada ao grande fluxo de pessoas e a crescente demanda pelos serviços de transporte representa grandes desafios para os projetistas e operadores dos terminais metroferroviários. Muitos desses terminais apresentam falhas que comprometem seu funcionamento, seja pelas restrições operacionais, seja por apresentarem espaços mal projetados ou subdimensionados. Tais falhas estão muitas vezes relacionadas à falta de um estudo mais adequado e rigoroso quanto ao aspecto mais relevante na concepção dessas edificações: a qualidade de serviço aos usuários do sistema (ROVIRIEGO *et al.*, 2004).

No Brasil, e em muitos outros países do mundo, a concepção dos terminais metroferroviários é baseada na experiência e observação do seu funcionamento (DAAMEN, 2004). Este método empírico resulta na formulação de documentos técnicos com diretrizes para a concepção e dimensionamento dos espaços e componentes dos terminais. Ainda que envolva grande fluxo de trens e de passageiros, a proposta da maioria das estações e terminais existentes é feita com base em conceitos e não em modelos.

No início da década de 70 existiam pouquíssimos estudos a respeito do comportamento e tráfego de pedestres. Nos últimos anos, da necessidade de melhor compreensão e análise dos espaços com grande fluxo de pessoas, intensificaram-se os estudos para modelagem e simulação de pedestres. Primeiramente, observando e derivando teorias e modelos simples, e, mais recentemente, com técnicas de análise e observação mais avançadas e o uso de computadores mais rápidos e poderosos, surgiram modelos maiores e mais complexos, aumentando significativamente sua utilização, precisão e aplicação.

Estes modelos, calibrados com base em observações da realidade, buscam simular o comportamento das multidões nos edifícios. Nos últimos anos, utilizando conceitos de visão computacional, métodos de calibração automatizados vêm sendo aprimorados e difundidos, tornando possível o aprimoramento dos modelos de simulações de pedestres.

A complexidade operacional e o crescente fluxo de pedestres e trens solicitam dos projetistas soluções construtivas diferenciadas para as demandas de uma sociedade preocupada com o desempenho dos edifícios, a economia de meios, de recursos materiais e de recursos financeiros para a produção, uso e manutenção dos edifícios. Os estudos sobre os métodos e parâmetros de concepção e análise das estações metroferroviárias tendo como referência o fluxo dos pedestres é essencial para o melhor desenvolvimento desta arquitetura. Além de influenciar diretamente a dinâmica operacional e o nível de serviço aos passageiros, a modelagem e simulação dos espaços das estações pode representar uma significativa redução de custos na implantação deste modal, com espaços melhor dimensionados e mais seguros.

Com poucas pesquisas sobre a concepção de estações metroferroviárias, a crescente demanda pela mobilidade e um cenário marcado por práticas projetuais baseadas em métodos empíricos, o tema da modelagem e da simulação de pedestres se apresenta como urgente devido à situação de nossas metrópoles.

1.1 OBJETIVOS

A pesquisa tem como objeto central a arquitetura de espaços com grande fluxo de pessoas, a percepção do corpo em movimento sob o foco de um evento observável onde a alta densidade de usuários no uso dos espaços é determinante da concepção arquitetônica. As configurações espaciais de estações metroferroviárias, estádios e locais de grande eventos, bem como as teorias e práticas envolvidas na sua concepção integram o objeto deste estudo. No desenvolvimento da pesquisa a abordagem da arquitetura relacionada aos parâmetros de fluxo de pedestres se estendeu para uma diversidade de edifícios. Estes contribuem, de certa maneira, com o amadurecimento e aprofundamento das questões relacionadas à modelagem e simulação de pedestres e à busca de melhores soluções projetuais para a arquitetura de espaços que envolvem multidões.

Objetivo Geral

Contribuir para o aprimoramento dos projetos relacionados a espaços com grande fluxo de pessoas quanto à sua arquitetura, à mitigação de riscos, melhoria do fluxo de pedestres, melhora dos níveis de serviço, espaço para usuários e rotas de fuga. Aprofundar o

debate e os estudos relacionados às práticas de modelagem e simulação de pedestres na concepção e operação das estações metroferroviárias, estádios, espaços para grandes eventos e demais espaços relacionadas a um grande fluxo de pessoas.

Objetivos Específicos

- Apresentar e conceituar questões técnicas relacionadas à modelagem e simulação de pedestres na concepção arquitetônica de espaços de grande fluxo de pessoas;
- Analisar a arquitetura das estações metroferroviárias com destaque para seus espaços internos, os componentes de processamento, número de usuários e fluxo de pedestres;
- Relacionar as possibilidades de contribuição da visão computacional na calibração de fluxo de pedestres;
- Apresentar e analisar a utilização de métodos de simulação de pedestres desenvolvidos recentemente no Brasil na concepção de espaços para multidões.

1.2 ESTRUTURA DE DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA

Esta pesquisa possui um caráter exploratório que busca, por meio de uma abordagem abrangente e complexa, discutir os elementos que envolvem a arquitetura de espaços com grande fluxo⁹ de pessoas. Tendo como objeto central as estações metroferroviárias, a pesquisa propõe contribuir para uma compreensão global da arquitetura no contexto de uma sociedade da velocidade, de uma arquitetura da era digital, e das possibilidades e potencialidades relacionadas a um espaço para multidões concebido com base na modelagem, na simulação e na visão computacional.

O desenvolvimento da pesquisa inicia com a observação e descrição do fenômeno da multidão nas estações metroferroviárias nas cidades contemporâneas. A arquitetura da era digital é contextualizada em uma abordagem que envolve conceitos e metodologias relacionadas à modelagem e simulação de fluxo de pedestres. Pesquisas que abordam

⁹ Para *fluxos* utilizaremos a definição de Brandão (2009) de que toda circulação de pessoas, objetos ou informações que ocorre de modo sistemático passa a configurar-se como fluxo.

especificamente o tema da concepção de estações metroferroviárias são apresentadas e discutidas. Integra também a pesquisa, conceitos e estudos sobre visão computacional, elemento de destaque para a calibração e validação dos modelos de fluxo de pedestres. Por fim, são apresentados estudos de casos onde foram utilizados métodos de simulação de pedestres em edifícios e cenários distintos.

Os estudos sobre dimensionamento e projeto de estações metroferroviárias no Brasil ainda são bastante restritos e pouco numerosos. Por este motivo ampliou-se a pesquisa para além do objeto específico, buscando elementos de outras áreas de conhecimento para enriquecer a abordagem do fenômeno. O levantamento sobre a concepção das estações de transporte sobre trilhos serviu de base e reflexão para os caminhos tomados. Parte dos projetistas responsáveis pelos projetos das estações metroferroviárias de São Paulo foram entrevistados e consultados.

Foi realizada a análise de dois estudos específicos sobre modelagem, simulação e dimensionamento de terminais metroferroviários: um estudo do Brasil, realizada por Cauê Guazzelli (2011) e um da Holanda, de Winnie Daamen (2004). A abordagem prática e acadêmica sobre o mesmo objeto possibilitou uma visão ampla e multidisciplinar sobre a questão colocada.

No desenvolvimento da pesquisa foi realizado um estudo exploratório com o objetivo de simular o comportamento de pedestres utilizando o conceito de partículas. Este estudo serviu de base para uma reflexão mais profunda sobre o tema e a compreensão das dificuldades envolvendo a simulação do comportamento humano no espaço. Neste momento houve a compreensão da necessidade de um redirecionamento da pesquisa no sentido de que não seria possível desenvolver uma plataforma de simulação de fluxos de pedestre em tempo hábil e de forma isolada. A pesquisa buscou então o levantamento de casos de utilização de software específicos de simulação de fluxo de pedestres no Brasil com a revelação de casos bastante significativos.

Este redirecionamento da pesquisa provocado pelo aprofundamento do tema e pelo exercício exploratório provocou a seguinte reestruturação:

- a busca por pesquisas que explorassem a modelagem para o estudo, dimensionamento e concepção de estações metroferroviárias (capítulo 5);

- o estudo sobre a utilização da visão computacional no mapeamento do fluxo de pedestres (capítulo 6);
- o levantamento e análise de casos reais de utilização de simulação de pedestres para concepção arquitetônica de espaços com multidões (capítulo 7).

Em síntese, a pesquisa foi estruturada não com o intuito de obter um caráter normativo e conclusivo sobre as soluções arquitetônicas, e sim estudar os edifícios e os eventos arquitetônicos a eles relacionados, vislumbrando novas reflexões, soluções e condições espaciais.

1.3 SÍNTESE DOS CAPÍTULOS

No primeiro capítulo é realizada uma introdução ao tema da pesquisa e a justificativa para seu desenvolvimento. Além disso, é situado o objeto da pesquisa, seus objetivos, a estrutura de seu desenvolvimento e a síntese dos capítulos.

No segundo capítulo a pesquisa contextualiza de forma segmentária a sociedade contemporânea onde a relação entre espaço e tempo é ditada pela capacidade técnica humana, e o urbanismo é composto por sistemas de transferência, de trânsito e de transmissão, em uma sociedade líquida na qual o encontro de multidões é cada vez frequente e efêmero.

No terceiro capítulo é feita uma abordagem da arquitetura contemporânea sob a perspectiva das mudanças provocadas pela máquina digital no processo de concepção e produção arquitetônica. Este breve capítulo não tem a pretensão de exaurir o tema e sim relacionar conceitos e percepções de alguns arquitetos sobre a arquitetura digital na sociedade da velocidade.

No quarto capítulo são apresentados os conceitos e a configuração do objeto inicial desta pesquisa, a arquitetura dos terminais metroferroviários. O objetivo aqui não é detalhar e descrever todos os elementos e diretrizes relacionados à concepção e funcionamento de um terminal metroferroviário, e sim abordá-lo com foco na compreensão do usuário do edifício, dos espaços, do tempo e do funcionamento destes terminais.

No quinto capítulo a compreensão da necessidade de uma abordagem mais complexa para dar resposta à arquitetura de espaços para multidões culmina em conceitos de modelagem e simulação de pedestres. O foco são as estações metroferroviárias, a tentativa de modelagem paramétrica e a análise de dois trabalhos de referência sobre o tema.

No sexto capítulo é realizada uma breve abordagem sobre a importância da evolução da máquina na compreensão do movimento do corpo humano e como sua utilização auxilia os projetistas e gestores de espaços que envolvem fluxo de multidões. Aqui uma pesquisa recente explicita a potencialidade da utilização da visão computacional para se pensar espaços arquitetônicos.

No sétimo capítulo são apresentados quatro estudos de caso recentes relacionados à simulação de fluxo de pedestres. Dois têm como objeto estádios de futebol construídos para a Copa do Mundo no Brasil, um sobre alguns elementos do Parque Olímpico do Rio de Janeiro e um sobre estações do sistema metroviário de São Paulo. Nestes estudos busca-se comparar e destacar as potencialidades e fragilidades dos métodos e software utilizados.

No capítulo oitavo estão a conclusão da pesquisa, os aspectos abordados e as potencialidades do estudo desenvolvido.

2 ARQUITETURA EM UM ESPAÇO-TEMPO TECNOLÓGICO¹¹

A mudança da relação entre o espaço e o tempo, a importância da mobilidade na vida das metrópoles, a velocidade da informação e da percepção humana e os conceitos de multidão são aqui relacionados. Este capítulo busca contextualizar a sociedade contemporânea sob uma abordagem tecnológica ampliando relevantes aspectos relacionados ao objetivo desta pesquisa.

2.1 A ARTE DO MOTOR

"A velocidade não é um fenômeno, é a relação entre os fenômenos."
(VIRILIO, 1996a, p.122).

No começo do século XIX, o motor se apresenta como um novo imperativo na configuração das grandes cidades. Uma das principais propostas urbanísticas da modernidade, a *Cidade Linear*, do engenheiro de transportes Arturo Soria y Mata, tinha como premissa de configuração uma malha regular estruturada em função de um sistema dorsal de transportes rápidos: "O movimento motorizado controlava tudo" (MUMFORD, 1998).

Como coloca Harvey (1999), se até o fim do século XVIII o corpo humano interagia com o mundo na velocidade média de 20 km/h, no deslocamento dos navios à vela e das diligências, em meados do século XIX as locomotivas a vapor chegavam a 100 km/h e em meados do século XX, com os aviões a jato, alcançávamos 800 km/h.

No contemporâneo, a velocidade e a eficiência tornam-se imperativos de uma sociedade movida pelo motor: trens, aviões, automóveis, elevadores são suporte para o deslocamento físico; redes de transmissão, internet, satélites, rádios, telefones, meios para o deslocamento virtual, a transmissão, a telecomunicação e a telepresença (VIRILIO, 1993).

Na busca incessante pela velocidade, a urgência do tempo de trabalho é elemento central e prioritário, e a relação homem x máquina é marcada pela superação da ociosidade na espera pela prestação de serviços ante os aparelhos: as filas dos pedágios, o processamento de

¹¹ A expressão "espaço-tempo tecnológico" é utilizada pelo urbanista Paul Virilio para designar a sociedade moderna em tempos de aceleração (VIRILIO, 1996a).

informações dos computadores, a espera da chegada do trem, dos caixas eletrônicos etc. Lugares como estações, terminais e aeroportos se tornam vetores de ruptura da relação entre espaço e tempo na arquitetura. Estes "[...] compõem menos um espaço do que uma espécie de contagem regressiva em que a urgência do tempo de trabalho aparece como centro do tempo" (VIRILIO, 1993, p.11).

Em muitos casos, os edifícios que dão suporte à aceleração configuram-se em uma arquitetura de espaços repetitivos, com referências globais, uma arquitetura do *não lugar*, onde a homogeneidade parece trazer conforto e segurança àqueles que se deslocam incessantemente. São em geral espaços destituídos de expressões simbólicas de identidade e história. Como coloca o filósofo Marc Augé estes não lugares "[...] são tanto as instalações necessárias à circulação acelerada das pessoas e bens (vias expressas, trevos rodoviários, aeroportos) quanto os próprios meios de transporte [...]" (AUGÉ, 1994, p.36). Em *Modernidade Líquida*, Bauman enfatiza ainda que "jamais na história do mundo os não lugares ocuparam tanto espaço" (BAUMAN, 2001, p.120).

Na obra *Middelburg Airport Lounge*¹² a artista Ana Maria Tavares constrói dentro de um museu um *lounge* de um aeroporto genérico composto por corredores, esteiras e bloqueios. Na obra utiliza grandes espelhos para criar espaços com sensação de infinito e coloca diversos objetos como assentos, corrimãos, alças e fones de ouvido com som de aeroporto, espalhados no espaço minando o sentido de tempo e lugar da mesma maneira que ocorre nestes *não lugares* (DE VLEESHAL, 2001). São espaços repetitivos e homogêneos que vemos no mundo todo quase da mesma forma. Um aeroporto em Londres poderia muito bem estar em Chicago e vice-versa. Uma arquitetura que tenta, de certa forma, amenizar as diversas sensações relacionadas ao deslocamento incessante e à aceleração do tempo, como as expectativas frustradas, a ilusão, a ansiedade etc.

A fluidez de uma sociedade líquida (BAUMAN, 2001) e acelerada (VIRILIO, 1993) ainda encontra resistência no sólido do presente, resquícios de um passado recente. Tal relação entre transmissão e deslocamento, mundo físico e digital, cria nas cidades aspectos de uma nebulosa conurbação de redes, espaços e informação. São as novas realizações tecnológicas, centradas na comunicação e deslocamento, que se formam os principais

¹² Obra de 2001 exposta no centro de arte de Middelburg, na Holanda.

paradigmas urbanos e tornam a mobilidade questão-chave para a compreensão da vida no século XXI.

No aumento e aceleração da mobilidade humana, a metáfora da fluidez de Bauman (2001) parece fazer cada vez mais sentido e reflete a complexidade da arquitetura destes lugares. A arquitetura das construções, do concreto, do sólido e das dimensões espaciais claras resiste aos fluidos do acelerado deslocar das máquinas e do corpo, onde o que conta é o tempo, mais do que o espaço que lhe toca ocupar, espaço que, afinal, preenchem apenas por um momento.

Para se intervir nos espaços e meios que dão suporte para estes paradigmas, devemos situar a tecnologia relacionada ao movimento e à relativização do espaço/tempo. Em *A arte do motor*, Paul Virilio (1996a) escreve sobre o fato da ruptura da relação entre distância e tempo criar uma confusão mental entre o próximo e o distante, o presente e o futuro, o real e o irreal. Esta aceleração que avança e avançará ainda por muito tempo é, segundo o autor, mascarada pela ilusão da ideologia de um progresso purificado de todo julgamento e crítica.

Quando a distância percorrida numa unidade de tempo passou a depender da tecnologia, de meios artificiais de transporte, todos os limites à velocidade do movimento, existentes ou herdados, poderiam, em princípio, ser transgredidos. Apenas o céu (ou, como acabou sendo depois, a velocidade da luz) era agora o limite, e a modernidade era um esforço contínuo, rápido e irrefreável para alcançá-lo (BAUMAN, 2011, p.15).

Já no fim do século XVIII fatos como a invenção do telégrafo, que reduzia a distância e poderia de certa forma reunir toda a população da França em um único ponto, já preconizava um tempo ditado pelas técnicas humanas. Outra criação humana que relativizará a relação espaço/tempo foram os rádios. Em 1925, utilizando uma antena "desmilitarizada" no topo da Torre Eiffel, uma rádio transmite o primeiro jornal falado da história.

Se nos séculos pré-modernos o tempo e o espaço eram aspectos entrelaçados e indistinguíveis da experiência vivida, na modernidade o tempo tem história. A velocidade do deslocar-se no espaço se torna uma questão do engenho, da imaginação e das capacidades humanas, rompendo a aparentemente invulnerável correspondência biunívoca entre espaço e

tempo. "A modernidade começa quando o espaço e o tempo são separados da prática da vida" (BAUMAN, 2001, p.5).

Nos tempos modernos o acesso aos meios mais rápidos de mobilidade e a velocidade do movimento tornam-se a principal ferramenta do poder e da dominação (BAUMAN, 2001). Deslocar-se mais rapidamente significava reivindicar maiores territórios, controlar e mapear áreas maiores, ter acesso a lugares e materiais inexplorados, supervisionar o espaço do outro e manter os intrusos distante.

Máquinas velozes e novas tecnologias de transporte e transmissão relativizam a relação espaço/tempo. Eventos simultâneos, comunicação instantânea e a conexão com diversos pontos do planeta suprimem distâncias e também o tempo. Quando as distâncias podem ser percorridas à velocidade dos sinais eletrônicos, as referências ao tempo tornam-se quase sem sentido. A instantaneidade de um movimento eletrônico denota uma ausência do tempo como fator do evento não mais conferindo valor ao espaço percorrido. "A quase instantaneidade do tempo do software anuncia a desvalorização do espaço" (BAUMAN, 2001, p.137).

Enquanto o deslocamento do sinal eletrônico representa uma quase supressão do tempo, o deslocamento no espaço físico ainda está longe de atingir a genuína instantaneidade e a conseqüente lógica de irrelevância do espaço e volatilidade do deslocamento do corpo humano não atingiu a leveza e flexibilidade esperada (BAUMAN, 2001).

Essa relativização do tempo por meio desses aparatos técnicos ou sistemas de transferência, de trânsito e de transmissão (VIRILIO, 1993) estará também, desde o início, relacionada a uma crucial diferença de classes. Como coloca Virilio (1996a), já no início do século XX a utilização das ferrovias estabeleciam, além das classes sociais, *classes de velocidade*. As diferenças de trens de primeira, segunda e terceira classe na Europa nesta época não estavam relacionadas apenas ao luxo de seus vagões e seus espaços internos, mas, principalmente, ao tempo que levaria para percorrer as grandes distâncias: "Por volta de 1900, o trem Paris-Marselha de terceira classe alcançara a cidade mediterrânea em vinte e oito horas ou mais, enquanto o expresso de primeira fará o mesmo percurso em dezesseis horas" (VIRILIO, 1996a, p.75).

Atualmente a profusão dos sistemas de aceleração e transmissão explicita as diferentes classes de velocidade. Se nos países centrais e nas grandes metrópoles o mundo virtual é acessível ao usuário por meio de cabos de fibra ótica a velocidades superiores a 100 Mbps, nas áreas periféricas, este mesmo mundo, é acessado por fios de cobre do sistema de telefonia e velocidades não superior a 56 Kbps.

No deslocamento humano no espaço real, enquanto uma classe de velocidade se utiliza de sistemas integrados inteligentes difundidos em viagens para além da atmosfera terrestre, trens dotados de levitação magnética (Shanghai Maglev), aeronaves comerciais supersônicas (extinto Concorde) e vias construídas para automóveis dotadas de sistemas elétrico-digitaís cada vez mais sofisticadas e velozes, outra classe de velocidade se desloca lentamente em meios sem integração, em carrocerias de caminhões adaptados (ônibus urbanos), trens a diesel ou elétricos de baixa velocidade, ou mesmo na estreita gama de ferramentas naturais da mobilidade - as pernas humanas ou equinas - que confinavam e ainda confinam os movimentos dos corpos pré-modernos (BAUMAN, 2001).

Em uma aparente contradição com esta mudança de tempos de uma modernidade líquida, as estruturas que dão suporte à mobilidade humana estabelecem relações cada vez mais complexas e intrínsecas entre o espaço e o tempo. Aeroportos, estações metroferroviárias, terminais marítimos e rodoviárias possuem espaços que se dilatam ou se comprimem de acordo com o tempo, o tempo do deslocamento humano e do ir e vir das máquinas, motor dos sistemas de transferência.

Em contraponto a esta aceleração da sociedade e da acentuação dos fenômenos de fragmentação, deve-se enfatizar a necessidade de uma reorganização das relações de deslocamento de maneira que "[...] cada subespaço possa fazer parte de um conjunto coerente e dispor de uma boa articulação com todos os demais" (ROCHEFORT, 1998, p.165). O desafio de intervir no contemporâneo parece ser, além da visão sobre as classes de velocidade, compreender que o tempo lento das longas durações históricas e da sucessão de eventos foi substituído pelo tempo de uma duração técnica, sem comparação com qualquer calendário de atividades ou memória coletiva anterior (VIRILIO, 1993).

2.2 VELOCIDADE, PERCEPÇÃO E CORPO

"Considerando o corpo em movimento, vê-se melhor como ele habita o espaço (e também o tempo), porque o movimento não se contenta em submeter-se ao espaço e ao tempo, ele os assume ativamente, retoma-os em sua significação original, que se esvai na banalidade das situações adquiridas."
(MERLEAU-PONTY, 2004, p. 149).

A aceleração, o transporte e a comunicação instantânea fazem parte de um poderoso processo na sociedade contemporânea que Gilles Deleuze chama de desterritorialização (SOLA-MORALES, 2003). Este processo, segundo Sola Morales (2003), coloca os objetos arquitetônicos em não lugares e não paisagens. Alteram a relação do corpo/usuário com a arquitetura, que ocorre quase sempre de forma mediatizada, com imagens fotográficas, de forma desconexa e com visões quase impossíveis de o usuário vislumbrar.

O progresso dos meios de transporte e transmissão representam, além da desterritorialização, uma gradativa perda motora e sensorial humana (VIRILIO, 1996a). Na supressão do esforço físico do caminhar, e no deslocar-se utilizando máquinas de transporte cada vez mais rápidas, ocorre uma abstração do deslocamento e uma alteração sensorial do espaço. Dos primeiros vagões de trem a céu aberto, da rudeza dos bancos de madeira, do vento, da temperatura externa, das nuvens de fumaça, do barulho da máquina a vapor, para os trens de alta velocidade e as aeronaves supersônicas, altamente velozes e isoladas do mundo exterior, existe uma diferença brutal.

Na velocidade a arquitetura perde parte de sua relação corpórea, de deslocamento no espaço, de sensibilidade motora e tátil, e isso tudo em detrimento da imagem, da aceleração, de uma "percepção" cada vez mais rápida e necessária à vida nas metrópoles contemporâneas. Isso tudo parece entrar em conflito com a observação de Merleau-Ponty (1994) que, em sua obra *Fenomenologia da Percepção*, enfatiza o fato de nossa experiência com o mundo ser realizada com a totalidade de nosso corpo, de forma espaço-temporal, sexual, móvel e expressiva.

O aumento da velocidade está, de certa maneira, relacionado à perda da percepção. O achatamento do tempo dificulta a compreensão humana do espaço, da arquitetura ou de qualquer objeto. Como coloca Merleau-Ponty (1994), o objeto é visto a partir de todos os

tempos, de um tempo presente que se funde a um passado imediato e ao momento seguinte e, desta maneira, permite o reconhecimento do objeto e de seu deslocamento. A velocidade e a redução do tempo (ou mesmo sua supressão) representam, portanto, não apenas a mudança de nossa relação com o espaço, como também a redução da percepção humana sobre ele. A velocidade e a multidão fez o ser humano progressivamente deixar de perceber o espaço por não ter tempo ou por ter alguma coisa ou alguém para fazer por ele. A percepção do meio, do espaço e da cidade é feita de forma cada vez mais rápida e hoje talvez não haja mais lugar para o *flâneur* de Baudelaire (BENJAMIN, 1989).

A aceleração torna ainda mais difícil e complexa a integração e percepção da totalidade. A experiência do próprio corpo e daquilo que lhe é exterior é feita por uma composição de elementos heterogêneos, diversos e dispersos, e a percepção errática e nômade da realidade é, como coloca Sola-Morales (2003), um traço característico da crise que a arquitetura manifesta em muitos aspectos. A fragmentação, o inacabado, o parcial, o acumulativo, são potencializados pela velocidade e pela redução da percepção, tornando os modelos e estruturas existentes formas incapazes de promover níveis superiores de integração (SOLA-MORALES, 2003).

No gesto de deslocamento do corpo no espaço, como coloca Merleau-Ponty (1994), existe uma referência a este espaço e/ou objeto-destino, não enquanto objeto representado, mas enquanto objeto bem determinado em direção a qual nos projetamos. Para que possamos mover nosso corpo em direção a um objeto é preciso que o objeto exista para este corpo. Porém, na aceleração nem toda mudança torna-se identificável e o corpo deixa de ter consciência de seu movimento ou daquilo que o precedeu.

Nesta era da velocidade a arquitetura e o corpo parecem em conflito, assim como o espaço e o tempo. Com a supressão do tempo fica a indagação sobre o futuro deste corpo, que, como coloca Merleau-Ponty (1994), não está no espaço nem tampouco está no tempo, mas habita o espaço e o tempo. Talvez a resposta à indagação esteja não na supressão total do tempo, mas antes de tentar "[...] aparelhar o corpo humano para torná-lo contemporâneo da era da velocidade absoluta das ondas eletromagnéticas" (VIRILIO, 1996a, p.94).

Se de certa maneira Paul Virilio aposta em uma superaceleração do ser humano, para que possamos acompanhar esta *era da velocidade*, o geógrafo brasileiro Milton Santos coloca

que as questões apresentadas por Virilio relativas ao tema são como um distúrbio deste pelos novos equipamentos de tecnologia e aceleração (SANTOS, 2003).

Refletindo sobre o corpo nestes tempos de aceleração, nos voltamos aos questionamentos de Sola-Morales para pensarmos os sistemas de transferência, de trânsito e de transmissão: "(...) seria possível pensar uma arquitetura do tempo, mais do que do espaço? Uma arquitetura cujo objetivo não seja apenas ordenar o espaço, mas organizar o movimento e a duração?" (SOLA-MORALES, 2003, p.126)

O questionamento de Sola-Morales busca opor o conceito estático e sagrado do lugar para propor a noção do lugar como fluxo, como dinamismo, conjunto de acontecimentos, encontro de energias. Em sua obra *Diferencias - topografia de la arquitectura contemporânea*, Sola-Morales expõe a configuração de dispersão da cidade contemporânea em sintonia com as interpretações pós-estruturalistas de Gilles Deleuze e Rem Koolhaas¹³.

O pensamento de Milton Santos (2003) quanto à questão da velocidade e dos fluxos possui uma abordagem distinta da de Sola-Morales e Paul Virilio. Santos (1998, 2003) fala em espaços de fluxos e espaços de fixo para compreender este novo espaço gerado pelos avanços da tecnologia. Destaca que, ao mesmo tempo em que as novas estruturas de comunicação e deslocamento relativizam o espaço, o lugar e a territorialidade ganham importância. Compreender a complexidade da questão do espaço neste tempo contemporâneo talvez seja relacionar o "homem lento"¹⁴ do pensamento de Milton Santos com a leitura da velocidade e dos fluxos da obra de Sola-Morales e Paul Virilio.

2.3 ARQUITETURA PARA MULTIDÕES

"O século XXI nasce com o grande desafio de compreender o fenômeno da multidão." (MARTINS, 2009, p.13)

No início do século XIX o transporte sobre trilhos tornou possível as grandes concentrações humanas. Se em 1800 nenhuma cidade no mundo ocidental possuía um milhão

¹³ Arquiteto contemporâneo, autor de obras conceituais importantes como *Delirious New York*, na qual reflete sobre a influência das massas e da relação da cultura metropolitana com a arquitetura e o urbanismo.

¹⁴ Termo utilizada por Milton Santos em suas discussões sobre técnica, espaço e tempo para a um personagem que vivencia e faz parte das mudanças que ocorrem em seu meio. É a figura humana de comum, do lugar, do cotidiano, que resiste às forças verticais, à globalização. De certa forma uma contraposição ao homem das imagens, da velocidade, da homogeneidade.

de habitantes, em 1850 Londres atingira dois milhões de habitantes e Paris mais de um milhão (MUMFORD, 1998)¹⁵. Não por acaso essas cidades foram pioneiras no desenvolvimento do transporte sobre trilhos. Com sistemas de transporte de alta capacidade, as cidades se transformaram em palco para as grandes multidões.

Desde o surgimento da sociedade industrial, o pensamento ocidental enfrenta o desafio de compreender o fenômeno da multidão. Historicamente, conforme aponta Martins (2009), existem dificuldades semânticas e mesmo conceituais quanto à definição de multidão e de massas, ainda que estes representem fenômenos sociais de grande relevância.

Sem a pretensão de definir o termo de forma conclusiva, utilizaremos *multidão* como fenômeno que se configura na reunião de grande número de pessoas dotadas ao mesmo tempo de individualidade e autonomia. Sendo mais preciso, na definição de Antonio Negri e Michael Hardt (2010), a multidão configura-se como um conjunto de singularidades ou uma pluralidade. Diferencia-se do povo, que se configura em uma identidade única tendo o Estado como centro e da massa, relacionada a uma indiferenciação e passividade inerente (GIROTO, 2011).

Outra abordagem relevante sobre o termo multidão é a do físico francês Gustave Le Bon. Em sua obra *A psicologia das multidões*, Le Bon conceitua multidão como uma aglomeração de indivíduos que apresentam características distintas daquelas que apresentariam caso estivessem isolados ou sozinhos. Le Bon acreditava que na multidão existe a formação de uma mente coletiva com um senso comum e o desaparecimento das personalidades conscientes (BON, 1905¹⁶ *apud* BICHO, 2009).

O pensamento de Le Bon, de certa maneira negativo e mais próximo ao da definição de massa, se contrapõe ao conceito libertário do termo apresentado por Negri e Hardt, que enfatiza a importância da singularidade de cada indivíduo dentro do conjunto coletivo. Partindo da visão de Negri e Hardt e tomando a liberdade de fazer uma analogia ao pensamento dos filósofos Gilles Deleuze e Félix Guattari (1997) sobre a importância dos

¹⁵ Em 1900 existiam no mundo 11 cidades com mais de um milhão de habitantes e em 1930 este número salta para 27 (MUMFORD, 1999).

¹⁶ BON, Gustave Le. *La psychologie des foules* (1985). 9. ed. Paris, França: Édition Félix Alcan, 1905. 192 p.

novos materiais na arquitetura¹⁷, a riqueza da multidão talvez estaria em fazer com que os heterogêneos mantenham-se juntos sem deixar de ser heterogêneos.

A percepção da multidão como um todo dotado de singularidades é questão essencial para se pensar a arquitetura de espaços que envolvem o fluxo e a concentração de um grande número de pessoas. Isso tudo porque deve ser observado tanto pela complexidade que envolve o comportamento humano individual como nas relações sociais e nas interações que ocorrem com os demais indivíduos. Afinal, a percepção individual está diretamente relacionada à percepção do outro ou, como coloca Merleau-Ponty, "só sentimos que existimos depois de já ter entrado em contato com os outros, e nossa reflexão é sempre um retorno a nós mesmos que, aliás, deve muito à nossa frequência do outro" (MERLEAU-PONTY, 2004, p.35).

Tanto em situações menos comuns de acidentes ou emergências, quanto em situações corriqueiras cotidianas, ocorrem uma série de fenômenos e padrões comportamentais de multidões que foram observados e identificados por diversos pesquisadores. Destacamos alguns desses comportamentos relacionados nas pesquisas de Lílían Carneiro (2012) e de Alessandro de Lima Bicho (2009). A apresentação dos fenômenos listados a seguir é feita com o propósito de obtermos uma compreensão mais ampla sobre o comportamento de multidões. Salientamos que os fenômenos listados não são normatizados ou possuem nomeação ou definição estrita na literatura científica, e foram feitos com base em um levantamento amplo de outras pesquisas feitas pelos referidos pesquisadores. Estes comportamentos são identificados, na maioria das vezes, em pesquisas que objetivam a modelagem e a simulação do comportamento de pedestres e, por este motivo, alguns casos podem parecer mais ou menos óbvios:

- *Deslocar-se ao destino*, caracterizado pelo simples fato de no mundo real os pedestres se deslocarem no ambiente com o propósito de alcançar seus destinos;
- *Deslocar-se evitando colisões*, caracterizado pelo fato de os pedestres se deslocarem evitando o contato e a colisão com outras pessoas ou objetos;

¹⁷ Em trechos da obra *Mil Platôs - capitalismo e esquizofrenia*, os filósofos escrevem sobre as possibilidades que o concreto trouxe ao conjunto arquitetônico como um material heterogêneo cujo grau de consistência varia conforme os elementos de sua mistura, e sua forma é dada segundo o ritmo intercalado de ferros. Para os autores, "o que torna o material cada vez mais rico é aquilo que faz com que heterogêneos mantenham-se juntos sem deixar de ser heterogêneos" (DELEUZE E GUATTARRI, 1997 p. 123).

- *Estratégia do mínimo esforço*, fato de os pedestres escolherem as trajetórias mais curtas, que demandem menos esforço e minimizem a variação de orientação em relação ao destino pretendido;
- *Fenômeno de ir com a multidão ou comportamento de pastoreio*, caracterizado pelo fato de um indivíduo seguir as ações da maioria à sua volta ao invés de seguir seu próprio raciocínio ou intuição;
- *Fenômeno de reunião*, em que os indivíduos tendem a permanecerem próximos uns aos outros para se sentirem seguros, negando situações desagradáveis;
- *Efeitos de grupo*, caracterizado pelo fato de as pessoas se ajudarem mutuamente em situações de emergência;
- *Retrocesso*, relacionado ao fato de se retornar ao local de perigo no intuito de resgatar algo ou alguém que ficou para trás;
- *Comportamento de parentesco*, caracterizado pelo fato de que familiares tendem a se reunir durante uma evacuação ou mesmo retroceder ao local de perigo para salvar um membro da família;
- *Arqueamento*, fenômeno caracterizado pela formação geométrica de um arco ao redor dos pontos de saída devido ao gargalo formado por todos os pedestres que se movem em direção à saída ao mesmo tempo;
- *Efeito do gargalo*, fenômeno caracterizado pelo adensamento que ocorre em locais como corredores que se tornam mais estreitos, onde formam gargalos devido à redução da velocidade;
- *Efeito de redução de velocidade*, relacionado ao fato do decréscimo da velocidade de locomoção devido ao aumento da densidade de pedestres. Este fato também ocorre quando do cruzamento de diferentes fluxos de pedestres;
- *Efeito do canto*, relacionado ao fato de a utilização do espaço pela multidão não ocorrer de maneira regular. Mesmo em ambientes populosos é significativamente menor o fluxo de pedestres próximos aos cantos e ângulos reentrantes;

- *Efeito de ondas de choque*, em ambientes com alta densidade de pedestres e baixa velocidade de deslocamento há alta pressão devido à tentativa de movimento restrita. Esta pressão provoca movimentos que lembram ondas, ora com maior ora com menor velocidade de deslocamento;
- *Formação de vias de pedestres*, quando a densidade de pedestres em deslocamento em sentidos opostos excede um valor crítico e ocorre uma auto-organização dos fluxos de pedestres se deslocando no mesmo sentido;
- *Prévia organização*, quando no cruzamento de distintos fluxos de pedestres ocorre, de forma espontânea e sem comunicação verbal, a concentração temporária de pequenos grupos, de modo a liberar espaço para que os pedestres se cruzem;
- *Mais rápido é mais lento*, caracterizado pelo fato de que quanto mais rápida for a movimentação das pessoas para saírem, mais lenta pode ser a evacuação;
- *Pânico*, caracterizado por uma reação em que o indivíduo fica em um estado anormal de ansiedade que afeta seu comportamento e reação à situação de emergência.

Nas grandes cidades contemporâneas a formação de multidões é cada vez mais rápida e frequente. Esse fato enfatiza a necessidade do aprimoramento de estudos e intervenções relacionados à segurança das pessoas em eventos, celebrações, shows, festas, jogos e espetáculos. Alguns acidentes recentes revelam a dimensão do problema. No ano de 1994, durante um ritual de peregrinação na cidade de Meca, um tumulto provocou a morte de 270 pessoas. Em 1996, em um jogo da eliminatória da Copa do Mundo de futebol na Guatemala, 83 pessoas morreram e 180 ficaram feridas (SILVA, F. 2012).

De certa forma, após casos de acidentes e tragédias como os citados anteriormente aumenta-se a atenção e os estudos sobre o fluxo de pedestres em locais de multidões. A tragédia em Meca, por exemplo, gerou o desenvolvimento de um modelo de simulação microscópico utilizando autômato celular¹⁸ para evitar acidentes entre os peregrinos na cidade (SILVA, F. 2012).

¹⁸ Autômato celular é um sistema dinâmico que consiste em uma grade regular de células que surge como uma técnica para modelagem de comportamentos complexos tendo como base um conjunto de regras simples. Recentemente foram realizados estudos e propostos, por exemplo, modelos de evacuação baseado em autômatos celulares para estádios de futebol (CARNEIRO, 2012) e salas de cinema (SILVA, 2012).

O caso do atentado nas Torres do World Trade Center, de 11 de setembro de 2001, talvez o mais impactante da história, também foi amplamente estudado quanto ao seu resultado catastrófico e quanto às minúcias relacionadas à sua evacuação (HARDING, 2008). O caso, de certa maneira, contribuiu para o aumento do número de estudos relacionados à evacuação de edifícios altos e trouxe à tona a discussão de novos meios e tecnologias de abandono das edificações (ONO, 2010). Outros estudos recentes levantaram aspectos relevantes nos grandes acidentes e tragédias ocorridos no mundo nas últimas décadas para desenvolver técnicas mais apuradas relacionadas à evacuação e dinâmica de pedestres (HELBING; JOHANSSON, 2008).

Além da questão da segurança, a arquitetura dos espaços voltados para multidão deve lidar com a complexidade das singularidades do comportamento humano relacionadas com a percepção do ambiente. Segundo Fruin (1971), a decisão a ser tomada pelo indivíduo em meio à multidão está diretamente relacionada ao conhecimento do espaço disponível e a seus padrões sociais e culturais. A área disponível para os pedestres se deslocarem pode ser fisicamente mensurada e está de certa maneira relacionada ao gênero, idade e condição física do indivíduo. Já o comportamento do pedestre, além das questões socioculturais, está relacionado à sua percepção e cognição, o que não pode ser precisamente mensurado.

3 ARQUITETURA NA ERA DIGITAL

Neste capítulo¹⁹ a arquitetura contemporânea é abordada sob a perspectiva das mudanças provocadas pela inserção da máquina digital no processo de concepção e produção arquitetônica. Conceitos e projetos de uma arquitetura do fluxo, uma arquitetura líquida são apresentados e discutidos. O intuito aqui é contextualizar as possibilidades e implicações do uso da tecnologia digital na concepção de espaços para grande fluxo de pessoas.

3.1 ARQUITETURA E TECNOLOGIA

"brains with computers work differently than brains without computer"

(LYNN, 1999, p.57)

Se desde o Renascimento a arquitetura utilizou a ciência e poderosas ferramentas técnicas para formalizar seus conceitos sobre a forma e o espaço (NATIVIDADE, 2010), nesta era digital, quando a atividade humana é cada vez mais pautada por um código binário abstrato (VELOSO, 2011), a arquitetura encontra novos desafios e possibilidades.

A partir da década de 1990 observa-se uma grande difusão dos processos de desenho e fabricação digital principalmente devido à evolução dos software, o acesso cada vez maior do público aos computadores, à simplificação dos processos de programação, e à redução e difusão das máquinas de produção digitais (SGUIZZARDI, 2011).

A incorporação da tecnologia digital no desenvolvimento dos projetos, processos e produção da arquitetura, do design e da engenharia são cada vez mais intensas e irreversíveis. Surgem novas formas e processos em arquiteturas pautadas pelo digital em um mundo já dominado por ferramentas digitais e pela interconexão mundial dos computadores (NATIVIDADE, 2010). Se inicialmente os computadores são utilizados apenas para acelerar o processo de produção projetual e de representação, com o tempo a máquina numérica torna-se cada vez mais intrínseca a todo processo de concepção e produção arquitetônica.

¹⁹ "Arquitetura na Era Digital" é o termo do título do livro de Branko Kolarevic (2009) *Architecture in the digital age: design and manufacturing*, utilizado como referência para a compreensão da arquitetura contemporânea no uso da tecnologia digital, como um sistema que permite a integração direta da concepção e execução, pelos altos níveis de complexidade da forma e do processo de concepção.

Greg Lynn, Marcos Novak e Peter Eisenman estão entre os pioneiros em explorar os potenciais da máquina numérica na geração de novas e complexas formas (NATIVIDADE, 2010). O computador passa a ser utilizado no processo de concepção arquitetônica, influenciando diretamente a forma e todo processo criativo.

No projeto digital²⁰

(...) o processo conceutivo se dá através de padrões descritivos e a articulação destes padrões em novas entidades a serem utilizados por um computador. O digital está presente na realização da arquitetura com auxílio visceral das propriedades de computadores e não na natureza intrínseca da aparência de seus produtos. Em outras palavras, arquiteturas digitais dizem respeito a processos e não a produtos. (NATIVIDADE, 2010, p.35).

Posteriormente, as novas tecnologias passaram a operar redefinindo processos de concepção e produção e, na análise, modelagem, simulação e construção dos edifícios e espaços. Neste momento veremos construções de formas complexas, possíveis apenas com o auxílio da máquina numérica digital em todo processo de concepção e construção, ou seja, *Computer Aided Design* (CAD) ou Desenho Assistido por Computador e *Computer Aided Manufacturing* (CAM) ou Manufatura Auxiliada por Computador, sendo utilizados de maneira integrada.

O avanço da tecnologia digital no processo de concepção e produção tem como um de seus precursores mais importantes e conhecidos o escritório do arquiteto canadense Frank O. Gehry. Utilizando o programa CATIA²¹, uma multiplataforma CAD, CAM, *Computer Aided Engineering* (CAE) ou Engenharia Auxiliada por Computador, desenvolvido pela empresa francesa *Dassault Systèmes* para processos industriais, principalmente dos setores automotivo e aeroespacial, o escritório esteve à frente de algumas obras marcantes da utilização da tecnologia digital na arquitetura. O Museu Guggenheim de Bilbao (1991-1997), o Peixe de Barcelona (1989-1992) e o Disney Concert Hall (1987-2003) foram as principais obras do escritório no período, onde, utilizando computadores, viabilizaram formas e estruturas tridimensionais complexas (SGUIZZARDI, 2011).

Nos anos 2000, após as experiências, dificuldades, críticas e reflexões acerca da questão digital, observa-se o amadurecimento e difusão de sua prática na arquitetura por meio

²⁰ Tradução de "Digital Design" de Oxman (2006) utilizado por NATIVIDADE (2010) e também aqui adotado.

²¹ Computer Aided Three-dimensional Interactive Application.

da popularização de software *Building Information Modeling* (BIM) ou Modelagem de Informação da Construção e software de modelagem paramétrica e matemática avançada (SGUIZZARDI, 2011).

O BIM parte do conceito do desenvolvimento de projetos de arquitetura e engenharia com base em um único modelo mestre, um modelo digital de informação construtiva que contenha todas as informações necessárias para a construção do edifício e que seja base para todos os profissionais envolvidos no projeto (NATIVIDADE, 2010).

O processo integrado de projeto promovido por meio de plataformas BIM não apenas facilita o compartilhamento e a criação participativa através das redes globais (SGUIZZARDI, 2011), como se torna elemento essencial na concepção e execução de arquiteturas de formas complexas, como as citadas obras de Frank O. Gehry. Com base em um modelo digital, arquivos com os componentes construtivos são descarregados diretamente em máquinas gerenciadas por controle numérico (CNC) que cortam as peças arquitetônicas usando laser, plasma ou jato d'água, com precisão milimétrica (NATIVIDADE, 2010; FLORIO, 2005).

A vinculação de atributos aos objetos representados no projeto e a integração das diversas áreas de conhecimento em uma só plataforma por meio da Modelagem da Informação da Construção permite não só maior velocidade e melhor gerenciamento do fluxo de dados, como a incorporação de novos elementos à concepção arquitetônica, como por exemplo a simulação de fluxos de pedestres.

3.2 CONCEPÇÃO ARQUITETÔNICA NA ERA DIGITAL

"A representação foi temporalizada e operacionalizada como uma interface para simulações dinâmicas. O modelo informatizado tornou-se, tanto um meio de descrição, como um meio de instrução, na rápida elaboração de protótipos e na rápida construção robótica de formas complexas." (NOVAK, 1999)

As plataformas integradas de trabalho (BIM), a complexidade e especialização na construção civil, e a velocidade de transmissão de dados e informações em nível global, fazem parte de uma significativa mudança no processo de concepção do projeto arquitetônico.

Ao mesmo tempo em que se observa a expansão do uso das ferramentas digitais na prática arquitetônica a partir da década de 1990, surgem as pesquisas sobre o impacto de seu uso no processo projetual. A difusão da máquina numérica trouxe grandes mudanças no modo de concepção, criando diferentes maneiras de se projetar e produzir um projeto de arquitetura. Oxman (2006) prevê mudanças fundamentais no processo de concepção arquitetônica e postula uma estrutura conceitual específica para o projeto nesta era digital.

Se no desenvolvimento da arquitetura com base em uma geometria euclidiana as decisões de projeto e o desenho por projeção atendiam às necessidades representativas, no desenvolvimento de formas complexas e orgânicas, e de uma geometria não euclidiana, as decisões de projeto passam a exigir sofisticados cálculos matemáticos aplicados por meio da utilização das máquinas numéricas (FLORIO, 2005).

Na concepção arquitetônica com ferramentas digitais, cada programa direciona e propicia um modo particular de operar nas questões formais e espaciais. O desenvolvimento de formas complexas utilizando este novo suporte digital parte do pressuposto que, segundo Mitchell²² (apud KOLAREVIC, 2003, p. 32) "os arquitetos desenhavam o que podiam construir e construíam o que podiam desenhar".

Desde o início, a utilização de plataformas digitais no processo de desenho e concepção, representa significativa interferência no processo projetual. Já em 1963, o *Sketchpad*, desenvolvido pelo pesquisador norte-americano Ivan Sutherland, era um programa que, a partir do gesto manual, desenvolvia desenhos geométricos com base em parâmetros definidores dessas formas. Ao relacionar parâmetros pré-determinados ao gesto do usuário, o programa revelava aquilo que tornaria um dos elementos centrais da concepção arquitetônica contemporânea, a parametrização e a interferência da modelagem digital na concepção arquitetônica (VELOSO, 2011).

No processo projetual das arquiteturas digitais, alguns conceitos são criados ou ganham novo papel no desenvolvimento da máquina numérica. Entre eles citamos a parametrização, os sistemas generativos e as gramáticas de forma.

²² Professor e pesquisador do Massachusetts Institute of Technology William Mitchell foi um dos pioneiros na aplicação da prototipagem rápida e fabricação digital na arquitetura e construção.

O uso da parametrização na arquitetura tem origem na engenharia, onde já é utilizada há mais tempo. Quando a concepção de um desenho ou projeto está associada a uma série de informações previamente determinadas é possível criar novas formas com base nos mesmos princípios. A alteração dos parâmetros significa alteração da forma, dos desenhos e dos espaços criados. Em software que trabalham com modelagem paramétrica é possível modificar as formas apenas mudando os parâmetros definidos anteriormente (NATIVIDADE, 2010).

De certa maneira os software de modelagem paramétrica deram suporte para a utilização dos conceitos de topologia na arquitetura. Em topologia investiga-se a organização ou relações espaciais que se mantêm independentemente da forma arquitetônica, com destaque para a continuidade espacial e a relação entre diferentes regiões e superfícies (SPERLING, 2003). O que importa de fato na topologia é o aspecto relacional, o modo como os espaços se relacionam e não as novas formas produzidas. Ocorre aqui uma mudança da ênfase da forma física para uma estrutura de relações e interconexões existentes (FLORIO, 2005).

Na compreensão da utilização da plataforma digital no processo de projeto arquitetônico, nos baseamos nas três propriedades fundamentais apontadas por Greg Lynn (1999) a respeito do computador: topologia, tempo e os parâmetros. Segundo Lynn estas propriedades devem ser discutidas começando com os princípios das entidades topológicas, em seguida estabelecendo as implicações que as formas topológicas levam para a relação entre o tempo e a forma, e concluindo o processo com uma discussão sobre os parâmetros e estatísticas que podem ser armazenados nestas superfícies temporárias.

Em espaços de grande fluxo de pessoas e informações, as plataformas digitais, a parametrização e a topologia, tornam-se elementos determinantes do processo projetual arquitetônico.

3.3 ARQUITETURA EM ESPAÇOS DE FLUXO

Para pensarmos a arquitetura na era digital para espaços de grande fluxo de pessoas ou espaços de multidão, destacamos três importantes arquitetos ou grupos, que de uma forma ou de outra lidaram com a complexidade da forma, da parametrização dos fluxos e da

continuidade do espaço. Iremos relatar e revelar alguns aspectos da obra mais conceitual de Marcos Novak e Greg Lynn, e a concepção do pavilhão da água do Grupo Nox, que dão base para esta pesquisa.

Marcos Novak

Marcos Novak com a *Transarquitetura* e *Arquitetura Líquida* desenvolve conceitos inicialmente para uma arquitetura do ciberespaço²³, mas que terá grande influência no pensamento arquitetônico digital. Novak explica que a arquitetura se depara com um desenvolvimento sem precedentes ao lidar com um espaço público global e sem existência física, um espaço digital urbano e arquitetônico (NOVAK, 1999). Em *Arquitetura Líquida*, Novak estabelece uma arquitetura das relações, modelos paramétricos²⁴ onde os objetos são submetidos constantemente à mudança dos seus parâmetros e na determinação de suas formas (NATIVIDADE, 2010).

A *arquitetura líquida* é relacionada por Novak a espaços dinâmicos e fluidos, gerados em ambientes digitais explorando geometrias não euclidianas e formas e cálculos complexos. Esta arquitetura é, no entanto, livre das leis gravitacionais e da realidade física e está relacionada à radicalidade de um mundo virtual (GRILLO, CRUZ JUNIOR, 2010). Na fluidez do contemporâneo, Novak explora a arquitetura como extensão dos nossos corpos, como abrigo de um ser frágil em que a arquitetura não tem forma pré-definida. A arquitetura líquida é aquela onde o ser atua de forma dinâmica na transformação do seu próprio espaço, de seu próprio abrigo (NATIVIDADE, 2010).

Ainda que as teorias e conceitos expostos por Novak sejam de grande relevância ao desenvolvimento e reflexão sobre a arquitetura contemporânea, é importante salientar que o mesmo nunca vislumbrou a materialização da arquitetura. Seu modelo digital abdica o mundo concreto com referência e afirma o ciberespaço como experiência plena e criativa (VELOSO, 2011). A preocupação central de Novak parece ser a de um provocador indutor da liberdade do mundo virtual. Sua abordagem parece desejar que o arquiteto se torne mais um bom programador de dados ou um construtor de espaços virtuais do que um profissional que lida com a gravidade e a concretude do mundo real.

²³ Termo cunhado na obra literária *Neuromancer*, de William Gibson, em 1984.

²⁴ “O desenho parametrizado é automaticamente ajustado quando se modifica um elemento com um novo valor. O uso de *softwares* que permitem esse tipo de desenho proporciona a diminuição do tempo de projeto assim como aumenta as possibilidades de variações de um mesmo modelo e agiliza a visualização de cada uma delas” (OLIVEIRA; FABRICÍO, 2009, p.4).

Greg Lynn

Greg Lynn, arquiteto e filósofo norte-americano, foi um dos pioneiros na aplicação da modelagem paramétrica em estudos sobre arquitetura dinâmica - líquida e topológica - no início da década de 1990. Lynn utilizou métodos de programas computacionais da hidrostática e hidrodinâmica para parametrizar fluxos urbanos e humanos em um projeto para um terminal de ônibus em Nova Iorque. Nessa experimentação, na qual o arquiteto não tinha a intenção de gerar uma forma ou projeto exequível, um modelo espacial de simulação da circulação de pedestres, ônibus e automóveis, gerado por partículas, cada uma com peso, densidade e velocidades específicas, determinou os espaços arquitetônicos e suas relações de fluxo (KOLAREVIC, 2009). Tal abordagem foi classificada por Oxman (2006) na classe 4 dos 5 modelos paradigmáticos²⁵, correspondente a modelos gerativos baseados em desempenho (TERRA *et al*, 2012).

Para Greg Lynn a concepção dos espaços tem como base uma geometria topológica em que as superfícies se entrelaçam criando uma nova hierarquia entre os elementos arquitetônicos. Seu método de concepção tem estrita relação com a arquitetura naval onde os espaços internos estão diretamente relacionados à função da forma externa, que tem por princípio a dinâmica do movimento. Lynn tem grande importância para se pensar a arquitetura por meio dos chamados modelos dinâmicos ou “modelos matemáticos que tratam de interações variáveis com o tempo [...]” (MELLO, 2007, p.14). Lynn acredita que possa haver uma quebra de paradigmas ao se repensar o espaço passivo de coordenadas estáticas para o espaço ativo das interações. A incidência do vento, do sol, o deslocamento dos pedestres, dos automóveis etc., são exemplos de forças presentes nos ambientes reais que, por meio de simulações, influenciam a forma arquitetônica (LYNN, 1999, p.75).

Figura 3-1. Imagens da proposta de Greg Lynn para um terminal de ônibus em Nova Iorque.

Fonte: KOLAREVIC, 2009, p. 20.

²⁵ Oxman, em seu artigo "Theory and design in the first digital age" (2006), classifica em cinco os modelos paradigmáticos da era digital: (1) CAD models; (2) Formation models; (3) Generative models; (4) Performance models; (5) Integrated compound models.

Grupo NOX

O experimento arquitetônico mais conhecido relacionado aos conceitos da arquitetura líquida foi o pavilhão da água (H₂O Expo do ano de 1997) concebido pelo Grupo Nox. Fundado pelo arquiteto holandês Lars Spuybroek e claramente influenciado pelas teorias de Marcos Novak, o Grupo Nox concebeu uma arquitetura líquida fisicamente edificável, onde não apenas buscou-se o desenvolvimento de formas e espaços fluidos, como a interatividade dos usuários com a arquitetura (GRILLO; CRUZ JUNIOR, 2010). Na sua busca pelo desenvolvimento de formas e em sua relação com a arquitetura líquida Lars Spuybroek desenvolve uma série de diagramas para pensar a arquitetura. Em um destes diagramas desenvolve um modelo físico de estrutura para torres com um método semelhante ao desenvolvido por Antoni Gaudí para suas estruturas em catenárias. Ao invés das linhas com pesos que davam a forma invertida de torres em catenárias Lars Spuybroek utiliza fios de lã molhados para se pensar a forma fluída ou a forma determinada por uma gravidade mais homogênea e fluida do líquido (Figura 3-2).

Figura 3-2. Desenvolvimento de diagrama de sistema de colunas com base em fios de lã molhada.

Fonte: GARCIA, 2010, p. 277.

No começo dos anos 1990, o Grupo NOX foi convidado a desenvolver o projeto do pavilhão na ilha artificial de Neeltje Jans (Holanda) destinado a alojar uma exposição sobre a importância da água no planeta. A obra deveria explorar de forma não didática as

possibilidades, experimentações e percepções dos efeitos sensoriais e estéticos da água nos visitantes (SILVA, M. 2012). No pavilhão da H₂O Expo²⁶, da interação do visitante com a arquitetura se gerava a exibição de imagens e sons por todo seu espaço interno. A constante mudança destas imagens e sons, por sua vez, induziam o visitante a percorrer o pavilhão. O pavilhão era dotado de sensores que captavam o movimento do visitante e geravam novas imagens e configurações do espaço. Segundo seu autor, o edifício fora concebido além do entendimento tecnológico comum de interatividade, o edifício era "[...] uma arquitetura que se transforma" (SPUYBROEK, 2004, p. 18).

Na concepção arquitetônica do pavilhão, a forma foi influenciada por forças e fatores locais, como o vento, o fluxo de visitantes e a mudança das dunas de areia (NATIVIDADE, 2010). A caracterização de um ambiente "líquido" foi feita por meio de um ambiente interno formado por superfícies em diferentes níveis de piso, parede e teto, como se o visitante se deslocasse no espaço de maneira similar à passagem da água, que toma a forma do espaço onde se encontra (GRILLO; CRUZ JUNIOR, 2010).

Spuybroek define uma morfologia para o edifício da H₂O Expo com base em cilindros deformados perpendicularmente ao seu eixo direcional e em seu processo de concepção se utiliza de conceitos de diferentes campos do conhecimento e da interação entre o desenvolvimento de modelos físicos e digitais. O computador, utilizado desde o início do processo de concepção, é uma ferramenta conceitual que serve de suporte para uma metodologia "[...] baseada em regras e estratégias que levam o arquiteto a oscilar entre o determinismo pragmático e a variabilidade empírica, situações descritas por ele como sendo paradoxais que geram a tensão da qual surge a sua arquitetura" (SGUIZZARDI, 2011, p.70).

²⁶ Desenvolvido pelo escritório entre os anos de 1993 e 1997, o H₂O Expo é um complexo composto por dois pavilhões interconectados. O edifício sobre o ciclo da água doce foi projetado pelo Grupo Nox e o edifício sobre a água salgada pelo escritório ONL.

Figura 3-3. Imagens internas do edifício H2O Expo.

Fonte: GRILLO; CRUZ JUNIOR, 2010, p.10.

Figura 3-4. Imagens externas do edifício H₂O Expo.

Fonte: SILVA, M. 2012, p.33.

4 ESTAÇÕES METROFERROVIÁRIAS E ARQUITETURA

Este quarto capítulo apresenta características da arquitetura das estações metroferroviárias relacionadas ao fluxo de pedestres. O intuito aqui é discutir os principais conceitos relacionados ao dimensionamento e concepção destes terminais de transporte de passageiros. Ao seu final, é feita uma contextualização e análise crítica das estações do sistema metroferroviário de São Paulo.

Um elemento importante na leitura deste capítulo que engloba toda a pesquisa é a utilização dos termos para se referenciar aos sistemas de transporte estudados. Segundo definição da *International Association of Public Transport*²⁷ (UITP), os metrô são sistemas de transporte elétrico urbanos com alta capacidade e alta frequência de serviço, que funcionam sobre vias independentes de outros tráfegos. Em São Paulo poderíamos, portanto, designar as linhas operadas pela Companhia Paulista de Trens Metropolitanos (CPTM), bem como os futuros monotrilhos, como metrô. Porém, para facilidade de entendimento e pelo uso corrente dos termos por outros pesquisadores e profissionais e ainda por existirem algumas distinções operacionais, de forma e de uso entre os meios citados, manteremos o termo trem metropolitano para o transporte operado pela CPTM, metrô para o transporte operado pela Companhia do Metropolitano de São Paulo (Metrô) e pela empresa ViaQuatro, e monotrilho para o modal em construção. No desenvolvimento da pesquisa quando forem tratados elementos ou referências comuns para estes três meios de transporte, utilizaremos o termo metroferroviário, termo corrente no meio técnico e acadêmico.

4.1 ARQUITETURA DAS ESTAÇÕES METROFERROVIÁRIAS

A arquitetura das estações ferroviárias e metroviárias sofrem historicamente transformações relacionadas à evolução tecnológica, ao crescimento das cidades, ao aumento da demanda por mobilidade, a integração à malha urbana, etc. Quando do surgimento das ferrovias no século XIX, o *hall* de passageiros e a cobertura das plataformas eram os principais elementos das estações e constituíam um repertório significativo de formas arquitetônicas (FERNANDES, 2012). A arquitetura das estações em geral, apresentavam

²⁷ A UITP é uma associação internacional que funciona como plataforma para cooperação a nível mundial sobre sistemas de transportes público e mobilidade da qual integram autoridades públicas, operadores, institutos de pesquisa, universidades, industriais e serviços de transporte público.

elementos de destaque representando os avanços das realizações da ferrovia e tornando-se porta de entrada das grandes cidades. A Estação da Luz, por exemplo, local de chegada à cidade de São Paulo para muitos, é citada por Peixoto (2002) como uma espécie de templo à magnitude do poder do café, com sua torre dominando a paisagem paulistana e o tempo de seu relógio confundindo-se com o tempo público da cidade.

Na construção das estações a cobertura dos trens, e mesmo das plataformas, representavam grandes desafios à engenharia estrutural pela necessidade de vencer os grandes vãos com a menor quantidade de apoios possível. Estas estruturas aparentes, predominantemente metálicas, e as grandes áreas envidraçadas, davam destaque à arquitetura da *gare*²⁸ e das estações como um todo (FERNANDES, 2012).

O avanço da tecnologia ferroviária aos poucos provocou mudanças significativas na concepção e construção das estações. As locomotivas a vapor passaram a ter propulsão a diesel e posteriormente elétricas e eletromagnéticas, o que tornou os trens não só mais velozes e silenciosos como possibilitou que as *gares* pudessem ser cobertas e fechadas. Eletrificado ou com tecnologia de levitação magnética, a alimentação dos trens passa a ser feita por catenárias, por um terceiro trilho eletrificado, ou por bobinas eletrificadas nas paredes dos trilhos.

Os pesados carros do sistema ferroviário²⁹ construídos inicialmente em ferro fundido tornam-se cada vez mais leves, sendo feitos em aço carbono, em alumínio extrudado³⁰ e mesmo em compósitos à base de poliuretano³¹. Carros mais leves representam a possibilidade de estruturas de sustentação menores e mais delgadas e vias com maior duração e menor necessidade de manutenção.

Os sistemas de sinalização e comunicação são aprimorados. A operação das linhas ocorria por processos manuais que exigiam funcionários distribuídos ao longo de todo

²⁸ Termo utilizado para designar a área coberta das plataformas dos trens ou para designar as estações como um todo.

²⁹ Utilizaremos o termo carro para designar locomotivas, vagões e demais estruturas circulantes do sistema metroferroviário.

³⁰ Caso dos monotrilhos de São Paulo da linha 15 - Prata construídos pela empresa canadense Bombardier.

³¹ Projeto liderado por um grupo de engenheiros alemães em parceria com universidades e empresas do ramo busca substituir metais como aço e alumínio nos trens por materiais compósitos, à base de poliuretano e fibra de vidro. A previsão é que o novo material reduza o peso das peças da composição em mais de 35% e seu custo em 30% (INOVAÇÃO TECNOLÓGICA, 2012).

percurso. Aos poucos esta operação foi automatizada e hoje alguns sistemas operam de maneira totalmente remota, sem a presença de operador ou maquinista. Atualmente a maioria das estações possui espaços menores para controle e operação que acontece de forma remota em grandes Centros de Controle Operacional (CCO).

Quanto à implantação nas cidades, a evolução da geotecnia e a necessidade de um transporte de alta capacidade em áreas urbanas cada vez mais densas consolidou a criação de túneis, galerias e passagens, aproximando o transporte férreo das áreas de maior demanda e exigindo novas maneiras de se conceber as estações, agora subterrâneas e com áreas e formas cada vez menores e mais restritas. Além disso, a integração com outros modais e terminais, como aeroportos e rodoviárias, e a integração de linhas subterrâneas e linhas térreas ou elevadas, fez com que o programa das estações metroferroviárias fosse ampliado, trazendo reflexos em toda a arquitetura e espaços das estações, aumentando a complexidade e volume do fluxo de usuários e dos meios de transporte.

4.2 TERMINAIS DE TRANSPORTE DE PASSAGEIROS E ESTAÇÕES METROFERROVIÁRIAS

Os sistemas de transporte, sejam eles de passageiros ou de carga, são constituídos basicamente por três subsistemas: os veículos, as vias e os terminais (GUALDA, 1995). Os terminais de transporte de passageiros, segundo Guazzelli (2011), têm como função primária possibilitar a entrada e saída de passageiros do sistema de transportes, ou mudança de modal, atendendo suas necessidades de processamento.

Nos terminais os passageiros são elemento determinante da arquitetura e do dimensionamento dos espaços, do tempo, e dos componentes operacionais e não operacionais do sistema de transporte. Os terminais de transporte são constituídos, fundamentalmente, por componentes operacionais. Porém, à medida que crescem em porte e complexidade, passam a incorporar componentes complementares (GUALDA, 1995).

Os componentes operacionais, segundo Guazzelli (2011), estão relacionados com a função primária do terminal, de entrada e saída de passageiros do sistema de transporte. São associados ao processamento (bilheterias e bloqueios), à espera ou à aglomeração (*halls* de acesso, pisos intermediários e plataformas de embarque), e à circulação de passageiros

(escadas, rampas, elevadores e escadas rolantes). Os componentes não operacionais, como lanchonetes, banheiros, telefones, exposições, pequenos comércios, bancas de revista, etc., são elementos que podem contribuir com o nível de serviço da estação e demandas do usuário do sistema, mas não à sua função primária.

Estações metroferroviárias

Espacialmente o programa arquitetônico das estações metroferroviárias engloba, segundo Edwards (1997), basicamente quatro áreas distintas: *hall* de passageiros³², saguão de bilheteria, áreas de plataforma e áreas destinadas à operação, como escritórios, centro de operação e áreas de manutenção.

Kandee (2004) desenvolve os elementos da estação com base em suas áreas funcionais que se dividem entre: núcleo ou área central (*Core Area*), que concentra a chegada e o processamento de passageiros com bilheteria, local de informações, manuseio de bagagens, área de espera e reclamação; as áreas de transição (*Transition Area*) que conectam o passageiro a componentes não operacionais como banheiros, telefones e espaços comerciais ou à conexão a outros modais; as áreas periféricas (*Peripheral Area*) que conectam a área central da estação às áreas de acesso ao sistema de transporte como as plataformas de embarque e desembarque e às linhas de trem; e área administrativa (*Administrative Area*), destinada ao controle do tráfego, gestão e operação da estação.

Figura 4-1. Diagrama de elementos funcionais da estação.

Fonte: KANDEE, 2004, p.4.

³² Hall de acesso ou saguão.

No diagrama de Kandee (2004), o agrupamento das atividades por afinidade, a distribuição das áreas por uma hierarquia de operação e a determinação dos eixos de circulação, busca sistematizar a organização da estação moderna que passou a ter novos elementos e novos fluxos com incorporação de áreas de transição para a integração modal (FERNANDES, 2012). Nas estações subterrâneas, cada vez mais numerosas nas grandes cidades que exigem soluções de transporte de passageiros de alta capacidade, há uma grande limitação quanto aos espaços e formas projetados pelo alto custo da construção e todas as interferências estruturais, tecnológicas e de instalações que envolvem. Por este motivo o dimensionamento e a demanda de espaços e equipamentos requerem processos elaborados e cálculos complexos.

A concepção arquitetônica das estações inclui a definição de seus componentes operacionais e não operacionais e o dimensionamento de suas áreas funcionais. O dimensionamento e a determinação destes elementos estão diretamente relacionados ao nível de serviço pretendido e à segurança e capacidade de operação do sistema. A compreensão do funcionamento e dos fluxos da estação dentro desses parâmetros determinarão a concepção final de seus espaços.

Na caracterização das estações metroferroviárias, uma série de elementos deve ser observada. Entre as características mais relevantes à concepção arquitetônica destacamos o fato de as estações serem: de passagem ou terminais; integradas ou não a outros modais; com plataformas centrais, laterais ou mistas; com fluxo unidirecional de embarque ou desembarque ou fluxo bidirecional; e elevadas, em superfície ou subterrânea.

4.3 CAPACIDADE DAS ESTAÇÕES, SEGURANÇA E NÍVEL DE SERVIÇO

Na concepção de uma estação, inicialmente define-se qual será sua capacidade, bem como a capacidade de todos os seus componentes, de forma a evitar gargalos³³ e pontos ociosos, garantindo assim o correto balanceamento dos componentes sem onerar a operação ou a construção com componentes superdimensionados (GUAZZELLI, 2011).

³³ Pontos com falta de capacidade em relação aos demais componentes.

A capacidade de um terminal dentro do sistema metroferroviário é determinado, segundo o manual da *Federal Transit Administration (FTA)*³⁴, pela capacidade de seus componentes e o *Headway*³⁵ ou frequência com que os veículos carregam e descarregam o terminal (FTA, 2003; GUAZZELLI, 2011).

A definição da capacidade do terminal pode se relacionar ainda à capacidade estática - número de passageiros que podem ocupar determinada área sob determinado nível de conforto - e à capacidade dinâmica - capacidade das instalações/componentes processarem determinado fluxo de usuários (ALVES, 1981³⁶ *apud* GUAZZELLI, 2011).

Nível de serviço

Nível de serviço³⁷ é, segundo o manual da FTA (2003), o desempenho do serviço de transporte percebido ou medido do ponto de vista do passageiro. Ainda segundo o manual da FTA (2003) a abordagem sob o ponto de vista do usuário é complexa, pois envolve uma série de fatores relacionados à percepção de qualidade do serviço de transporte, como: se a viagem é feita de pé ou sentada; a confiabilidade do serviço de transporte quanto ao tempo de deslocamento e sua frequência; o custo financeiro do modal utilizado; a percepção de segurança no trajeto e nos pontos de parada ou estações; a aparência e o conforto nas instalações; se são necessárias transferências para completar a viagem, etc.

Com base no manual da FTA, Guazzelli (2011) propõe uma adaptação para a percepção dos serviços em terminais de transporte de passageiros com os seguintes fatores: quantidade de passageiros nos componentes dos terminais; quantidade de componentes que são necessários atravessar em todo seu trajeto no terminal (escadas, corredores, etc.); tipos de componentes não operacionais nos terminais; a confiabilidade no serviço do terminal, que deve garantir que o passageiro consiga utilizá-lo de forma adequada; o tempo que o

³⁴ A FTA é uma agência dentro do departamento de transporte dos Estados Unidos que dá suporte técnico aos sistemas de transporte público do país e seu manual sobre qualidade e capacidade do serviço de transporte é uma referência técnica amplamente utilizada.

³⁵ Termo usual para o tempo de intervalo entre trens. Parâmetro ligado à performance operacional das linhas de um sistema metroferroviário usualmente fornecido em segundos.

³⁶ ALVES, Cláudio J. P. Uma metodologia para avaliação e dimensionamento de terminais de passageiros em aeroportos brasileiros. 1981. Dissertação de mestrado. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.

³⁷ O termo nível de conforto também é utilizado por alguns autores e em alguns manuais técnicos com a mesma finalidade ou significado.

passageiro leva dentro do terminal de transporte; a percepção de segurança do passageiro dentro do terminal; a aparência do terminal e o conforto que ele proporciona.

Um trabalho que se tornou um importante marco sobre nível de serviço em sistemas de transporte de passageiros foi realizado pelo especialista em planejamento de transportes Jonh J. Fruin. Em sua pesquisa intitulada *Pedestrian Planning and Design*, de 1971, Fruin realizou uma série de estudos com pedestres na cidade de Nova York e definiu parâmetros de nível de serviço em situações diversas. Esses estudos são base para os parâmetros adotados também pelo manual da FTA, pelos técnicos do Metrô de São Paulo, e por grande parte dos estudos e projetos relacionados ao transporte de passageiros. O Metrô (METRÔ, 2005) utilizou o estudo de Fruin para seus projetos e concepção relacionada ao corpo humano e os parâmetros de ocupação do espaço e a compreensão de acordo com os níveis de conforto (de A a F), a área ocupada (de 1,2 m² a 0,3 m²), os raios que definem as zonas de distância (da elipse do corpo com 0,31 cm até um raio de 0,61cm) e das zonas e relações de espaço que vão da Elipse do corpo às zonas de circulação:

Figura 4-2. Níveis de conforto.

Fonte: Adaptado de FRUIN, 1971, p.67-68.

Com os níveis de serviço relacionados às dimensões do corpo e sua área de ocupação no espaço, Fruin (1971) define parâmetros para áreas de locomoção em nível, áreas de escadas e áreas de espera.

	Definição NS	Espaço por pedestre (m ² /p)
Nível de Serviço A	>= 1,2
	Espera e livre circulação nas áreas de espera possíveis sem qualquer conflito com os demais.
Nível de Serviço B	0,9 - 1,2
	É possível a espera e circulação sem atrapalhar os demais na fila.
Nível de Serviço C	0,7 - 0,9
	É possível a espera e circulação sem atrapalhar os demais na fila; esta densidade é o limite do conforto.
Nível de Serviço D	0,3 - 0,7
	Espera sem contato corporal é impossível; circulação na área da fila extremamente restrita e movimento só é possível em grupos; muito tempo de espera nessa densidade é desconfortável.
Nível de Serviço E	0,2 - 0,3
	Espera com contato corporal constante; circulação entre as filas impossível; filas nessa densidade sem grandes desconfortos só são sustentáveis durante um curto período.
Nível de Serviço F	< 0,2
	Virtualmente todas as pessoas na área da fila estão em contato direto	

Tabela 4-1. Nível de serviço em áreas de espera.

Fonte: Manual da FTA, 2003³⁸ apud GUAZZELLI, 2011, p.10.

	Definição NS	Espaço por pedestre (m ² /p)
Nível de Serviço A	>= 3,3
	Velocidade de caminhada definida livremente; conflito com outros pedestres improvável.
Nível de Serviço B	2,3 - 3,3
	Velocidade de caminhada definida livremente; pedestres respondem à presença de outros.
Nível de Serviço C	1,4 - 2,3
	Velocidade de caminhada definida livremente; ultrapassagem é possível em fluxos unidirecionais; pequenos conflitos com pedestres em fluxo reverso ou cruzado.
Nível de Serviço D	0,9 - 1,4
	Liberdade restrita para escolha de velocidade e ultrapassagem; alta probabilidade de conflito com pedestres em fluxo reverso ou cruzado.
Nível de Serviço E	0,5 - 0,9
	Velocidade e possibilidade de ultrapassagem restritas para todos os pedestres; movimento é possível apenas com conflito; movimento reverso ou cruzado é possível apenas com extrema dificuldade; volume se aproxima à máxima capacidade.
Nível de Serviço F	< 0,5
	Velocidade e possibilidade de ultrapassagem extremamente restritas; constante contato involuntário com outros pedestres; movimento reverso ou cruzado impossível; fluxo esporádico e instável.	

Tabela 4-2. Nível de serviço em área de locomoção.

Fonte: Manual da FTA, 2003³⁹ apud GUAZZELLI, 2011, p.8.

³⁸ FTA (Federal Transit Administration). *Transit Capacity and Quality of Service Manual*. 2ª ed. Washington: Transportation Research Board, 2003.

Segurança

Nos projetos das estações do Metrô e da CPTM de São Paulo, os cálculos e dimensionamento das áreas de segurança, rotas de evacuação e de saída normal têm como referência a quantidade de passageiros no momento mais crítico das plataformas, somado ao complemento da chegada de um trem completamente carregado. Nesta situação, usando somente as escadas fixas e as escadas rolantes no sentido de saída, a estação deve ser evacuada em um tempo máximo de quatro minutos. Quando da adequação de estações e sistemas mais antigos às exigências de prevenção contra incêndios, são projetadas saídas de emergências adicionais para assegurar a evacuação adequada das plataformas (METRÔ, 2005).

Nas estações subterrâneas a grande quantidade de passageiros e a restrição de espaço faz com que o Metrô adote sistema de exaustão e insuflação de ar de grande porte nas novas estações (METRÔ, 2008). Além disso, para caso de pane nos trens ou alguma situação de emergência no deslocamento entre estações, existem rotas de fuga sinalizadas em todo o percurso de maneira a garantir a saída segura do usuário das linhas e da estação. O Metrô segue como parâmetro a norma 130 da *National Fire Protection Association* (NFPA)⁴⁰ para rotas de fuga e dimensionamento de fluxos e espaços para contingenciamento. O dimensionamento dos elementos de segurança é um elemento crítico na concepção das estações e espaços de grande fluxo de pedestres e, por este motivo, muitas vezes são utilizados software de simulação de incêndio e simulação de pedestres. Este tema será abordado no capítulo seguinte desta pesquisa (METRÔ, 2008).

A segurança das estações metroferroviárias em São Paulo segue ainda a norma de proteção contra incêndio nacional - NR 23 (BRASIL, 2001) e as Instruções Regulamentadoras da Polícia Militar do Estado de São Paulo, com destaque para a IT 02, a IT 16 e a IT 20/2010.

³⁹ FTA (Federal Transit Administration). *Transit Capacity and Quality of Service Manual*. 2ªed. Washington: Transportation Research Board, 2003.

⁴⁰ NFPA é uma organização internacional com sede nos Estados Unidos que pesquisa e desenvolve normas sobre proteção, segurança e combate ao incêndio.

Acessibilidade

Muitas das estações do transporte de passageiros de alta capacidade de São Paulo tiveram que ter suas estruturas adaptadas para se adequarem às normas e parâmetros de acessibilidade. Entre os principais elementos a serem observados temos: a sinalização dos locais de embarque e desembarque para pessoas com deficiência visual; os locais de embarque prioritário para pessoas com deficiência física ou mobilidade reduzida, principalmente em horário de pico; pisos com superfície irregular e antiderrapante; e local para posicionamento de cadeira de rodas nos trens. Segundo a ABNT, o vão entre o trem e a plataforma deve ser de no máximo 10 cm e o desnível não superior a 8 cm (ABNT - NBR 14.021).

Os elevadores, elemento primordial para o usuário com cadeira de rodas ou com mobilidade reduzida, não fazem parte ainda de todas as estações do sistema metroviário de São Paulo, mas vêm sendo adequados nos últimos anos. Segundo levantamento do Metrô (2005), o uso de elevadores costuma ser de três a cinco vezes maior do que a previsão de usuários deficientes físicos, pois muitos outros usuários também acabam usando o equipamento.

A iluminação é também um elemento importante na determinação da velocidade e segurança no deslocamento dos usuários. A NBR 14.021 estabelece parâmetros de iluminância média de todas as áreas da estação, bem como contraste máximo, com destaque para os ambientes de circulação, corredores, escadas, rampas e plataformas.

4.4 DIRETRIZES DE DIMENSIONAMENTO DAS ESTAÇÕES METROFERROVIÁRIAS

Em São Paulo as estações do sistema de metrô e trem metropolitano abrangem distintas características de implantação, funcionamento e sistemas. Ainda que com um programa e padrões técnicos semelhantes, as estações do metrô e do trem metropolitano apresentam algumas diferenças notáveis relativas ao fluxo de usuário e de trens, ao comprimento das plataformas, e ao fato da maior parte das estações de metrô serem subterrâneas.

As empresas responsáveis pelos projetos das estações do sistema metroferroviário (CPTM, Metrô e ViaQuatro) trabalham com documentos técnicos com uma série de diretrizes sobre a concepção das estações. As diretrizes são baseadas no conhecimento empírico e na experiência de seu corpo técnico no desenvolvimento das estações ao longo dos anos de existência das empresas. Abordam premissas iniciais para o projeto das estações com dimensões e diretrizes sobre os acessos, *hall* de bilheteria, bloqueios, plataformas, salas operacionais, salas técnicas, ventilação, elementos de circulação, instalações sanitárias e elementos de implantação, urbanização e paisagismo (CPTM, 2003; METRÔ 2005, 2008). Destacaremos aqui algumas diretrizes de concepção das estações e os principais elementos operacionais relacionados ao processamento e deslocamento do usuário na estação.

Padrões de lotação

O padrão de lotação é a densidade de passageiros no sistema de transporte estabelecido pela relação passageiros em pé por m². O padrão de lotação está associado ao nível de serviço do sistema e é adotado levando-se em consideração os atributos e demandas do usuário, os aspectos técnicos da operação e de espaços e a viabilidade econômico-financeira da operação. De maneira geral, quanto maior os padrões de lotação, maior é a rentabilidade para o custeio da operação, bem como menor é o nível de conforto dos passageiros (METRÔ, 2005).

Na maioria dos sistemas de transporte de alta capacidade, é adotado nos horários de pico padrões de lotação maiores e nível de serviço menores, sendo que em muitos casos a demanda supera a capacidade do sistema ultrapassando os limites e padrões estabelecidos (METRÔ, 2005).

Guichês e Bilheterias

O Metrô (2008) adota uma fórmula para o dimensionamento da quantidade de guichês nas estações com a previsão de que 20% dos usuários comprem bilhetes em estações do tipo terminal e 15% nas estações de passagem. É adotado como premissa que, independentemente

do recomendado pelo cálculo, as estações tenham no mínimo 2 guichês e que sejam previstas máquinas para venda automática de bilhetes:

$$N_{gh} = \frac{P \times D_e}{360}$$

Onde:

N_{gh} = número de guichês.

P = porcentagem de usuários que utilizam a bilheteria.

D_e = demanda de entrada de usuários em horário de pico.

360 = nº de usuários atendidos por guichê em uma hora.

Bloqueios

Em relação ao número de bloqueios, o Metrô (2008) adota uma fórmula para o dimensionamento da quantidade de bloqueios. Prevê ainda que junto à linha de bloqueios sejam previstos espaços de acomodação com 5,00 m de comprimento na área livre e 10,00 m de comprimento na área paga. No dimensionamento são adotados como capacidade dos bloqueios o fluxo de entrada de 1.200 passageiros/hora e de 1.500 passageiros/hora no fluxo de saída.

$$N_{bq} = \frac{D_e}{1200} + \frac{D_s}{1500} \times 1,1$$

Onde:

N_{bq} = número de bloqueios.

D_e = demanda de entrada de usuários em horário de pico.

D_s = demanda de saída de usuários em horário de pico.

1,1 = coeficiente de segurança para manutenção (10%).

Plataformas

As plataformas são elementos-chave na concepção das estações metroferroviárias, pois influem diretamente na capacidade real de transporte do sistema. A facilidade de movimentação dos usuários no acesso e saída da plataforma, bem como no embarque e desembarque dos trens, influem diretamente no *headway* e, conseqüentemente, na capacidade operacional do sistema de transporte.

Entre as diretrizes para as plataformas seguidas pela CPTM (2003) está a garantia de uma distância mínima de 2 metros entre obstáculos pontuais e a borda da plataforma, a preferência de que as circulações verticais de saída e chegada ocorram no ponto mediano da plataforma, a preferência por plataformas centrais e a diretriz para que os usos essenciais como casa de máquinas, elevadores e sala de auxílio ao usuário fiquem sob a área de projeção do mezanino.

Já o Metrô possui diretrizes mais relacionadas ao dimensionamento das plataformas. Estas devem acomodar no mínimo 2/3 da capacidade de um trem (1.000 usuários) somados à demanda de um *headway* em situação de emergência, e possuem os seguintes parâmetros para dimensionamento (METRÔ, 2005):

Comprimento: 136,00 m

Largura mínima: 4,60 m

Faixa de Segurança: 0,60 m

Pé direito (mínimo): 3,50 m

Densidade: 3,00 usuários/m²

O cálculo do dimensionamento da plataforma é definido ainda por uma equação considerando o horário de maior demanda:

$$L = 0,60 + 0,25 + \frac{N1 + N2}{(C - 2 \times 0,25) \times 3,0}$$

Onde:

L = largura da plataforma.

0,60 m = faixa de segurança.

0,25 m = afastamento das paredes.

C = comprimento da plataforma.

N1 = número de embarques previstos em um *headway*.

N2 = 2/3 da capacidade de um trem.

3,0 = densidade máxima admitida.

Fluxos e elementos de circulação

Os fluxos da estação são determinados pelo tempo dos bloqueios, a forma de pagamento das tarifas - bilheterias, o *headway* dos trens, e o tempo de processamento dos

usuários em toda estação. Os níveis de serviço e a demanda de passageiros também são elementos determinantes da dinâmica dos fluxos, uma vez que a quantidade de usuários em circulação está diretamente relacionada ao tempo de processamento dos usuários nas estações.

Na concepção das estações do sistema metroviário de São Paulo, o Metrô de São Paulo adota os seguintes parâmetros de fluxo de usuários (METRÔ, 2005):

Corredores: 3000 usuários/m/hora, fluxo e contrafluxo.

Rampas: 3000 usuários/m/hora.

Escadas rolantes: 6500 usuários/hora.

Escadas fixas: desnível menor que 4,00m = 1500 usuários/hora (largura mínima de 2 m)
desnível entre 4,00 m e 6,00 m = 1200 usuários/hora.

Bloqueios: sentido de entrada = 1200 a 1500 usuários/hora.

sentido saída = 2000 usuários/hora.

Fernandes (2012), em sua tese de doutorado, discorre sobre a evolução das estações ferroviárias no mundo e as mudanças arquitetônicas ocorridas devido à integração com outros modais. A pesquisa tem como foco a arquitetura e os fluxos de pedestres das estações da cidade de São Paulo onde ocorre a integração física com transferência gratuita do trem metropolitano com o metrô. A pesquisa destaca a complexidade dos fluxos e problemas na adequação de antigas estações a novas demandas de passageiros e à integração entre os modais.

4.5 SOBRE AS ESTAÇÕES METROFERROVIÁRIAS EM SÃO PAULO

A demanda pela mobilidade em São Paulo cresce muito mais rapidamente do que sua população. Os sistemas de transporte de alta capacidade da quinta maior aglomeração urbana do mundo⁴¹ atendem atualmente 7,2 milhões de passageiros (LOBO, 2013). Apenas o sistema metroviário, considerado o mais denso do mundo desde 2008⁴², deverá ver sua demanda saltar dos atuais 4,6 milhões de passageiros para 10 milhões até o ano de 2021⁴³. Com a expansão do sistema metroferroviário da RMSP, representada pela continuidade das obras de

⁴¹ EMPLASA, 2011.

⁴² Em 2008 a CoMET, organização internacional que reunia dados dos maiores sistemas de transporte sobre trilhos do mundo, colocou o sistema metroviário de São Paulo como o mais denso do mundo com 10 milhões de passageiros por km de linha (AGÊNCIA ESTADO, 2008).

⁴³ Dados da reportagem da *Folha de São Paulo* com base em previsões do próprio Metrô. A previsão é de que em 2021 a rede metroviária possua um total de 200 km de extensão (PEREIRA, 2013).

4 linhas⁴⁴, a extensão da linha 2 - verde, e o início da operação de duas novas linhas⁴⁵, a previsão do governo do Estado de São Paulo é que, até o ano de 2020, 16,5 milhões de usuários passem diariamente pelas estações do sistema metropolitano (LOBO, 2013).

Nas horas de maior fluxo a densidade de passageiros nas estações e trens é altíssima e o nível de serviço muito abaixo do aceitável ou do inicialmente projetado. Apenas na Estação Sé, a mais movimentada do sistema⁴⁶, circulam aproximadamente 629 mil passageiros em um dia útil⁴⁷. Apenas para contextualizar este volume de passageiros, como comparativo de sua dimensão e demanda, segundo critério de classificação utilizado na pesquisa de Fischer (2013), alta demanda são as estações utilizadas por mais de 70 mil usuários por dia, média demanda entre 41 e 69 mil usuários/dia e baixa demanda as estações com utilização entre 20 e 49 mil usuários por dia. A Estação Sé evidencia, por estes parâmetros, a demanda excepcional existente no sistema metroviário de São Paulo.

Os estudos realizados no início da operação do metrô de São Paulo indicavam nível "E" dos parâmetros de Jonh J. Fruin como padrão de densidade de passageiros para os trens em horários de pico. Neste nível cada metro quadrado deveria atender entre 3,3 e 5,0, ou seja, cada pessoa ocupando entre 0,3 e 0,2 m² de área. O padrão para os cálculos e planejamento de demanda adotado pelo Metrô de São Paulo era inicialmente de 4 passageiros por m² para os dias úteis no pico de demanda. Em 2005, com o aumento da demanda, os padrões de densidade para planejamento da oferta de lugares nos horários de pico passaram para 6 passageiros por m² (METRÔ, 2005). Os estudos de padrões de conforto do Metrô foram base da norma NBR 9260 "Serviço Metropolitano - Nível de conforto - Acomodação em pé - Classificação", de 1986, adotada pela Associação Brasileira de Normas Técnicas que fora cancelada em 2011 (METRÔ, 2005).

Atualmente, com a crescente demanda, a densidade no sistema metroferroviário atinge constantemente valores de passageiros em pé por m² superiores a 9. Os casos de tumultos e incidentes tornaram-se nos últimos anos cada vez mais comuns⁴⁸ e a solução para esta demanda não deve mudar tão rapidamente (GALLO, 2014). No ano de 2012 a linha mais

⁴⁴ Expansão das linhas 4 - Amarela e 5 - Lilás do Metrô e conclusão e início de operação das linhas do monotrilho 15 - Prata (Vila Prudente - Cidade Tiradentes) e 17 - Ouro (Morumbi-Jabaquara).

⁴⁵ Linha 18 - bronze - do monotrilho (Tamanduateí - São Bernardo do Campo), e linha 6 de metrô (Brasilândia - São Joaquim).

⁴⁶ Estação Sé, que integra as linhas 1 - azul e a linha 3 - vermelha do Metrô.

⁴⁷ Considerando-se as entradas, saídas e transferências entre as linhas.

⁴⁸ No início de fevereiro de 2014, uma série de tumultos paralisaram trechos da linha 3 - vermelha do Metrô por algumas horas em dias distintos (FOLHA DE SÃO PAULO, 2014).

movimentada do Metrô⁴⁹ apresentava nos horários de pico da manhã uma média de 7,6 passageiros por m² e nos horários de pico da tarde 8,0 passageiros por m² (FOLHA DE SÃO PAULO, 2014).

Segundo parâmetros⁵⁰ apresentados pelo próprio Metrô sobre níveis de serviço no transporte urbano de passageiros sobre trilhos (METRÔ, 2005), é considerado confortável a situação em que de 2 a 3 passageiros ocupam 1 m². Cinco passageiros ocupando 1 m² é considerado desconfortável, e mais de 8 passageiros por m² é considerado inaceitável.

Operando com situações consideradas muito próximas de inaceitáveis desde 2005⁵¹, a busca de soluções mais elaboradoras e efetivas para a operação e concepção das estações e de todo sistema de transporte de alta capacidade de São Paulo são evidentes. Todas as linhas do sistema metroviário operam hoje acima do padrão de desconforto de 5 passageiros por m² e mesmo do padrão planejado e projetado de 6 passageiros por m².

Muitas estações antigas estão funcionando no seu limite e mesmo as estações mais novas já começam a operar saturadas. A impossibilidade de locomoção, recorrente nos horários de pico na interligação entre as estações Consolação e Paulista do Metrô, é o exemplo mais evidente de espaços e componentes subdimensionados nas estações de São Paulo.

Atualmente existe apenas um estudo no qual houve a utilização de modelos dinâmicos e simulação de fluxo de pedestres em São Paulo. Ele foi realizado visando apresentar uma melhor solução para o problema de interligação entre estações citado anteriormente e para mais algumas situações de estações da linha 4 - amarela do metrô. A CPTM ainda não realizou estudos e simulações dinâmicas de suas estações, mas está em processo de contratação de um software de simulação de fluxo de pedestres bem como estudos para otimização do *layout* das estações existentes.

⁴⁹ Linha 3 - vermelha transportou em média nos dias úteis no ano de 2012 1,2 milhão de usuários (FOLHA DE SÃO PAULO, 2014).

⁵⁰ Parâmetros baseados em pesquisa do Battelle Instituto de Tecnologia, localizado em Columbus, Ohio - Estados Unidos.

⁵¹ Documento do Metrô (2005) já apontava densidade de 7,8 pessoas por m² em 2005.

5 MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE FLUXO DE PEDESTRES

Neste quinto capítulo são apresentados e discutidos conceitos de modelagem e simulação de pedestres com foco em terminais de passageiros. É apresentado também um estudo inicial sobre a utilização de plataformas paramétricas para simulação de fluxo de pedestres e duas pesquisas específicas sobre a concepção, modelagem e simulação de terminais metroferroviários.

5.1 CONCEITOS DE MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE FLUXO DE PEDESTRES

Nos últimos anos, com a evolução dos computadores e dos sistemas de medição e rastreamento de pedestres, a simulação do comportamento humano e o processo de dimensionamento operacional com base em modelos dinâmicos teve um grande avanço. Na concepção de espaços destinados a multidões e grande fluxo de pessoas é cada vez mais comum a utilização de modelos matemáticos e software que geram cenários e simulações para os fluxos previstos.

Inicialmente o empirismo e a observação exibem os processos reais e servem de base para o desenvolvimento das teorias gerais e das fórmulas ou parâmetros de concepção e operação. Com base nas teorias gerais e na observação são desenvolvidos modelos, que, devidamente calibrados e validados, configuram-se em instrumentos poderosos no auxílio à concepção e operação dos espaços de grande fluxo de pessoas (DAAMEN; HOORGENDOORN, 2003).

A construção de um modelo de fluxo de pedestres envolve uma série de conceitos e distintas abordagens metodológicas. Um modelo pode ser estático ou dinâmico, sendo que o modelo estático não leva em sua formulação a variável tempo e visa representar o estado de um sistema em um instante determinado. Já os modelos dinâmicos são modelos matemáticos desenvolvidos para representarem as alterações do estado de um sistema no decorrer do tempo de sua simulação, evidenciando as mudanças a cada instante.

No modelo dinâmico, mais comumente utilizado para os estudos e análises de terminais de passageiros, são utilizados recursos computacionais para o desenvolvimento de métodos de simulação. Procura-se, desta forma, construir um modelo que melhor represente o

sistema em estudo reproduzindo a aleatoriedade da realidade por meio da combinação de probabilidades. Na simulação, a aleatoriedade influi diretamente nas condições de funcionamento de um serviço ou sistema e nos resultados apresentados.

Os modelos podem ainda ser determinísticos ou estocásticos. São determinísticos se todos os eventos que ocorrem são previstos no modelo, com início e fim determinados. São estocásticos se um ou mais valores associados à simulação não são previamente conhecidos, sendo determinados na simulação a partir da distribuição de probabilidades que o modelo apresenta. Nos modelos determinísticos os efeitos da aleatoriedade da realidade não podem ser observados, uma vez que este considera apenas os valores médios de demanda e capacidade (GUAZZELLI, 2011; GUALDA, 1995).

Na simulação do comportamento de pedestres existem ainda os conceitos de simulação macroscópica e simulação microscópica. Na simulação macroscópica se estabelece uma relação entre densidade, velocidade e fluxo de forma analítica, com fluxos agregados e menor nível de detalhes. A vantagem da simulação macroscópica é que exige menos dados de entrada e em geral é uma solução com processamento de dados e soluções mais rápidas. Em geral são mais utilizados em projetos de grande escala, como na simulação de veículos em rodovias ou em sistemas maiores.

Na simulação microscópica existe a análise individual dos elementos de forma dinâmica. Existe uma maior complexidade e mais tempo no processamento dos dados, uma vez que os fluxos e interações são individualizados. Conseguem simular elementos de grande ou pequena escala com maior precisão de comportamento, porém com necessidade de mais tempo de processamento. As simulações de pedestres normalmente são microscópicas sendo utilizadas para avaliar a mobilidade no entorno direto da área de eventos, nas estações de transporte de passageiros, bem como o acesso de automóveis ao local. (UETA, FERREIRA, 2013).

Existe ainda uma terceira classificação menos comum designada simulação mesoscópica, que apresenta características mistas com níveis significativos de detalhamento e agregação (ARIOTTI *et. al.*, 2004). No nível mesoscópico não se modela individualmente um pedestre e sim um grupo de pedestres em que cada grupo possui regras próprias de comportamento (SILVA, T. 2012).

O estudo prévio à concepção dos modelos deve levar em conta os objetivos pretendidos por seu desenvolvimento. Se por um lado uma abordagem macroscópica pode ser vantajosa pela facilidade e velocidade de calibração e por ser um modelo com menores possibilidades de erro, por outro tem limitações quanto a estudos mais detalhados e de menor escala. Nos estudos de simulação de pedestres algumas vezes são utilizadas combinação de métodos e modelos para se chegar às soluções mais adequadas e consistentes. Na modelagem de pedestres, além da simulação muitas vezes se utiliza também a teoria de filas. A teoria de filas é um método analítico que provê um modelo por meio de fórmulas matemáticas para demonstrar o comportamento de uma fila cuja demanda cresce aleatoriamente com análise precisa e determinável.

Um aspecto relevante quanto aos modelos de simulação de fluxo de pedestres é que muitos deles foram desenvolvidos com base em software utilizados para simular o tráfego de automóveis. Neste sentido simular o movimento do pedestre envolve maior complexidade não apenas pela necessidade de emular o comportamento humano como pelo fato de o pedestre, ao contrário do automóvel, ter a possibilidade de se deslocar no espaço em qualquer direção, 360°. Os veículos se deslocam predominantemente para frente e o movimento para as laterais acontece de maneira sempre longitudinal mesmo que o carro ou ônibus realize uma curva. Para os pedestres, ainda que o movimento para frente seja mais rápido e comum, o movimento lateral pode ocorrer de maneira direta, aumentando as possibilidades e complexidade do desenvolvimento dos modelos em relação aos automóveis.

No desenvolvimento dos modelos de simulação de pedestres são utilizados comumente alguns algoritmos. Os algoritmos são por definição uma sequência finita de instruções bem definidas que fazem parte da base da ciência computacional. Muitos algoritmos são estudados e desenvolvidos com o objetivo de simular comportamentos complexos, como o humano. Gualda (1995) utiliza uma combinação de três algoritmos heurísticos para o desenvolvimento do seu modelo de terminais aeroportuários e destaca que somente algoritmos heurísticos são capazes de ser aplicados em problemas combinatórios como a racionalização de layouts, ainda que sejam incapazes de garantir que a solução encontrada seja a melhor solução.

Outro elemento de grande importância na elaboração de modelos de simulação de pedestres está na calibração do modelo. Conceitualmente a calibração é um processo que visa determinar os parâmetros de um modelo de modo que os resultados da simulação e os

observados em campo sejam o mais próximo possível. A visão computacional, como veremos no próximo capítulo, é uma ciência utilizada pelos pesquisadores para a calibração de modelos de pedestres. Outros meios de calibração são também adotados usualmente como a contagem manual de usuários, sistemas de detecção e passagem de pessoas etc. A calibração é um processo complexo e a precisão de sua execução e incorporação aos modelos determinam sua validade para a realidade estudada.

5.2 ESTUDO DE MODELAGEM DE FLUXO DE PEDESTRES POR PARTÍCULAS

No desenvolvimento desta pesquisa, os conceitos de modelagem e simulação de pedestres serviram de base para a elaboração de um estudo⁵² inicial de modelagem paramétrica utilizando o conceito de partículas. Este estudo foi desenvolvido junto a professores da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo e apresentado no Congresso da Sociedade Iberoamericana de Gráfica Digital de 2012, em Fortaleza, sob o título *Modelagem por partículas em Engenharia, Arquitetura e Construção*.

A modelagem paramétrica aplicada em estudos relacionados à dinâmica (líquida e topológica) foi utilizada por diversos arquitetos e escritórios de arquitetura como Greg Lynn, Thom Mayne, Ben Van Berkel, Asymptote, MVRDV, NOX e ATKINS. A premissa de sua utilização para o estudo de uma estação metroferroviária é que os parâmetros de organização relacionada ao comportamento dos pedestres nestes espaços são um tanto distintos daqueles utilizados na organização de formas geométricas regulares. Ter os fluxos de pedestres e trens como parâmetro para a concepção arquitetônica seria, portanto, especialmente útil na concepção de espaços de formas complexas.

Com base em demandas específicas para cada localidade ou situação, estudos prévios de concepção de estações metroferroviárias baseados em modelos paramétricos poderiam ser desenvolvidos com maior velocidade e precisão. A questão-chave aqui estava relacionada à modelagem e simulação do comportamento humano quanto ao fluxo de pedestres.

⁵² O estudo aqui apresentado é apenas inicial, mas foi determinante para as decisões e estratégias tomadas no desenvolvimento desta pesquisa e revela elementos determinantes para compreensão do tema da simulação de pedestres e da arquitetura paramétrica.

Inicialmente os Conceitos da Fluidodinâmica Computacional⁵³ (CFD) foram estudados com o intuito de serem base para a simulação dos fluxos. O CFD é utilizado em alguns modelos e software para simular a evacuação de edifícios por meio da abstração do conceito de fluido. A utilização deste conceito para a modelagem paramétrica pretendida não se apresentou como a mais adequada, pois demonstrava restrições quanto à individualidade de cada pessoa em meio à multidão. Os fluidos, de certa forma, seguem um escoamento principal e por isso poderiam trazer limitações à tentativa de uma simulação microscópica.

A compreensão da necessidade de se obter o comportamento de cada indivíduo em meio à multidão e da utilização de um modelo paramétrico levou-nos a utilizar os conceitos de partículas e a desenvolver um processo de modelagem com o *plug-in Grasshopper*⁵⁴ no aplicativo *Rhinoceros*. Para o desenvolvimento de parâmetros para a modelagem das partículas com o intuito de simular o comportamento de pedestre foi incorporado ainda no *Grasshopper* uma extensão para incorporar comportamentos físicos chamada *Kangaroo*. Com esta extensão foi possível desenvolver um modelo no qual partículas com relação de massa, aceleração e velocidade determinados interagem entre si, desenvolvendo uma trajetória específica (TERRA *et al*, 2012).

Os distintos movimentos e comportamentos do somatório de indivíduos (partículas) em meio à multidão, simulados em uma plataforma paramétrica tridimensional, se apresentava como algo promissor para os estudos de concepção de estações metroferroviárias ou mesmo de qualquer outro espaço envolvendo grande fluxo de pedestres. Com base na análise deste modelo e em sua simulação seriam tomadas decisões quanto à forma e estrutura do espaço arquitetônico, bem como dimensionamento das áreas e dos componentes operacionais da estação.

A complexidade relacionada ao desenvolvimento de algoritmos e *scripts* que tornassem mais próximo do real o comportamento dos indivíduos (partículas) no modelo proposto, e as limitações de tempo relativas ao desenvolvimento desta pesquisa de mestrado levou à interrupção deste estudo investigativo. A sua relevância está nas potencialidades reveladas e nas limitações relacionadas a dificuldades de se simular o comportamento de

⁵³ A Computational Fluid Dynamics (CFD) consiste na utilização de métodos computacionais para simulação numérica de processos físicos ou químico-físicos que envolvem escoamento ou fluxo de fluidos e/ou gases, como transferência de calor, reações químicas, aspectos mecânicos, etc. (TERRA *et al*, 2012).

⁵⁴ O *Grasshopper* é uma estrutura que permite, através de uma interface gráfica, o uso de aplicativos com linguagem de programação, comumente vinculado ao software *Rhinoceros* para conceber desenhos com base em comandos de programação pré-concebidos.

pedestres em situações diversas. Este estudo possibilitou ainda uma maior compreensão da estrutura dos software de simulação de fluxo de pedestres existentes e às restrições de seu uso.

Figura 5-1. Duas partículas em interação com relação de massa, aceleração e movimento, e Scripts com uso do plug-in Grasshopper.

Fonte: TERRA *et al*, 2012, p.407.

5.3 SEGURANÇA E COMPORTAMENTO DE PEDESTRES

A complexidade dos cálculos e a gravidade do tema fazem dos projetos, estudos e pesquisas relacionadas à segurança contra incêndios e desastres, a base para o desenvolvimento de modelos de simulação de comportamento de pedestres. A segurança em espaços arquitetônicos foi a principal área onde se desenvolveram estudos de modelagem de comportamento de multidões.

Até o início dos anos 70, praticamente não existiam estudos e pesquisas a respeito do comportamento e tráfego de pedestres. A partir de então, a existência de cada vez mais locais com grande fluxo de pessoas e multidões e a necessidade de melhor compreender e analisar o funcionamento destes espaços, pesquisadores começaram a estudar o comportamento de pedestres mais intensamente. Primeiramente observando e derivando teorias e modelos simples do que era observado e, mais recentemente, com as técnicas de análise e observação mais avançadas e o uso de computadores mais rápidos e poderosos, surgiram modelos maiores e mais complexos e sua utilização, precisão e aplicação aumentou significativamente (DAAMEN, 2004).

Atualmente o número de software e pesquisas relacionados ao tema é bastante extenso. Guazzelli (2011) cita um portal de modelagem em evacuação para situações de emergência⁵⁵ que contabiliza 57 modelos de evacuação desenvolvidos com este fim. A utilização dos software para a simulação da movimentação de pessoas já é aplicado em diversas pesquisas, teses e artigos relacionados ao tema. Entre alguns dos principais software utilizados para este fim citamos: *Building EXODUS*, da *Fire Safety Engineering Group*; *EGRESS*, da *AEA Technology plc*; *LEGION*, da *Legion Internacional Ltda.*; *MYRIAD*, da *Crowd Dynamics*; *STEPS*, da *Mott MacDonald*; *VISSIM*, da *PVT Planung Transport Verkehr AG*; *FDS+Evac*, da *VVT Technical Research Centre of Finland* (Guazzelli, 2011; ONO, 2010).

Além das questões relacionadas à segurança e evacuação dos edifícios em casos de incêndio e desastres, o estudo sobre o comportamento de pedestres teve grande aprimoramento após a pesquisa de Jonh J. Fruin (1971). Hoje em dia diversos estudos, software e pesquisas relacionadas ao tema foram desenvolvidos, e dois estudos específicos para terminais metroferroviários serão apresentados ao final deste capítulo.

5.4 MODELAGEM DE PROJETOS DE TERMINAIS DE PASSAGEIROS

Como aponta Gualda (1995), a respeito de terminais de passageiros aeroportuários, grande parte dos estudos existentes estão relacionados às necessidades de área do terminal e seus componentes e poucos estudos buscam verificar a racionalização ou otimização de seus componentes e as vantagens comparativas entre as diferentes concepções funcionais do terminal.

Gualda (1995), em sua tese de livre-docência, realiza uma extensa revisão bibliográfica para identificar e analisar a existência de estudos e técnicas do melhor arranjo dos componentes operacionais em aeroportos e só encontra um estudo relacionado especificamente a este problema em uma tese de doutorado: *A computerized design method for preliminary airport terminal space planning*, de John P. Braaksma, na qual o autor desenvolveu um modelo computacional para planejamento das áreas de um terminal de passageiros aeroportuário objetivando diminuir o deslocamento médio dos passageiros no

⁵⁵ Evacmod é um portal com informações diversas sobre modelagem de evacuação para a simulação do comportamento humano em situações de emergência. Endereço eletrônico: <http://www.evacmod.net/>.

terminal. Em sua tese desenvolve um modelo baseado em características do modelo proposto por Braaksma, mas com tratamento matemático e abordagem distintos, e o aplica para a realidade de alguns aeroportos brasileiros. O objetivo do modelo proposto é melhorar a disposição dos componentes operacionais do terminal com base na redução da área total do terminal e da distância média percorrida pelos passageiros. Sua utilização visa tanto a implantação de um novo terminal como a racionalização de um terminal existente. A abordagem do modelo é baseada em heurísticas formadas por três programas principais relacionados à otimização de áreas, designação de fluxos e racionalização do *layout*⁵⁶.

Primeiramente Gualda (1995) utiliza o programa de otimização de área para determinar o número mínimo e área mínima das instalações necessárias de acordo com os padrões operacionais adotados. Com a definição do número de instalações e áreas de cada uma delas, Gualda utiliza o programa de designação de fluxos e cria um primeiro *layout*. Posteriormente, com a hierarquização dos fluxos de passageiros gerados por cada voo e as restrições geométricas e operacionais adotadas, configura-se o *layout* do terminal. Em seguida, utilizando um programa de racionalização de *layout*, as instalações do terminal são hierarquizadas em ordem decrescente do valor do fluxo total, de maneira que as instalações que possuem maior fluxo fiquem mais próximas e, desta maneira, obtenha-se um novo *layout* que minimize a necessidade de deslocamentos.

O modelo ou solução final obtido (GUALDA, 1995) gerou um arranjo relativo às instalações e aos fluxos de passageiros com formas circulares agrupadas geradas para facilitar a modelagem matemática das instalações. Ainda que existam aspectos relevantes quanto à análise conjunta da ocupação do terminal e do seu layout, existem restrições geométricas, de desenhos e de nível de serviço quanto à concepção arquitetônica e espacial que devem ser observadas, principalmente na menor escala, no detalhamento do desenho da arquitetura. Como explicitado pelo próprio autor (GUALDA, 1995), a pesquisa embrionária representa uma contribuição interessante ao tema e tem potencialidades em sua integração a uma ferramenta do tipo CAD e conseqüentemente uma maior relação com o processo de concepção arquitetônica.

⁵⁶ *Layout* ou *Lay-out* é o termo mais correntemente utilizado para designar o arranjo físico ou a configuração dos espaços e equipamentos dos terminais de transporte, que incluem posicionamento dos acessos, bloqueios, bilheterias, escadas fixas e rolantes, corredores, plataformas etc.

Na mesma pesquisa, Gualda estuda ainda a possibilidade de análise e balanceamento da capacidade e nível de serviço nos terminais de transporte, e destaca que o dimensionamento de terminais, antes da utilização de modelos, possuía uma série de restrições, pois estava baseada no dimensionamento dos componentes de forma individual e estática, sem contar com a interação entre os mesmos (GUALDA, 1995).

A restrição à análise estática de terminais de passageiros apontada pelo autor gerou uma série de pesquisas e o desenvolvimento de modelos para terminais aeroportuários na década de 70 e 80, o que de certa maneira contribuiu para o desenvolvimento de modelos para a concepção de terminais e espaços de grande fluxo de pessoas como um todo.

5.5 MODELAGEM DE TERMINAIS METROFERROVIÁRIOS

Ainda que o desenvolvimento de pesquisas e software sobre modelagem e simulação de fluxo de pedestres seja bastante significativo nos últimos anos, projetistas de estações de transporte público e outras instalações públicas ainda utilizam regras e parâmetros relativamente simples nos estudos e concepção de estações metroferroviárias (DAAMEN, 2004).

No processo de dimensionamento e projeto dos terminais metroferroviários, no Brasil prevalecem métodos empíricos com regras práticas que se valem de conceitos e experiências, e não de modelos (GUAZZELLI, 2011). Essa concepção baseada em parâmetros estáticos representa uma série de limitações em espaços de grande fluxo de pessoas. A percepção dos projetistas e operadores dos sistemas metroviários e o avanço das ferramentas, dos software e da possibilidade de desenvolvimento de modelos e simulação alteram o processo de concepção da arquitetura das estações metroferroviárias e demais espaços com grande fluxo de pessoas.

O desenvolvimento de ferramentas e mecanismos de avaliação, modelagem e simulação de estações e terminais metroferroviários que auxiliem projetistas e operadores destes sistemas de transporte são a questão central de dois trabalhos recentemente desenvolvidos que serão apresentados aqui: a pesquisa de doutorado de Winnie Daamen (2004) desenvolvida na Universidade de Tecnologia de Delft e a pesquisa de mestrado de Cauê Guazzelli (2011) desenvolvida na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

Daamen

Daamen (2004) realiza um extenso levantamento sobre o estado da arte quanto ao desenvolvimento de modelos e simulação de pedestres e propõe, por meio do desenvolvimento, uma nova ferramenta designada *SimPed* que funciona como um modelo de simulação de pedestres para o estudo de estações metroferroviárias.

A inovação no estudo de Daamen (2004) é o desenvolvimento de um modelo de simulação que integra não apenas o comportamento do pedestre e a escolha de rota, mas também o desempenho do sistema e a escolha das áreas onde são realizadas as atividades. O modelo inclui ainda a interação do pedestre com os veículos de transportes que chegam e partem de forma pré-determinada. No modelo de Daamen primeiramente se descreve uma representação bidimensional da infraestrutura necessária para a geração da trajetória. Aqui um desenho com os componentes de processamento e toda arquitetura deve ser representada onde são definidas as trajetórias e o comprimento dos percursos realizados.

A trajetória, os componentes e os dados de distância dos percursos formam um *modelo de rede*⁵⁷, que consiste em uma série de *nós* e *links*. Os *nós* são os pontos de decisão de rota que podem ligar a um ou mais *links*, que são os trechos onde os pedestres estão em deslocamento ou espera. *Eles* representam um lugar ou componentes de processamento, como bloqueios, bilheteria, etc. Os *links* representam um tempo de caminhada, de espera ou de serviço, representado pela passagem por uma infraestrutura, embarque etc. O tempo de percurso em um *link* depende da duração e do tipo do caminho a pé e na densidade do tráfego e são especificados no modelo de funcionamento da rede com dados sobre o processo de caminhada, espera, trajetória, escolha e desempenho nas atividades.

⁵⁷ Tradução livre do termo *network model*.

Figura 5-2. Representação do modelo de rede com os tipos de *links* e os *nós*.
 Fonte: DAAMEN, 2004, p. 145.

Este *modelo de rede* serve de base para os modelos de comportamento, que envolvem a escolha das rotas. A geração das rotas determina o caminho mais curto entre dois *nós* do *modelo de rede* levando-se em conta todos os possíveis obstáculos e restrições. Existe um elemento de complexidade no modelo desenvolvido por Daamen (2004) que suporta diferentes desenhos de configurações de espaço e infraestrutura, algo que muitas vezes não é simples de ser resolvido automaticamente pela ferramenta desenvolvida.

No modelo de Daamen os elementos de infraestrutura são definidos como uma lista ordenada de coordenadas, e um algoritmo⁵⁸ é utilizado para encontrar as possibilidades de deslocamento em uma trajetória mais curta entre os componentes ou *nós* do modelo da estação. Para Daamen (2004), a exata trajetória do usuário no espaço não é relevante para o modelo e sim o tempo e o local que está sendo percorrido.

Gerado o *modelo de rede* e os *links* e *nós*, são definidas as expressões matemáticas para cada tipo de infraestrutura, os trechos de caminhada e de espera. Tais expressões definem o tempo para cada infraestrutura da estação que está relacionado a um tempo de espera mais um tempo de utilização da infraestrutura. Por exemplo, quando um usuário vai utilizar o elevador é computado no modelo o tempo de espera para a chegada do elevador mais o tempo que ele leva dentro do elevador.

Com base no *modelo de rede* e as expressões que definem o tempo que o pedestre levará em cada um dos componentes são definidas todas as combinações de atividades possíveis. Estas atividades são agrupadas em uma espécie de diagrama⁵⁹ que permite cruzar todas as combinações possíveis de locais e atividades que o pedestre pode realizar. Em seguida determina-se o tempo total que o pedestre leva, nas condições dadas, para realizar todas as atividades e atravessar a estação. Para cada uma das combinações do diagrama é calculado o respectivo tempo de deslocamento. E ao final, é calculada e adotada a alternativa em que o pedestre leva menos tempo para cumprir seu objetivo.

Talvez um dos elementos mais relevantes no sistema proposto por Daamen é que utilizando o *SimPed*, um software específico para a simulação do comportamento dos pedestres, ele desenvolve uma simulação microscópica onde o pedestre avalia a possibilidade de mudança de rota e direção em intervalos curtos de tempo pré-determinados, como em uma *Timeline*. Este fato aproxima os parâmetros de simulação ao comportamento dos pedestres à realidade, onde cada indivíduo busca o caminho aparentemente mais curto ou menos cheio para se deslocar a todo momento. Além disso, na simulação de pedestres realizada por Daamen são determinadas as interações, velocidades e capacidades de passagem em situações de multidão ao longo do tempo, de acordo com a densidade de pedestres em cada espaço.

⁵⁸ Daamen (2004) utiliza em seu modelo o algoritmo *Backtracking*, que representa um refinamento da busca de possibilidades, uma vez que múltiplas soluções podem ser eliminadas sem serem explicitamente examinadas.

⁵⁹ Tradução livre.

Figura 5-3. Esquema de simulação da capacidade de passagem de pedestre em situações de grande aglomeração.

Fonte: DAAMEN, 2004, p. 171.

Guazzelli

Guazzelli (2011) realiza em sua pesquisa um levantamento bibliográfico sobre o dimensionamento e análise operacional de terminais metroferroviários e desenvolve um modelo de simulação e dimensionamento de estações com base na conceituação sistêmica do terminal, no dimensionamento operacional e do comportamento do pedestre.

A pesquisa desenvolvida por Daamen (2004) é uma das referências de Guazzelli (2011) para o desenvolvimento de seu modelo, porém existem diferenças importantes nas duas abordagens.

No desenvolvimento do modelo, ao contrário de Daamen, Guazzelli utiliza ferramentas computacionais de um software já consolidado. O *Arena* é um software de automação constituído por uma interface gráfica integrada de simulação de uso bastante difundido na modelagem e simulação de processos diversos. A vantagem de Guazzelli na utilização deste software, em grande parte, se dá pelo fato de ele permitir a configuração do modelo com maior facilidade e velocidade e o fato de gerar análises dos resultados da simulação e permitir a caracterização estatística do problema.

Conforme a própria definição do autor, Guazzelli desenvolve um modelo mesoscópico, tendo os pedestres modelados individualmente e seu comportamento gerado de

maneira agregada por meio da relação entre os pedestres e o ambiente conforme o fluxo na estação.

A ação do pedestre na estação no modelo de Guazzelli (2011) está dividida em duas partes, uma relacionada à escolha da rota dentro do terminal e outra ao comportamento que os passageiros terão ao interagir com o ambiente e os demais passageiros. Guazzelli desenvolve seu modelo valendo-se de uma análise sistêmica que consiste em uma compreensão macro do terminal e, posteriormente, na sua divisão em três subsistemas principais, designados *Subsistema de Acesso*; *Subsistema Regresso* e *Subsistema Ferroviário*.

Além da divisão do terminal em três subsistemas, Guazzelli desenvolve um método para a caracterização dos passageiros de seu modelo. Com base em dados da pesquisa Origem e Destino de São Paulo⁶⁰, Guazzelli diferencia os passageiros de seu modelo quanto ao gênero, idade e presença ou não de bagagem. Esses três atributos, definidos por meio de uma função matemática, atribuem características a cada um dos passageiros gerados pelo modelo. Os atributos determinam a velocidade de cada indivíduo nos elementos de circulação.

No modelo, Guazzelli se utiliza de um recurso designado de *passageiro equivalente*, para que o software possa gerar uma simulação que estatisticamente englobe a diversidade de usuários dentro de seus diferentes atributos de idade, gênero e presença ou não de bagagem. Este *passageiro equivalente* está relacionado no modelo ao processamento dos componentes da estação, como escadas rolantes e bloqueios, na velocidade de deslocamento dos corredores e escadas, e no ambiente em si, para modelar o impacto que cada passageiro causa no ambiente por sua velocidade e área ocupada.

Para a configuração do modelo de simulação, Guazzelli divide a estação em *elementos de processamento*, *elementos de circulação* e *elementos de espera*. Os *elementos de processamento* são os bloqueios, as escadas rolantes e a bilheteria. Os *elementos de circulação* são o *hall* de acesso, escadas, corredores, pisos intermediários e plataforma. E os *elementos de espera* são as plataformas de embarque.

São determinados ainda, no modelo, os pontos de decisão em que, seguindo um padrão de distribuição calibrado com base em dados reais, os usuários seguem por um ou outro caminho. O tempo de deslocamento dos passageiros na estação é determinado por uma função

⁶⁰ A pesquisa Origem-Destino é um levantamento realizado em conjunto pelo Metrô, CPTM, EMTU, SPTrans e a Companhia de Engenharia de Tráfego de São Paulo (CET) sobre as viagens diárias dos moradores da RMSP.

matemática, desenvolvida pelo autor com base em literatura consolidada sobre o tema, onde existe uma relação entre a velocidade de deslocamento do passageiro e a densidade do ambiente percorrido.

Figura 5-4. Velocidade de Caminhada X Espaço por pedestre.
Fonte: GUAZZELLI, 2011, p.81.

Ao final, o modelo de simulação desenvolvido integra a caracterização do usuário e o terminal de passageiros. Com base nos dados gerados pela simulação e a verificação *in loco* do funcionamento do terminal, o modelo pode ser calibrado e validado com certa facilidade.

Figura 5-5. Modelo de simulação desenvolvido por Guazzelli no software Arena.
Fonte: GUAZZELLI, 2011, p.87.

O estudo de Guazzelli tem grande relevância para o planejamento e projeto de terminais metroferroviários, pois permite de maneira relativamente rápida a avaliação do funcionamento dos terminais e a compreensão dos principais gargalos existentes, tanto quanto aos componentes operacionais quanto aos espaços da estação.

Os trabalhos e modelos desenvolvidos por Daamen (2004) e por Guazzelli (2011) são de grande relevância e contribuem diretamente para o planejamento, operação e projeto de estações metroferroviárias. No entanto, a complexidade do tema explicita a necessidade de aprofundar os estudos e difundir-los nos meios acadêmicos e nos meios de aplicação direta deste conhecimento. Destacamos aqui a necessidade de se aprimorar os mecanismos de percepção da realidade que possibilitem a calibração e validação dos modelos de maneira mais rápida e precisa, e a necessidade de integração dos modelos a plataformas CAD e CAE que potencialize sua utilização no processo de concepção arquitetônica de estações metroferroviárias futuras.

6 VISÃO COMPUTACIONAL

Neste capítulo são apresentados alguns conceitos relacionados à Visão Computacional e as possibilidades de sua utilização para analisar o movimento humano no espaço. Alguns elementos relativos ao início do desenvolvimento da fotografia, como tecnologia para a captação do movimento, são revelados e relacionados à evolução dos estudos sobre a utilização da Visão Computacional ao longo dos últimos anos. Ao final do capítulo um experimento recente de sintaxe visual é base para uma reflexão sobre a utilização da Visão Computacional na arquitetura contemporânea.

6.1 O VISÍVEL E O MOVIMENTO HUMANO

"O mundo da percepção, isto é, o mundo que nos é revelado por nossos sentidos e pela experiência de vida, parece-nos à primeira vista o que melhor conhecemos, já que não são necessários instrumentos nem cálculos para ter acesso a ele e, aparentemente, basta-nos abrir os olhos e nos deixamos viver para nele penetrar. Contudo, isso não passa de uma falsa aparência."

Merleau-Ponty (Conversas 1948, 2004, p.45)

A evolução do visível valendo-se de um aparato maquínico⁶¹ tem grande avanço a partir da metade do século XIX com a criação do instantâneo fotográfico. Edward James Muggeridge e Jules-Étienne Marey, principais expoentes da captação do movimento por intermédio da fotografia (FABRIS, 2004), estariam entre os precursores de uma busca pela compreensão do movimento por meio da máquina. A fotografia se apresentava assim, desde o início, tendo como um de seus grandes desafios, captar e registrar o movimento dos objetos e seres animados (FABRIS, 2004).

Um dos mais significativos experimentos que alteraram a compreensão do movimento pelo olhar humano foi realizado pelo fotógrafo inglês Muggeridge no ano de 1878. Utilizando simultaneamente doze câmaras alinhadas em paralelo, com fios ligados a baterias elétricas

⁶¹ Termo utilizado pelo Vilém Flusser (2007) para contextualizar a incorporação e interferência da máquina e da técnica na vida humana.

que pontuavam o trajeto percorrido por um cavalo, obteve uma série de negativos gravados após a passagem do animal que rompia os fios acionando os obturadores. O experimento "The Horse in Motion" demonstrou que em determinado momento do trote as quatro patas do cavalo se encontram levantadas do solo, derrubando antigas convenções e contrariando a percepção corriqueira sobre o movimento do animal à época (FABRIS, 2004).

Figura 6-1. *The Horse in Motion*. "Sallie Gardner" by Leland Stanford, 1878.

Fonte :<http://www.loc.gov/pictures/resource/cph.3a45870/>

Outro estudo de grande importância para a compreensão do movimento está relacionado aos experimentos do professor Marey, fisiologista francês responsável pela criação de uma espécie de fuzil cronofotográfico, que permitiu ao ser humano visualizar diferentes formas de locomoção de animais e seres humanos de uma maneira que até então não se poderia compreender. Em 1882, dotado de um cano portado de uma objetiva fotográfica, roldanas, roleta, gatilho e uma placa de vidro recoberta por material sensível, inscrevia, em um segundo, 12 imagens sucessivas do alvo escolhido. O fuzil cronofotográfico de Marey é aplicado aos estudos de movimentos diversos, de homens e mulheres caminhando, correndo, pulando, cavalos galopando, pássaros voando etc. (TERRA, 2002).

Figura 6-2. Cronofotografia em desenvolvimento do processo fotográfico feita por Marey, 1886.

Fonte: BRAUN, 1992⁶², p. 106, *apud* TERRA, 2002, p.17.

Os estudos e experimentos de Muggeridge e Marey alteraram a compreensão humana sobre o movimento - até então fruto da primazia de pintores realistas - com recursos científicos que permitiram a superação da visão retiniana (FABRIS, 2004).

Ainda que o experimento de Muggeridge tenha ganhando maior relevância para a história da fotografia sequencial e ao cinema, o experimento de Marey é um grande precursor dos estudos de análise do movimento. Como coloca Fabris (2004), enquanto à prática Muggeridge proporcionava uma ilusão cinemática, as experiências de Marey reuniam em uma mesma fotografia uma série de imagens sucessivas que representavam as diferentes posições que um ser vivo ocupa durante seu deslocamento no espaço. Marey tenta obter assim a sincronia entre modelos gerados pela sequência de imagens utilizando-se de um traçado gráfico a fim de captar as posições intermediárias dos distintos estágios de movimento. Pessoas inteiramente vestidas de preto, de maneira a se confundirem com o fundo, tinham fitas brancas costuradas ao longo de suas pernas e braços, e pontos metálicos fixados no local de suas articulações. A locomoção dos modelos diante do cronofotógrafo e o registro dos traços representados pelas fitas brancas e pontos metálicos geravam uma espécie de gráfico do movimento dos corpos (MACHADO, 1993).

⁶² BRAUN, M. *Picturing Time: the work of Etienne-Jules Marey (1830-1904)*. Chicago: The University of Chicago Press, 1992.

Figura 6-3. Cronofotografia geométrica parcial. Imagens sucessivas de uma marcha, 1883.

Fonte: MUSÉE MAREY, 1995⁶³, p. 64 *apud* TERRA, 2002, p.19.

A preocupação de Marey é a análise do movimento dos seres vivos, para estudá-los em detalhe e não sua recomposição em uma tela, como será realizado pelo cinema posteriormente. Para Marey, a reprodução das fotografias no tempo de maneira a torná-las animadas não faziam sentido, pois o que elas mostram o olho pode ver diretamente. Para ele o verdadeiro caráter do método científico era superar a insuficiência de nossos sentidos ou a correção de seus erros, acrescentando um poder à visão (MACHADO, 1993).

⁶³ MUSÉE MAREY. *Marey: pionnier de la synthèse du mouvement*. Beaune, 1995.

A técnica de Marey é de grande contribuição para os atuais estudos do movimento humano e, como coloca Machado (1993), o método de Marey para abstrair o movimento de seu suporte material e convertê-lo numa trama de relações gráficas é atualmente utilizado pelos computadores para analisar os movimentos mais finos do corpo humano.

6.2 A VISÃO COMPUTACIONAL

A modelagem e simulação do fluxo de pedestres demandam parâmetros da realidade para que sejam válidos em sua utilização. A calibragem dos modelos está relacionada à observação da realidade em diferentes situações, espaços, lugares e tempos. Nas últimas três décadas a evolução no desenvolvimento dos computadores e a presença cada vez maior de câmeras de vídeo nos espaços públicos e privados ampliaram o desenvolvimento de mecanismos de captação do movimento dos pedestres.

A visão computacional é definida como ciência ou tecnologia relacionada à visão de uma máquina, pela forma como um computador enxerga o meio à sua volta captando imagens e dados multidimensionais por meio de sensores, câmeras de vídeo, *scanners* e outros dispositivos. Abrange uma série de métodos, técnicas, equipamentos e software que possibilitam captar ou adquirir, processar, reconhecer, manipular e analisar os objetos que compõem uma imagem (MILANO, HONORATO, 2010).

A Visão Computacional tem como principal função recriar o sistema de visão humana de maneira a perceber o cenário descrito por esse sistema. A Visão Computacional é também definida como disciplina que "[...] investiga as questões computacionais e algorítmicas associadas à aquisição, ao processamento e à compreensão de imagens". (TRIVEDI; ROSENFELD, 1989⁶⁴ *apud* BIANCHI, 1998, p. 11).

O início da Visão Computacional é relatado em experimentos já na década de 1950, porém a Teoria de Marr, proposta por David Marr em 1982, no livro *Vision* (MOLZ, 2001), foi a primeira a propor uma metodologia para a Visão Computacional sistematizando a abordagem sobre o problema. A partir deste momento outras teorias foram desenvolvidas e

⁶⁴ TRIVEDI, M.M.; ROSENFELD, A. On making computers "See". IEEE transactions on systems, man and cybernetics. v.19, n.6, p.1333-6, Nov. 1989.

serviram de base para o aprimoramento e utilização prática da visão computacional divididos basicamente em quatro paradigmas (BIANCHI, 1998):

- *Visão Ativa*, coloca a visão no controle do processo de aquisição de imagem, definindo a percepção ativa como o estudo da modelagem e das estratégias de controle da percepção;

- *Paradigma Animado*, que coloca como objetivo da visão computacional a resolução de problemas e não a construção de uma representação interna e completa do mundo ou da situação representada;

- *Paradigma Qualitativo*, que enfatiza a não necessidade de que o comportamento represente o mundo tridimensional, possibilitando com isso um melhor desempenho dos sistemas de visão computacional;

- *Paradigma Propositado*, que de certa maneira se apresenta como uma evolução e integração dos três paradigmas anteriores e possui como característica a grande integração com outros sistemas e áreas de inteligência artificial e o foco em soluções de tarefas específicas, e não de uso geral, levando a questões diretamente ligadas à tarefa visual (BIANCHI, 1998).

Ainda que seja alvo de muitas críticas e distintas leituras, a apresentação dos quatro paradigmas citados anteriormente é base para a maior parte dos estudos e aplicações da visão computacional na arquitetura e demais pesquisas atuais.

6.3 VISÃO COMPUTACIONAL E ARQUITETURA DE FLUXOS

Sistemas inteligentes são projetados para dar maior segurança, conforto, desempenho e eficiência energética para edifícios inteligentes⁶⁵. A automação predial tem sido aprimorada pela utilização de dispositivos dotados de sistemas de visão computacional, com sensores térmicos, infravermelho e de movimento, interligados a sistemas que permitem reconhecimento de movimento, face, ou fazem medições de velocidade e percurso valendo-se de algoritmos matemáticos, entre outros.

⁶⁵ Incluímos aqui os edifícios inteligentes, onde grande número de pessoas acessam aviões, trens, metrô ou assistem grandes espetáculos, à *domótica*, relacionada à automação e gestão dos recursos habitacionais.

O comportamento do pedestre em uma multidão é um elemento de grande complexidade para se parametrizar e determinar nos projetos arquitetônicos ou na operação e funcionamento das edificações. Nos últimos anos foram desenvolvidos diversos estudos para definição da dinâmica de pedestres utilizando recursos como modelos contínuos⁶⁶, autômatos celulares, e sistemas multiagentes⁶⁷ (TOYAMA, 2006). Muitos desses estudos utilizam sensores que alimentam um computador ou dispositivo embutido, com algoritmos inteligentes que detectam o fluxo multidirecional dos pedestres pela análise sequencial das imagens digitais (GONÇALVES, 2005). Para a análise dessas imagens, muitas vezes são utilizadas aproximações matemáticas dos sistemas dos organismos biológicos, de maneira a determinar a complexidade dos fatores envolvidos (HARDING, 2008).

Em pesquisa recente na área de sistemas inteligentes, o engenheiro Fábio Aragão da Silva desenvolveu um sistema integrado que compara de maneira direta dados de fluxo de pedestres obtidos por meio de vídeos de situações reais com modelos multiagentes gerados por software de simulação de fluxo de pedestres. Quando o vídeo é processado, um *módulo de comparação* analisa e compara com os dados do modelo de simulação existentes, os dados do vídeo captado. Assim, este *módulo de comparação* "interpreta" os dados com o objetivo de melhorar o modelo multiagentes para que a simulação se aproxime cada vez mais do ambiente real (SILVA, F. 2012).

⁶⁶ Modelos contínuos são muito utilizados para a simulação de dinâmica de fluidos e gases, bem como para o desenvolvimento de modelos para a simulação da dinâmica de pedestres (TOYAMA, 2006).

⁶⁷ Em um modelo multiagente cada pedestre é um agente capaz de realizar ações autônomas e interagir com outros em um ambiente determinado. "Um exemplo dessa capacidade de interação é a competição entre os agentes para ocupar o espaço do agente vizinho. Cada agente tem informações incompletas sobre o ambiente (obstáculos, paredes, etc.), e sobre os problemas de interação (competição, atraso, etc.) que serão enfrentados. Por isto, a modelagem do fluxo de pedestres em termos da interação de agentes autônomos descreve um caminho mais natural na representação do mundo atual. " (SILVA, 2012, p.4).

Figura 6-4. Detecção e análise de pedestres utilizando ferramenta de processamento de vídeo PeTrack.

Fonte: SILVA, F. 2012, p.63.

Observações reais de pedestres são realizadas em experimentos controlados nos quais os obstáculos, a geometria dos espaços e a quantidade de pessoas podem ser alterados, e se possa compreender e captar o movimento de forma precisa e quase automatizada por meio da utilização de software e hardware. No entanto, para que os parâmetros de comportamento dos pedestres sejam mais próximos do real é necessário um grande número de observações e medições de multidões em ambientes reais (BERROU *et al.*, 2007).

Para isso, a utilização de equipamentos de vídeo de pequena dimensão, como câmeras de segurança, tem sido um dos meios mais utilizados na Visão Computacional para captação do movimento de pedestres. Neste sentido, diversas pesquisas estão sendo desenvolvidas de maneira a extrair informações do comportamento do pedestre tanto individualmente como em multidões, de forma a embasar outros projetos, estudos e gerenciamento dos mais diversos espaços arquitetônicos.

Nestas pesquisas e experimentos existe uma divisão entre aqueles que utilizam métodos automáticos de detecção e rastreamento do movimento e aqueles que os fazem de forma manual. Os métodos de automatização são colocados por alguns pesquisadores como excelentes para ambientes de baixa densidade, mas pouco precisos ou com muitos erros quando envolvem multidões (BERROU *et al.*, 2007).

6.4 VISÃO COMPUTACIONAL E FLUXO DE PEDESTRES

Um importante campo de investigação relacionado à Visão Computacional e ao fluxo de pedestres dentro da arquitetura é a Sintaxe Espacial (SE), também conhecido como Análise Sintática do Espaço ou Teoria da Lógica Social do Espaço (PEREIRA, 2011). A linha de pesquisa iniciada no final da década de 70 em Londres pelos pesquisadores Bill Hillier, Julianne Hanson e Bartlett School, constitui-se em um modelo de análise centrado na descrição do espaço e das suas capacidades funcionais (TOMÉ; HEITOR, 2011). Este modelo está relacionado à análise de fenômenos comportamentais humanos, como padrões de interação, movimento e consciência, e aspectos ambientais e econômicos, como densidade dos espaços, das cidades, o uso do solo, valor da terra, do crescimento urbano, diferença social etc.

Conforme definido por Tomé e Heitor (2011) a relevância analítica da sintaxe espacial se assenta numa lógica social do espaço ou

[...] modo como num determinado sistema e segundo uma lógica binária, as conexões entre espaços existem ou não, permitindo ou não, a ocorrência de relações de co-presença e de encontro entre utilizadores. Dessa lógica social são deduzidas as formulações da Sintaxe Espacial metodicamente organizadas segundo representações descritivas e simplificadas dos sistemas espaciais as quais pretendem constituir-se como ferramentas analíticas dos factos concretos e contingentes das relações entre o espaço construído e o seu uso (TOMÉ; HEITOR, p.144, 2011).

A maior parte dos estudos no campo da Sintaxe Espacial é voltada à análise geoespacial, com destaque para a compreensão da distribuição dos fluxos de pessoas sobre as vias, a malha viária e a escala urbana como um todo (PEREIRA, 2011). São poucos os estudos que se utilizam dos conceitos da Sintaxe Espacial para se pensar e analisar a escala da arquitetura, do edifício, dos espaços internos. Em consonância aos objetivos desta pesquisa quanto à compreensão do fluxo de pedestres na escala do edifício, analisamos uma pesquisa desenvolvida por pesquisadores do Instituto Superior Técnico de Lisboa (IST).

Utilizando duas câmeras de vídeo de vigilância com alta resolução (modelo AV5100 da Arecont Vision), instaladas nas paredes internas dos átrios de um edifício do campus do IST, capturaram, durante diversos dias e horários, o movimento dos professores, estudantes e funcionários que circulam por ali diariamente.

A questão inicial da pesquisa era dada a configuração de determinado espaço do edifício universitário, como captar a configuração do movimento. "A possibilidade de visualizar a configuração do movimento permitiria organizar uma tipificação desses movimentos, atendendo à geometria e densidade das trajetórias registradas, fundamentando-se uma classificação sistemática das configurações da mobilidade [...]" (TOMÉ; HEITOR, 2011, p.147).

As pequenas câmeras colocadas em pontos altos do pátio (pé-direito livre de 12 metros) do edifício trouxeram algumas vantagens ao experimento como a possibilidade de observação do comportamento das pessoas de forma não intrusiva; a redução do número de erros pelo fato de a imagem ser captada de grande altura e captar o movimento durante longos períodos sem interrupções.

Para a efetivação da visão computacional no experimento, alguns aspectos técnicos de grande relevância foram adotados, como a utilização de um software específico para determinar o ponto mais vantajoso para se instalar as câmeras (Software *3D World Builder*) e a imagem com resolução de 5 Megapixels, 9 quadros por segundo e transmissão em RGB⁶⁸.

Após a captação da imagem, existe um segundo momento vital à Sintaxe Espacial, o processamento das informações. O grande volume de dados e a extensa análise das relações de uso do espaço e do movimento dos pedestres é o que permite identificar a regularidade no movimento das pessoas, as interações no espaço e entre as pessoas, e os demais fenômenos relacionados a comportamentos específicos. Neste momento, a máquina numérica faz-se essencial e, neste caso, foi feita a utilização de um algoritmo de detecção e seguimento automático (*ArquiTracking*) desenvolvido pelo Instituto de Novas Tecnologias de Lisboa - INOV - para o experimento realizado (TOMÉ; HEITOR, 2011).

Utilizando o algoritmo desenvolvido e o recurso de um software de captação de imagens (software *Recorder*) foi gerado, por meio do processamento das imagens, mapas de ocupação do espaço e mapas de fluxo de pessoas. No mapa de ocupação, em RGB, o vermelho representa o maior tempo de ocupação e o azul o menor tempo. No mapa de fluxos todos os deslocamentos de pessoas são registrados e a sobreposição de percursos geram linhas mais grossas e mais evidentes.

⁶⁸ Red, Green and Blue.

Figura 6-5. Mapas de ocupação por número de pessoas e mapa de fluxos.

Fonte: TOMÉ; HEITOR, 2011, p.155.

Os mapas de ocupação e os mapas de fluxos constituem sínteses da relação entre espaço e movimento, ou dito de outro modo, os mapas constituem descrições do espaço através dos movimentos que o percorrem. Os mapas estatísticos, obtidos pela visão computacional, resultam em efetivas representações de síntese das relações espaço-uso, matematicamente expressas por meios gráficos, onde os fatores não podem ser separados. (TOMÉ; HEITOR, 2011, p.167).

Conforme destacado pelas autoras do estudo, professoras Ana Tomé e Teresa Heitor, os mapas de ocupação e de fluxos possuem princípios distintos de processamento. Os mapas de ocupação são mapas estatísticos que descrevem em termos quantitativos a ocupação do espaço em função do tempo de permanência dos utilizadores e o seu número. Não captam os movimentos de forma individual e sim a síntese do conjunto de movimentos ou da apropriação do espaço em determinado período de tempo, dando uma ideia global da utilização daquele espaço. Já os mapas de fluxos não são estatísticos, são teias obtidas da somatória dos fluxos de cada indivíduo captado. São mapas que permitem captar o comportamento de cada indivíduo de maneira isolada ou na somatória com os demais usuários do espaço.

Além dos mapas, o estudo teve também uma abordagem quantitativa, com gráficos que exibem a evolução dos índices de ocupação do espaço ao longo do tempo, tanto em relação ao total de pessoas quanto ao tempo de permanência (Figura 6-6).

Os mapas de densidade de uso e ocupação, os mapas de fluxos e a análise da evolução dos valores dos índices de ocupação hora a hora possibilitou uma rica compreensão da

dinâmica de mobilidade dos espaços observados. Os picos dos horários de ocupação, as áreas de maior tráfego de pessoas, as áreas com maior tempo de ocupação, os principais eixos de deslocamento etc., são leituras e análises de uso do espaço e do comportamento dos usuários do espaço que não seriam possíveis sem a máquina numérica e a visão computacional.

Ainda que desenvolvido dentro de condições ideais, e de certa forma controladas, como colocam as autoras, os resultados obtidos são promissores e revelam a potencialidade da visão computacional quanto a "[...] uma descrição objetiva, sistemática e quantificada das dinâmicas de mobilidade associadas aos cenários de uso estudados" (TOMÉ; HEITOR, 2011, p.166).

Figura 6-6. Gráfico com variação horária dos valores máximos para os índices de ocupação: tempo e número de pessoas.

Fonte: TOMÉ; HEITOR, 2011, p.162.

Os registros de movimento representados nos dois mapas apresentados, ao mesmo tempo em que permitem uma compreensão dos comportamentos de movimento e ocupação do espaço do coletivo, possibilitam captar o comportamento individual diverso, disperso do coletivo ou da norma do grupo determinante dos padrões de fluxo. As potencialidades para o campo da arquitetura vislumbradas nesta pesquisa quanto à aplicação de métodos semelhantes de análise em áreas de multidão e grande complexidade de uso do espaço como estações metroviárias, terminais de ônibus, aeroportos, estádios de futebol e locais de shows, são enormes.

A relevância da eficiência destes procedimentos de aquisição de dados reside na possibilidade da sua universalização e, conseqüentemente, na disponibilização de um banco partilhável por investigadores. Tal banco, ao permitir a reunião da maior diversidade possível de cenários de uso, e respectivos padrões de mobilidade, constituirá um significativo contributo para o estudo das relações entre a morfologia espacial e a morfologia do movimento (TOMÉ; HEITOR, 2011, p.169).

A evolução dos estudos relacionais entre os espaços, seus usos e os fluxos de pessoas permitirá a determinação de critérios e parâmetros para a concepção arquitetônica de espaços que envolvam grande fluxo de pessoas. Além do programa arquitetônico, das relações de áreas, dos requisitos técnicos e funcionais dos edifícios, os movimentos dos pedestres se tornariam um dos elementos determinantes da configuração desses espaços (TOMÉ; HEITOR, 2011).

7 ESTUDO DE CASO

Esta pesquisa foi desenvolvida basicamente em duas etapas. A complexidade do tema levou, primeiramente, a uma abordagem ampla sobre os conceitos relacionados aos espaços com grande fluxo de pedestres. Valendo-se de uma abrangente revisão da literatura existente sobre o assunto, foi levantada uma série de proposições teóricas e possíveis novas interpretações sobre o tema. Estas proposições trazem aspectos relevantes para o desenvolvimento de um estudo de casos, segunda etapa deste trabalho, onde foram pesquisados e analisados quatro estudos de simulação de fluxo de pedestres realizados recentemente no Brasil.

7.1 OBJETO DE ESTUDO

Inicialmente, no desenvolvimento desta pesquisa, estava prevista a escolha de estudos de simulação de fluxo de pedestres de estações metroferroviária para serem analisadas. No entanto, do levantamento realizado, constatou-se que atualmente no Brasil existem estudos apenas para algumas estações do sistema metroviário da cidade de São Paulo. A CPTM, através de uma licitação pública internacional⁶⁹, objetiva contratar⁷⁰ um serviço de consultoria técnica especializada para a análise do layout de suas estações, com o fornecimento de software para simulação de fluxo de pedestres. Estes estudos, no entanto, ainda não foram desenvolvidos.

A ausência de mais casos relativos a estações metroferroviárias no Brasil levou-nos à busca de outros estudos relacionados à simulação de fluxo de pedestres. O foco foram espaços arquitetônicos onde a questão do fluxo de pedestres fosse de grande relevância para seu funcionamento e para os quais houvesse acesso aos dados de tais estudos, bem como aos técnicos responsáveis por seu desenvolvimento. Este levantamento resultou no estudo de dois estádios de futebol, um complexo esportivo relacionado aos jogos olímpicos de 2016, além da interligação de duas estações metroviárias de São Paulo.

⁶⁹ Licitação Pública Internacional SDP Nº 8601113011 – CPTM. (DIÁRIO OFICIAL DO ESTADO DE SÃO PAULO, 2013).

⁷⁰ A última informação levantada por esta pesquisa referente a esta contratação é do dia 03 de abril de 2013, quando a comissão de licitação do Estado de São Paulo apresentou a classificação final das empresas que participaram do processo licitatório.

O estudo analisou os projetos do Estádio Arena das Dunas em Natal-RN, do Complexo do Parque Olímpico no Rio de Janeiro, do Estádio Mineirão em Belo Horizonte e da interligação das estações Consolação e Paulista do sistema metroviário de São Paulo. Os estudos do estádio Arena das Dunas e do Complexo do Parque Olímpico foram realizados pela *Logit Engenharia Consultiva* utilizando o software *PTC Vissim*. O estudo do Estádio Mineirão foi realizado pela *Modelle Logística e Engenharia* e o estudo da interligação das estações metroviárias Consolação-Paulista foi feito pela *Steer Davies Gleave*, ambos utilizando o software *Legion*.

Os casos apresentados se referem à realidade brasileira, são recentes e pouco estudados. Existe uma grande restrição quanto à publicação de alguns dados e informações, pois os estudos analisados envolvem projetos e obras em andamento, entes públicos e privados, projetistas e construtores. Na tabela a seguir (Tabela 7-1) é apresentado a ficha-síntese dos projetos analisados.

Projeto	Arena das Dunas	Parque Olímpico	Mineirão	Inteligação Paulista-Consolação
Ano de conclusão da construção	2014	2016 (previsão)	2013	2014 (previsão)
Função	Estádio de Futebol	Complexo esportivo	Estádio de Futebol	Estação metroviária
Localização	Natal/RN	Rio de Janeiro/RJ	Belo Horizonte/MG	São Paulo/SP
Custo aproximado	R\$ 423 milhões	R\$ 1,4 bilhão (previsto)	R\$ 695 milhões	R\$ 25 milhões (previsão inicial para solução)
Arquitetura	Projetos: Populous Architects e Grupo Stadia	Projetos da AECOM	Projeto de remodelação: Gustavo Penna Arquiteto & Associados, GMP e BCMF Arquitetos	Projetos da equipe de técnica do Metrô SP
Proprietário	Governo do Estado do Rio Grande do Norte	Governo do Estado do Rio de Janeiro	Governo do Estado de Minas Gerais	Governo do Estado de São Paulo
Administrador	Arena das Dunas Concessão e Eventos S/A	Consórcio formado pela Odebrecht Infraestrutura e as construtoras Carvalho Hosken e Andrade Gutierrez	Consórcio Minas Arena (Construcap, Egesa e Hap)	Metrô / Consórcio ViaQuatro
Área construída (aproximada)	227 mil m ²	1,18 milhão de m ²	349 mil m ²	3 mil m ² (apenas área do túnel de interligação)
Número de usuários previstos	42 mil lugares (Copa) e 32 mil lugares (pós-copa)	120mil pessoas	62 mil no estádio 65 mil na esplanada	Passam pela interligação 240 mil usuários/dia
Consultoria responsável pelo estudo de fluxos	Logit Engenharia Consultiva	Logit Engenharia Consultiva	Modelle Logística e Engenharia	Steer Davies Gleave
Software utilizado	PTC Vissim	PTC Vissim	Legion	Legion
Etapa de realização do estudo de fluxos de pedestres	Em fase de concepção do edifício	Em fase de desenvolvimento dos estudos preliminares	Em fase final de concepção, com edifício em construção	Em edificação existente

Tabela 7-1 Ficha síntese dos projetos analisados no estudo de caso.

Fonte: elaborado pelo autor com base na análise dos estudos apresentados pelas consultorias de cada projeto.

7.2 ABORDAGEM METODOLÓGICA

A análise qualitativa restrita a quatro casos condiz com o objetivo da pesquisa quanto à qualidade e profundidade que os estudos exigem. Uma análise mais ampla e qualitativa foi descartada, pois o número de casos no Brasil ainda é bastante restrito e a diversidade de abordagens, software e espaços arquitetônicos analisados não trariam grande contribuição ao meio científico. A possibilidade de acesso aos profissionais que desenvolveram os estudos foi colocado como fator de maior relevância para a pesquisa pois possibilitaria uma maior compreensão da abordagem, metodologia e complexidade envolvida.

Nos casos apresentados a seguir não estão presentes todos os elementos relativos ao dimensionamento, modelagem e simulação de pedestres dos relatórios desenvolvidos pelas consultorias. Serão apresentados e analisados apenas os elementos mais relevantes à questão da modelagem e simulação de fluxo de pedestres e como estes foram utilizados na concepção de cada edifício relacionado.

Para a realização deste estudo de casos foram realizadas pesquisas bibliográficas e documentais sobre os projetos relacionados. Para o caso da interligação entre as estações Consolação e Paulista também foi efetuado um estudo de campo. Os demais casos não foram estudados *in loco*. Um questionário foi elaborado e serviu de base para reuniões e entrevistas realizadas junto aos consultores responsáveis pelo desenvolvimento dos estudos. Para os estudos do Complexo do Parque Olímpico e para a interligação metroviária agentes relacionados à contratação dos serviços de consultoria também foram entrevistados.

Ainda que a diversidade dos métodos de trabalho de cada uma das consultorias, bem como dos software e edifícios relacionados, representem limitações em uma análise comparativa, buscou-se uma unidade na linha de análise dos referidos casos. Através deste estudo de casos foi possível a compreensão das principais possibilidades, potencialidade e limitações do uso dos software e dos estudos de fluxo de pedestres para a concepção de projetos arquitetônicos que envolvam multidões.

A seguir serão apresentados dados gerais das obras e projetos estudados, bem como imagens, tabelas, desenhos e esquemas de simulação. Alguns vídeos das simulações, realizadas por meio dos software, foram também disponibilizados e serviram de objeto de análise desta pesquisa. Algumas questões embasaram a abordagem dos casos apresentados: o como e o porque do desenvolvimento do estudo de fluxo de pedestres; a forma de elaboração

dos modelos e da simulação; quais os resultados; e os padrões de referências utilizados para avaliar os resultados.

Cada projeto é apresentado individualmente. Primeiro é feita uma apresentação geral do projeto quanto ao seu contexto, obra e características arquitetônicas. Em seguida são apresentados os aspectos mais relevantes relativos ao desenvolvimento do estudo de fluxo de pedestres como: a forma de desenvolvimento dos modelos estático e dinâmico; os software utilizados; as simulação para evacuação e fluxo de pessoas; e o dimensionamento dos espaços e equipamentos relacionados. Ao final da apresentação de cada caso é feita uma análise sobre as alterações e influências que o estudo de fluxo de pedestres trouxe para a concepção arquitetônica.

Ainda que haja distintos métodos para o desenvolvimento de cada processo de modelagem e simulação, existe uma estrutura comum para o desenvolvimento dos estudos. Após a análise dos quatro casos apresentados foi elaborado um fluxograma como referência à abordagem adotada pelas consultorias (Figura 7-1). O objetivo de apresentar o fluxograma a seguir é facilitar a compreensão e análise dos estudos de fluxos de pedestres pesquisados.

Figura 7-1 Fluxograma base para o desenvolvimento dos estudos de modelagem e simulação de fluxo de pedestres.

Fonte: elaborado pelo autor com base na análise dos estudos apresentados.

Um aspectos de grande relevância à simulação de fluxo de pedestres é a estrutura e a forma de funcionamento dos software utilizados. Por este motivo antecede a apresentação de cada caso de estudo a análise dos dois software utilizados pelas consultorias.

Todos as imagens e dados dos estudos foram cedidas pelas consultorias sob autorização de seus clientes. O relatório desenvolvido pela *Steer Davies Gleave*, referente às estações metroviárias de São Paulo, teve restrições de confidencialidade quanto à publicação de imagens, simulações, dados e gráficos. As informações reveladas foram levantadas através das entrevistas e reuniões realizadas junto aos engenheiros do consórcio ViaQuatro e aos técnicos da consultoria.

7.3 SOFTWARE DE SIMULAÇÃO DE PEDESTRE UTILIZADOS

Existe uma série de software desenvolvidos para modelagem e simulação de fluxo de pedestres e, nos quatro estudos de caso aqui analisados, foram utilizados os software Vissim e Legion, que serão apresentados a seguir.

7.3.1 SOFTWARE VISSIM

O VISSIM (*Verkehr In Städten-SIMmulation*) é um software de simulação microscópica utilizado pela empresa Logit Engenharia Consultiva em seus estudos de modelagem e simulação de fluxo de pedestres. O software é desenvolvido pela *PVT Planung Transport Verkehr AG*, grupo alemão que trabalha com inovações e software nas áreas de mobilidade urbana, logística e engenharia de trânsito. O início do desenvolvimento do software aconteceu na Universidade de Karlsruhe, Alemanha, em 1970, mas sua comercialização só aconteceu a partir do ano de 1993 (LLANQUE AYALA, 2013). Para utilização e calibração do software à realidade brasileira, a equipe técnica da Logit trabalhou diretamente com os desenvolvedores da PVT na Alemanha.

O VISSIM possui grande flexibilidade de opções e parâmetros e objetiva a utilização de simulações de pedestres em situações complexas envolvendo grande numero de usuários. O software, além de ser utilizado no estudo de evacuação de edifícios, permite trabalhar com

simulação de deslocamento de pedestres em situações cotidianas em duas e três dimensões, além de possuir módulos para micro-simulação de automóveis.

Forças e comportamento do pedestre

Para a micro-simulação de pedestres o VISSIM parte de um modelo onde três "forças sociais" ditam o comportamento do usuário no espaço arquitetônico (Figura 7-2): uma primeira força funciona de maneira repulsiva aos demais pedestres, fazendo com que cada entidade⁷¹ evite o contato com os demais usuários (*repulsive forces from pedestrians*) ; uma segunda força, também repulsiva, repele os obstáculos existente no espaço arquitetônico, como paredes, vãos, pilares, etc (*repulsive forces from obstacles*); e uma terceira força, força motriz ou direcional, é uma força atrativa que impulsiona a entidade a chegar ao destino determinado (*Driving force to destination*).

Figura 7-2. Diagrama de modelo de forças sociais para dinâmica de pedestres.

Fonte: KRETZ,2011, p.3.

No modelo do VISSIM as forças sociais possuem relação de influência distintas de acordo com a direção do vetor desta força. Por exemplo, uma força que está atrás ou lateral à entidade, possui valor menor de influência do que uma força frontal a essa entidade. Lembrando aqui que o objetivo é simular a realidade e que muitos estudos foram realizados

⁷¹ O termo entidade é comumente utilizado pelos desenvolvedores dos softwares de simulação de pedestres para designar os pedestres da simulação. O termo será adotado com a mesma finalidade quando da descrição dos softwares Vissim e Legion.

com o intuito de chegar-se o mais próximo possível do comportamento humano real (Figura 7-3).

Figura 7-3. Diagrama de assimetria de forças do VISSIM.

Fonte: KRETZ, 2011, p.5.

Para a simulação no VISSIM a construção de um modelo com o desenho dos espaços e obstáculos existentes, bem como a determinação do destino final da entidade gera uma espécie de campo com potenciais de atração. Imaginemos o espaço de uma sala com paredes, divisórias e móveis cujo objetivo da entidade seja sair pela porta que esta à direita da imagem abaixo (Figura 7-4). Os tons mais escuros representam maior força atrativa e determinam o caminho que a entidade tende a percorrer. A variação de resistência que este campo oferecerá à entidade que percorre o espaço estará diretamente relacionada à velocidade da entidade.

Figura 7-4. Diagrama de ambiente arquitetônico com campo das forças de atração.

Fonte: KRETZ, 2011, p.4.

Calibração e Perfil dos pedestres

Para a utilização do software VISSIM no Brasil a *Logit* realizou uma série de estudos e medições em estádios de futebol brasileiros, dentre eles os estádios do Maracanã, do Morumbi, o Mineirão e o Pacaembu. Além das medições em campo foram utilizadas recomendações do *Green Guide*⁷² (2009), guia da FIFA para a concepção dos estádios de futebol da Copa do Mundo.

Os estudos realizados servem de base para a calibração dos modelos. Os principais elementos de desempenho considerados foram a velocidade média do usuário, o fluxo médio, o tempo de evacuação e a densidade média nos espaços. Ainda que se busque o sistema real é importante destacar que o modelo, assim como sua calibragem, está sempre relacionada a uma representação simplificada da realidade.

Na geração dos indivíduos e calibração dos modelos de simulação de pedestres por meio do software VISSIM são utilizados algoritmos genéticos (AG). O algoritmo genético se situa entre os principais elementos que integram os algoritmos evolutivos, métodos desenvolvidos por cientistas da computação nas décadas de 1950 e 1960, que correspondem a um conjunto de métodos de busca, otimização, aprendizagem e modelagem de dados, inspirados na evolução biológica (BENTLEY, 1999⁷³ MARTINO, CELANI, 2012). No VISSIM o AG é um procedimento iterativo que inicia com uma população gerada aleatoriamente. Durante cada geração realizada os indivíduos são avaliados e selecionados segundo o grau de adaptação ao ambiente por meio do AG. O AG funciona como um instrumento de busca e otimização inspirada na teoria da evolução de Darwin, onde a otimização acontece no sentido de selecionar os indivíduos que melhor se comportem em relação à realidade. Ao final do desenvolvimento do modelo a população gerada fornece os parâmetros de calibração que produzem a menor diferença entre as características do fluxo de pedestres observado na realidade e os simulados pelo VISSIM.

⁷² *Green Guide* ou *Guide to Safety at Sports Grounds* é uma publicação do governo do Reino Unido com orientações detalhadas para arquitetos, engenheiros e projetistas a respeito do funcionamento, dimensionamento e organização dos estádios quanto à segurança dos usuários. O guia, mais comumente chamado de "Green Guide", é adotado pela FIFA como padrão para os estádios de futebol para a Copa do Mundo. (DEPARTMENT FOR CULTURE, MEDIA AND SPORT, 2009).

⁷³ BENTLEY, P. J. 1999. *Evolutionary Design by Computers*. San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers Inc.

Após os estudos e a calibração do modelo é realizada a validação do processo, averiguando se de fato o modelo gerado corresponde ao sistema real, ou seja, se o comportamento do pedestre real é igual ou próximo ao simulado pelo software. Com o modelo calibrado e validado pode-se criar uma série de cenários e simulações que serão analisadas com base nos parâmetros da operação em tempo real.

7.3.2 SOFTWARE LEGION

O *Legion* é um software de simulação dinâmica baseado em um modelo multiagente utilizado pelas consultorias Steer Davies Gleave e Modelle Logística e Engenharia para modelagem e simulação de fluxo de pedestres.

A *Legion Limited*, fundada em 1997 na Inglaterra, é uma das empresas líderes no desenvolvimento de software de simulação de pedestres no mundo. Seus estudos e simulações de multidões foram ampliados a partir do ano 2000 quando da modelagem de espaços dos jogos olímpicos de Sydney, Austrália.

O aprimoramento do software e os estudos de comportamento e simulação de pedestres envolveu a coleta de dados em cidades de três continentes, estudos com 9 mil pedestres e mais de mil horas de vídeo (Figura 7-5). Estes estudos permitiram o desenvolvimento de algoritmos para distintas situações e contextos de simulação de pedestres, como para áreas de trabalho, lazer, situações de emergência, etc.

Figura 7-5. Estudos e análise de movimento de pedestres para o aprimoramento do software Legion.

Fonte: COELHO, 2010, p. 3.

Forças e comportamento do pedestre

No *Legion* cada pedestre é modelado como uma entidade - unidade autônoma - bidimensional com formato circular que se move em um espaço contínuo em intervalos de tempo de 0,6 segundos (BERROU *et al.*, 2007). Além do desenho dos espaços arquitetônicos onde serão realizadas as informações, com possibilidade de importação direta de formato CAD, o software permite a modelagem de elementos de circulação como esteiras rolantes, escadas fixas e mecânicas, rampas, elevadores, etc.

Cada entidade se move em direção a um meta estabelecida de maneira a atingi-la com o menor "esforço" possível ou maior satisfação. Este "esforço" é determinado por meio de 3 fatores: *Inconvenience*, *Frustration* e *Discomfort*. O fator *Inconvenience* está relacionado ao esforço físico necessário para se mover entre o local de origem e o local de destino; o fator *Frustration* está relacionado à redução da velocidade da entidade em locais congestionados; e o *Discomfort* está relacionado ao gasto de tempo e deslocamento necessários para superar obstáculos e outros pedestres em seu percurso (Figura 7-6).

Figura 7-6. Diagrama de interações do software Legion relativos a satisfação do pedestre.

Fonte: Manual do Legion Studio 2006 (LEGION, 2006).

As decisões de navegação tomadas pelos pedestres são tomadas em três níveis: estratégica, relacionada à escolha do destino; tática, relativa à macro-navegação; e operacional, relativa à micro-navegação.

A escolha do destino está relacionada a determinação do objetivo do pedestre, como por exemplo, se ele caminhará para a bilheteria ou para os bloqueios, ao adentrar uma estação. Na macro-navegação, com base na geometria do espaço a ser percorrido, a entidade irá encontrar a rota mais curta onde realize o menor esforço possível dentro dos fatores de satisfação apresentados. A micro-navegação está relacionada ao comportamento de cada entidade em mudar sua trajetória devido a circunstâncias específicas como, desviar de obstáculos, evitar áreas mais congestionadas, desviar de outras entidades, etc.

Na micro-navegação observa-se um sistema multiagente, onde cada agente é capaz de realizar ações autônomas e se deslocar de forma multidirecional. Cada agente tem informações incompletas sobre o ambiente e sobre os problemas de interação com as demais entidades, representando assim um comportamento e caminho mais próximo do contexto de um usuário no espaço arquitetônico. Para a determinação desta micro-navegação as entidades se deslocam com base em algoritmos desenvolvidos para melhor se adaptar às circunstâncias locais relativas ao espaço disponível e aos conflitos com as outras entidades (BERROU *et al.*, 2007).

Calibração e Perfil de pedestres

O software *Legion* trabalha com um base de perfis populacionais selecionáveis que variam de acordo com: a região do mundo, como Europa Continental, Inglaterra, EUA, Oriente Médio; contexto ou local, como *indoor*, *outdoor*, calçadas, escadas, plataformas; e tipo de pedestres, como passageiros, espectadores, turistas, etc. Cada perfil é determinado por uma série de parâmetros que incluem:

- a área que cada entidade ocupa, representada por círculos coloridos cuja área se aproxima à de um pedestre real. Aqui as dimensões de cada pedestre representado variam de acordo com uma distribuição pré-determinada e pelo fato de possuírem bagagem ou não;

- a velocidade de livre deslocamento da entidade, representado por seu deslocamento natural caso não houvesse conflito com outros pedestres. A velocidade de deslocamento de cada entidade está relacionada ao tamanho do pedestre, sua idade e se possui ou não bagagem, etc.;

- o espaço pessoal, relacionado à área do entorno de cada entidade, em deslocamento ou parada, em relação aos obstáculos e às outras entidades.

As possibilidades de ajustes e calibração relativas ao comportamento dos pedestres são mais restritas no Legion do que no Vissim. Após selecionar o tipo de pedestre, como turista, passageiros ou espectadores, não existe possibilidade de grandes alterações de seus parâmetros de comportamento. A calibração no caso fica restrita aos ajustes feitos manualmente, como por exemplo a determinação dos locais onde formam mais filas que o modelo sugere, ou velocidades operacionais diferentes do que o modelo pré-determina.

7.4 ESTÁDIO DE FUTEBOL ARENA DAS DUNAS

O Estádio Arena das Dunas, recém construído na cidade de Natal/RN, foi concebido para ser uma das sedes da Copa do Mundo de 2014. Com capacidade para 42 mil espectadores, o estádio sofrerá, após os jogos da Copa, a redução de sua capacidade total para 31.375 pessoas.

Figura 7-7. Maquete eletrônica do projeto do Estádio Arena das Dunas.

Fonte: Arcoweb - Portal de Arquitetura, 2012.

7.4.1 APRESENTAÇÃO GERAL DO PROJETO

O Estádio tem como proprietário o Governo do Estado de Rio Grande do Norte e foi construído por meio de uma Parceria Público-Privada - PPP. É administrado pela Arena das Dunas Concessão e Eventos S/A, Sociedade de Propósito Específico (SPE)⁷⁴ controlada pelo

⁷⁴ Criada por meio da Lei Complementar nº 128/2008 SPE é um modelo de organização empresarial com objetivo específico, podendo em alguns casos ter prazo de existência determinado. É utilizado, entre outros, na formatação das concessões para construção dos estádios de futebol para a Copa do Mundo de futebol no Brasil.

Grupo OAS, responsável pela construção e operação do Estádio por um prazo de 20 anos, em modelo de concessão administrativa. A obra teve 75% de seu valor financiado pelo BNDES e o outros 25% pelo *Grupo OAS*.

Figura 7-8. Corte de maquete eletrônica do Estádio Arena das Dunas.

Fonte: www.blogarcosta.blogspot.com.br, 2012.

A concepção do projeto arquitetônico - projeto básico - foi desenvolvido pela empresa *Populos Architects*, empresa internacional especializada em arquitetura desportiva, com projeto de estádios em diversos países do mundo, como a Austrália, Inglaterra, África do Sul, Estados Unidos, entre outros. O projeto pré-executivo, executivo e a coordenação das engenharias foi feito pelo *Grupo Stadia*, empresa de gerenciamento de projetos de engenharia.

O Estádio e todo seu complexo foi construído em um terreno de 450.000 m² com área construída total de 226.949,89 m². Sua arquitetura é marcada por uma peculiaridade. São como que 20 "pétalas" que envolvem todo estádio, formando suas arquibancadas e cobertura. Entre cada uma dessas pétalas, grandes escadarias levam os pedestres para dentro do estádio.

A obra, com orçamento estimado de 423 milhões de reais, foi construída no mesmo local onde existia o Estádio João Machado, construído entre 1967 e 1972, com projeto do arquiteto Moacyr Gomes e capacidade para 42mil pessoas. Em números o Estádio conta com: 2.617 vagas para automóveis; 40 camarotes; sala de conferências; 2 vestiários; centro de imprensa; 29 espaços com concessão de alimentos e bebidas; arena interna para shows de 3.000 a 4.000 pessoas; 22.000m² de área externa para eventos diversos; escritórios; áreas comerciais; auditório para 250 pessoas; 21 entradas para público; 06 elevadores.

7.4.2 ESTUDO DE FLUXO DE PEDESTRES

A Logit Engenharia Consultiva desenvolveu o estudo de fluxo de multidões para o estádio Arena das Dunas com o objetivo de analisar os tempos de acesso, egresso e de evacuação do edifício. A determinação de um padrão da FIFA para o estádio, a acessibilidade, a segurança, a previsão de grande público, a visibilidade do evento e os altos custos de construção se relacionam e justificam a realização do estudo de fluxo de pedestres.

Os dados de entrada do modelo simulado foram baseados nas previsões de ocupação do estádio já pré determinados. Os parâmetros para o desenvolvimento do estudo foram os requisitos determinados pela Instrução Técnica nº 12/2011⁷⁵ do corpo de bombeiros, o Green Guide, e proposição de soluções que otimizasse os fluxos de pedestres e seus possíveis conflitos dentro da arquitetura projetada. Os dados de saída do modelo são relativos ao atendimento dos espaços e equipamento em relação ao número de espectadores previstos e serão apresentados a seguir.

Foram realizados estudos e simulações para três momentos distintos de utilização do estádio: um para a realização dos jogos da Copa do Mundo, quando o estádio possuirá maior capacidade de espectadores e uma área maior destinada à imprensa; um para o momento pós jogos da Copa, quando o estádio terá reduzida sua capacidade em cerca de 10 mil espectadores, e a área destinada à imprensa; e um estudo para quando da realização de eventos temporários no gramado, como shows e apresentações.

Modelo dinâmico e modelo estático

O estudo desenvolvido pela *Logit* utiliza-se de dois métodos organizados de maneira complementar, sendo um modelo dinâmico e outro estático. No modelo estático, com base nas plantas, cortes e cálculos de todo projeto arquitetônico do estádio, verifica-se o dimensionamento de todas as rotas e espaços de deslocamento dos espectadores e demais usuários, com base nas normas e instruções técnicas.

⁷⁵ CORPO DE BOMBEIROS DA POLÍCIA MILITAR DO ESTADO DE SÃO PAULO (2011)

No modelo dinâmico, utilizando-se do software VISSIM, desenvolve-se uma plataforma virtual com todas as dimensões do estádio projetado e público previsto, onde é simulado o funcionamento do estádio em sua lotação máxima de espectadores. O modelo dinâmico auxilia não só a análise do dimensionamento dos espaços como também os conflitos relacionado ao fluxo de pedestre, e serviu, neste caso, como importante instrumento para as alterações de projeto dos principais espaços de egresso e evacuação do estádio. No modelo dinâmico cada um dos trechos que será percorrido pelos usuários é dotado de informações como velocidade do pedestre, quantidade de pessoas, caminho mais curto, caminhos prováveis, gargalos e barreiras. O comportamento dos usuário no espaço é baseado na análise de uso de outros estádios brasileiros em funcionamento e em uma ferramenta matemática baseada em Algoritmos Genéticos (AG). Utilizando o software VISSIM desenvolve-se um modelo capaz de representar o comportamento do espectadores e simular o fluxo de multidão em dias de jogos.

Evacuação, egresso e fluxo de pessoas

O Estádio Arena das Dunas apresenta basicamente três áreas para espectadores: uma arquibancada superior; uma área de camarote intermediária; e uma arquibancada inferior. Além do público geral, a arquibancada superior abriga a área de imprensa. Na arquibancada inferior estão presentes áreas para o público geral, áreas de público *VIP* e público *hospitalidade*⁷⁶, e espaços para deficientes físicos. No piso intermediário, dos camarotes, temos público *hospitalidade* e público *VVIP*.

Para todas as áreas foram estudadas e simuladas as formas de egresso e evacuação e as rotas de fuga do estádio. Como citado anteriormente, a Instrução Normativa nº 12/2011 e o Green Guide balizaram a definição dos *locais de segurança* (hachurado em verde) e dos *locais de relativa segurança*⁷⁷ do estádio (hachurado em azul) na Figura 7-9.

⁷⁶ A FIFA exige duas áreas de público seletivo nos estádios da Copa, áreas Hospitalidade, VIP e VVIP. Estas áreas possuem suítes, camarotes e estacionamentos e entradas exclusivas.

⁷⁷ Segundo parâmetros da IT12/2011 local de segurança é local fora da edificação no qual as pessoas estão sem o perigo imediato dos efeitos do fogo, e local de relativa segurança é o local, dentro de uma edificação ou estrutura, onde por um período limitado de tempo, as pessoas têm alguma proteção contra os efeitos do fogo e da fumaça. Este local deve possuir resistência ao fogo e elementos construtivos (de acabamento e de revestimento) incombustíveis, proporcionando às pessoas continuarem sua saída para um local de segurança.

Figura 7-9. Corte do estádio com demarcação de áreas de segurança e áreas de segurança relativa.

Fonte: LOGIT, 2012b, p.7.

Adotadas as taxas de fluxo de pessoas por minuto do Green Guide e da Instrução Técnica nº 12/2011 para áreas de escadas, rampas, portas e corredores, são avaliadas todas as áreas e caminhos necessários para o egresso e evacuação de todos os usuários do estádio.

Posteriormente são definidos os elementos mais restritivos para a passagem do espectador, a largura do elemento, a capacidade ou número de pessoas existente naquele local, e o tempo necessário para passar por este espaço ou elemento - escadas, patamares, portas, rampas, corredores, etc. Cada um dos corredores, acessos e saídas são codificados servindo de estrutura para a organização dos cálculos e modelos que são gerados. Na Figura 7-10 podemos observar a codificação do estádio onde os números em verde indicam as escadas de saída para a praça, em roxo as saídas do nível 3 das arquibancadas superiores, e em vermelho os *gangways*⁷⁸ e vomitórios⁷⁹ do nível 1 da arquibancada superior.

⁷⁸ *Gangways* é o termo técnico utilizado para designar as escadas radiais das arquibancadas utilizadas como principal acesso a estes espaços.

⁷⁹ Vomitério é o termo utilizado em projetos de estádios para designar o trecho normalmente plano de saída das áreas de arquibancadas.

Figura 7-10. Planta do estádio com codificação dos acessos.

Fonte: LOGIT, 2012b, p.12.

Realizados os cálculos foram verificados o tempo máximo para evacuação do estádio para cada uma das saídas projetadas, tanto das arquibancadas superiores e inferiores, como para a arquibancada intermediária e camarotes. Conforme a IT 12/2011 - que define tempo máximo de saída de 8 minutos para locais com arquibancadas externas, todos os setores do estádio atenderam às normas, inclusive havendo folga de capacidade em diversos setores.

Utilizando o modelo elaborado no software VISSIM gerou-se um gráfico com a distribuição do tempo de deslocamento dos pedestres em cada um dos setores do estádio (Figura 7-11). O modelo dinâmico permite a facilidade de constatar onde e em que momento os espectadores estão e com isso buscar soluções de projeto que atendam à dinâmica de funcionamento do estádio.

Figura 7-11. Gráfico com tempo de evacuação dos setores do estádio.

Fonte: LOGIT, 2012b, p.15.

Para se calcular o tempo e espaço de cada um dos corredores, portas e áreas de circulação, as áreas de arquibancada são divididas e é calculado o número de espectadores que potencialmente utilizará aquele percurso de saída ou rota de fuga. Na Figura 7-12 podemos observar esquema gráfico do estudo de rota de deslocamento da população das arquibancadas. A arquibancada é dividida em setores C,D e A,B, com pessoas que caminharão respectivamente pelos *gangways* G1 e G2, e posteriormente pelos patamares P1 e P2 e pelo vomitório V12.

Figura 7-12. Esquema gráfico dos setores B11 e B12 do estádio e respectivos túneis de saída.

Fonte: LOGIT, 2012b, p. 22.

Utilizando-se o modelo dinâmico, simulou-se a evacuação das áreas de público geral da arquibancada superior. O tempo total necessário para que todos os espectadores cheguem a um local seguro e a quantidade de espectadores que saem a cada instante, pode ser verificado no gráfico gerado pelo software (Figura 7-13). No momento inicial temos pouco mais de 14mil pessoas na arquibancada e no tempo de 180 segundos a arquibancada tem apenas cerca de 6 mil pessoas. Depois de cerca de 7 minutos ou 420 segundos, temos a arquibancada quase que totalmente esvaziada.

Figura 7-13. Gráfico de tempo de evacuação do público geral da arquibancada superior.

Fonte: LOGIT, 2012b, p.27.

Tempo e dimensionamento para ingresso ao estádio

O tempo de acesso ao estádio é de grande importância para a realização dos jogos e demais eventos. Entre os principais elementos determinantes deste acesso temos: a quantidade e distribuição do local dos bloqueios; a qualidade da comunicação visual para a orientação do usuário; a arquitetura dos espaços de percurso do espectador; as medidas de segurança de controle de acesso e a capacidade de operação dos bloqueios.

O tempo de deslocamento e espera para o espectador realizar o trajeto das áreas de acesso até seu assento são calculados na simulação. Nesta simulação estão inclusas o tempo

de deslocamento nos corredores, rampas, escadas e o tempo das filas formadas nos bloqueios e áreas de inspeção⁸⁰.

O estudo avaliou a capacidade de fluxo de pedestres com base nos bloqueios inicialmente projetados e simulou opções com soluções otimizadas que culminaram, em quase todos os casos, na redução do número de bloqueios inicialmente projetados. Essa redução representa uma economia de custos de equipamento, redução de espaços para bloqueios e melhora na operação do estádio. Para as áreas de controle de acesso, quando da formação de filas, foi adotado como premissa uma ocupação máxima de 2,5 pessoas por metro quadrado. O intuito aqui foi verificar se os espaços projetados no estádio eram suficientes para o acúmulo de pessoas em cada área de controle de acesso.

Além da diretriz de uma acomodação máxima de 2,5 pessoas por m² e premissas de conforto (ou nível de serviço) e segurança, são adotadas taxas de passagem específicas para cada espaço a ser percorrido. Em escadas adotou-se, conforme recomendações da FIFA e do Corpo de Bombeiros, que em cada metro de largura passam 66 pessoas por minuto e em locais planos 82 pessoas por minuto. Essas premissas são incorporadas ao modelo desenvolvido no software VISSIM e servem de base para determinar a velocidade e comportamento dos pedestres na simulação do estádio.

7.4.3 FLUXO DE PEDESTRES E CONCEPÇÃO ARQUITETÔNICA

Através dos cálculos desenvolvidos no modelo estádio e da simulação no modelo dinâmico foi possível verificar folga de capacidade de diversos setores do estádio quanto ao tempo necessário para evacuação. Alguns setores chegaram a ter tempo de evacuação de pouco mais de um minuto e meio, quando a norma exige o máximo de oito minutos. Este fato permitiu repensar o dimensionamento de diversas saídas e corredores. A mais significativa e impactante alteração do projeto foi a redução da largura das plataformas e escadas que saem das arquibancadas superiores e formam os "cortes" nas pétalas da fachada do estádio. As escadas e platôs inicialmente possuíam 3,00m de largura e passaram a ter 2,60m, uma redução de 0,4m de largura nas 20 escadaria que ditam o ritmo da fachada do estádio, o que representou uma redução de custo na construção da ordem de um milhão de reais.

⁸⁰ Os acessos ao estádio incluem portais magnéticos e inspeção de mochilas - Mag and Bags - na expressão em inglês mais correntemente utilizada.

Além disso a simulação permitiu avaliar uma série de locais onde aconteceriam "conflitos" gerados por pedestres caminhando em sentidos opostos ou que se entrecruzassem. Nestes locais foi alterado o desenho dos espaços que mudaram o percurso dos espectadores, reduzindo ou extinguindo zonas de conflito e áreas de formação de filas. Os *gangways*, por exemplo, foram reposicionados de forma a reequilibrar a distribuição dos espectadores pelas saídas projetadas para o estádio. Por meio do modelo dinâmico foi possível visualizar rapidamente a simulação das capacidades e tempo de evacuação das arquibancadas a cada alteração de dimensão e posição dos *gangways*.

Figura 7-14. Simulação da evacuação do público no estádio Arena das Dunas no software VISSIM.

Fonte: LOGIT, 2012b, p.36.

7.5 PARQUE OLÍMPICO DO RIO DE JANEIRO

O Parque Olímpico do Rio de Janeiro é uma das principais instalações esportivas dos Jogos Olímpicos e Paraolímpicos de 2016. Irá atender 15 modalidades olímpicas e 10 modalidades paraolímpicas em uma área total de 1,18 milhão de metros quadrados com investimento previsto de R\$ 1,4 bilhão de reais.

Figura 7-15. Prancha do projeto vencedor do concurso Parque Olímpico da empresa AECOM.

Fonte: Portal IAB-RJ, 2013 - www.iabRJ.org.br.

7.5.1 APRESENTAÇÃO GERAL DO PROJETO

O projeto do Parque Olímpico do Rio de Janeiro prevê como equipamentos permanentes um laboratório de ciência e esporte, pista de atletismo, pavilhão olímpico, centro de mídia e hotel, empreendimentos residenciais, comerciais e de lazer, além de uma extensa área verde. o Parque terá, ainda, a implantação de equipamentos temporários como um centro de hóquei, quadras de tênis e uma vila dos patrocinadores. Na transformação urbana, nesta área da Barra da Tijuca, que antes abrigava o Autódromo de Jacarepaguá, prevê a integração com as novas linhas de BRT⁸¹ Transolímpica e Transcarioca.

O complexo será construído por meio de uma Parceira Público-Privada (PPP), na modalidade concessão administrativa, com prazo de vigência de 15 anos. O responsável pela

⁸¹ BRT - Bus Rapid Transit: Modelo de transporte coletivo de média capacidade realizado por ônibus ou Veículos Leves sobre Pneu (VLP), normalmente articulados, que combina faixa exclusivas de rodagem e estações/plataforma de acesso. Os sistemas mais conhecidos na América Latina envolve a experiência da cidade de Curitiba no Paraná e a cidade de Bogotá na Colômbia.

construção e administração do espaço é um consórcio formado pela Odebrecht Infraestrutura e as construtoras Carvalho Hosken e Andrade Gutierrez.

Para a concepção arquitetônica e urbanística do Plano Geral Urbanístico do Parque Olímpico Rio 2016 o IAB-RJ realizou um concurso internacional de arquitetura no ano de 2011 que teve 60 projetos inscritos com representantes de 18 países. O vencedor do concurso foi o escritório inglês AECOM, empresa de grande porte responsável também pelo projeto do Parque Olímpico de Londres 2012, que teve como responsáveis pela concepção o arquiteto americano Bill Hanway e o arquiteto brasileiro Daniel Gusmão. O júri, formado por 4 arquitetos urbanistas estrangeiros e 3 brasileiros, destacou como qualidades do projeto vencedor, a logística do sistema de transportes, a viabilidade de execução, os acessos separados para público e atletas e o conceito da operação do parque. A grande esplanada do projeto também foi elogiada como espaço adequado para convivência da multidão e para visão de todo parque. A proposta do escritório inglês propõem um adensamento maior das atividades olímpicas e deixará como legado a preservação ambiental da área, a manutenção dos espaços públicos, a preservação da paisagem da região, etc.

Além da concepção do projeto geral do parque olímpico, no início de 2013 foram concluídas as licitações para a contratação das empresas que desenvolverão os projetos básico e executivo do Centro Aquático, Centro de Tênis, Velódromo e Arena de Handebol.

7.5.2 ESTUDO DE FLUXO DE PEDESTRES

Com base no projeto vencedor do concurso internacional a Secretaria Municipal de Transportes do Rio de Janeiro contratou a Logit Engenharia Consultiva para a avaliação dos fluxos de espectadores a partir da microssimulação de fluxos em todo Parque Olímpico.

O objetivo dos estudos de fluxo de pedestres, veículos e transporte público desenvolvido pela Logit é identificar eventuais problemas de operação e circulação de veículos e pessoas, e estabelecer diretrizes e proposições para todo complexo olímpico. Os dados de entrada para o estudo estão baseados na previsão de um público estimado em 120mil pessoas. Com base no calendário da realização do evento foi realizado um estudo do total de espectadores circulando no Parque Olímpico e no Rio Centro ao longo do dia. Além disso a

Secretaria Municipal de Transportes realizou uma série de estudos para prever a quantidade de usuários utilizando os terminais de transporte públicos contemplados.

Neste estudo, as taxas de fluxo de pessoas por minuto e o dimensionamento dos espaços e das saídas de emergência tiveram como parâmetro principal a Instrução Técnica nº 12/2011⁸². Além da norma do corpo de bombeiros foram consultadas normas e referências internacionais como o Green Guide (DEPARTMENT FOR CULTURE, MEDIA AND SPORT, 2009) e a norma 130 da *National Fire Protection Association* (NFPA). Os dados de saída do modelo, apresentados posteriormente, serviram de base para diretrizes e previsões de acesso e utilização dos espaços do evento olímpico.

O Parque Olímpico atenderá, além de uma grande quantidade de veículos particulares em circulação, o fluxo de pedestres advindos do sistema público de transporte representado pelos terminais e estações do BRT local. As estimativas do estudo do plano de transportes realizadas para o Parque Olímpico é que, no momento mais crítico, no período de 1 hora, aproximadamente 50 mil pessoas circularão simultaneamente para acessar ou sair das instalações olímpicas utilizando transporte público.

Para esse estudo a Logit modelou, simulou e analisou o fluxo dos ônibus, do BRT e dos pedestres que se deslocam entre os locais de embarque e desembarque do transporte público e nas entradas das instalações olímpicas. Além do acesso ao Parque Olímpico o estudo contemplou ainda a modelagem e simulação de um terminal para BRT's (Terminal Parque Olímpico), duas estações de ônibus (Estação Rio Centro e Estação Rio 2) e o acesso a um centro de convenções (Rio Centro). Os estudos para estes espaços tem como foco principal a questão do número de bloqueios, os espaços de formação de filas e soluções para conflitos no tráfego de pedestres.

Desenvolvimento do modelo dinâmico

O estudo envolveu a simulação de fluxos de espectadores nos dias críticos por meio de um modelo dinâmico, com parâmetros de nível de serviço esperados e medidas físicas e operacionais necessárias para atender à demanda prevista. Neste caso não foi desenvolvido

⁸² CORPO DE BOMBEIROS DA POLÍCIA MILITAR DO ESTADO DE SÃO PAULO (2011)

um modelo estático. O modelo dinâmico, base das simulações microscópicas, foi desenvolvido por meio do *software* VISSIM e serviu como principal elemento do trabalho desenvolvido pela consultoria. Além da simulação do fluxo de pedestres o modelo desenvolvido envolveu também a microssimulação de veículos visando tanto a interação destes com os pedestres como sua aplicação na engenharia de tráfego e planejamento dos transportes urbanos. Na análise deste estudo focaremos as questões relativas ao fluxo de pedestres, objeto da pesquisa aqui desenvolvida.

No estudo para o Terminal Parque Olímpico, terminal que será construído nas proximidades do Parque Olímpico com 10 baias para BRT's, foram definidos os espaços ocupados por filas com base na previsão de usuários do sistema de transporte e o número de bloqueios previstos. O terminal servirá de acesso tanto ao Rio Centro como ao Parque Olímpico. Para reduzir os espaços de fila, com previsão de ocuparem até 176m² (Tabela 7-2) o estudo sugeriu algumas ações mitigatórias como redefinir o número de bloqueios e alterar alguns elementos no percursos dos pedestres.

Cenário	Sentido	Público	Taxa de passageiro	Catracas	Utilização da cap	Fila total máxima	Área necessária (m2)
Chegadas	Embarque	10.020	820	16	76%	176	70
	Desembarque	24.685	1.200	28	73%	252	101
Saídas	Embarque	25.127	820	40	77%	440	176
	Desembarque	1.134	1.200	4	24%	8	3
Fluxosimultâneo	Embarque	11.749	820	18	80%	234	94
	Desembarque	24.614	1.200	26	79%	312	125

Tabela 7-2. Tabela com resultados do estudo para dimensionamento de bloqueios e espaços de fila.

Fonte: LOGIT, 2012a, p.14.

No estudo para a Estação Rio 2, nas imediações do Parque Olímpico, avaliou as áreas de acesso à estação, o dimensionamento dos percursos dos pedestres e os possíveis conflitos de fluxo. Além do dimensionamento da passarela de acesso à Estação, o estudo simulou o fluxo de pedestre que caminhará em direção ao Parque Olímpico avaliando as dimensões necessários e os gargalos. Os veículos fazem parte do estudo de microssimulação e o dimensionamento das áreas necessárias é apresentado no corte da Avenida Abelardo Bueno (Figura 7-16).

Figura 7-16. Esquema gráfico do estudo de dimensionamento de via na Av. Aberlarado Bueno.
 Fonte: LOGIT, 2012a, p.17.

A Estação Rio Centro, situada na Av. Salvador Allende nas imediações do Rio Centro, teve como foco de estudo o dimensionamento dos bloqueios projetados. O estudo dimensionou um mínimo de 6 bloqueios com necessidade de mudança de direção de operações ao longo do dia de acordo com a demanda simulada. Utilizando-se 8 bloqueios, não seria necessário a mudança de direção de operação pois a demanda máxima na saída do terminal é de 5 bloqueios e de 3 na entrada (Tabela 7-3). Na microsimulação do fluxo de pedestres foi observada a necessidade da implantação de uma passarela de acesso à estação ou possibilidade de travessia em nível.

Cenário	Sentido	Público	Taxa de passageiro	Catracas	Utilização da cap	Fila máx total	Área necessária (m2)
Chegadas	Embarque	1.540	820	3	63%	18	7
	Desembarque	2.584	1.200	3	72%	27	11
Saídas	Embarque	2.613	820	5	64%	30	12
	Desembarque	0	1.200	1	0%	0	0
Fluxosimultâneo	Embarque	2.023	820	3	82%	45	18
	Desembarque	2.278	1.200	3	63%	18	7

Tabela 7-3. Tabela síntese do estudo de dimensionamento de bloqueios da Estação Rio Centro.
 Fonte: LOGIT, 2012a, p.19.

Em relação ao Parque Olímpico o estudo desenvolvido teve como foco principal o acesso ao complexo esportivo pelos espectadores. O projetado da equipe da AECOM prevê duas áreas de acesso com módulos compostos por portais magnéticos e equipamentos de inspeção de mochilas (*Mag* e *Bags*). Entre as duas áreas de acesso está prevista uma área de saída com 128 metros de largura (Figura 7-17).

Figura 7-17. Áreas de acesso e saída do Parque Olímpico.

Fonte: LOGIT, 2012a, p.22.

Acesso, egresso e fluxo de pessoas

O estudo de simulação de pedestres foi desenvolvido inicialmente para cada um dos equipamentos/espacos apresentados anteriormente e depois organizados em uma mesma base, onde se pode avaliar seu funcionamento global durante a realização do evento esportivo. Um quadro de distâncias de caminhada entre os locais de evento e as estações, e o tempo necessário para o deslocamento, tanto em fluxo livre como em fluxo congestionado, foi gerado.

Posteriormente um estudo desenvolvido pela Logit com a distribuição do número de espectadores que acessará a região do complexo esportivo, nos dias do evento, alimentou os dados de entrada do modelo de simulação desenvolvido. Com a distribuição do número de espectadores, ao longo dos dias, foram previstos os horários críticos de acesso e saída dos espaços e, valendo-se desses parâmetros, foi realizada a simulação. Na conclusão do estudo um quadro estabelece a relação entre chegadas e saídas de pedestres no Parque Olímpico e no

Rio Centro com base na origem e destino simulados (Tabela 7-4). Com isso obteve-se a síntese dos momentos e locais mais críticos, tanto em relação a entrada e saída de pedestres, como nos fluxos bidirecionais (sigla BIDI na tabela) .

Local		Data	Chegada			Saída			Total
			Pq. Olímp	Rio Centro	Total IN	Pq. Olímp	Rio Centro	Total OUT	BIDI
Chegadas	Terminal Pq. Olímp.	D03 18:00	19.438	5.247	24.685	6.657	3.363	10.020	34.705
	Condomínio Rio 2	D03 18:00	8.678	2.677	11.355	2.972	1.716	4.688	16.042
	Abelardo Bueno	D03 18:00	347	107	454	119	69	188	642
	Abraão Jabour	D03 18:00	1.041	321	1.363	357	206	563	1.925
	Salvador Allende	D03 18:00	347	107	454	119	69	188	642
	Estação Riocentro	D10 17:45	-	2.584	2.584	-	1.540	1.540	4.124
	Estação Rio 2	D07 18:00	5.040	-	5.040	2.134	-	2.134	7.174
	Total	D03 18:00	34.711	10.708	45.418	11.887	6.864	18.751	64.169
Saídas	Terminal Pq. Olímp.	D06 22:00	605	529	1.134	21.182	3.945	25.127	26.261
	Condomínio Rio 2	D06 22:00	270	270	540	9.456	2.013	11.469	12.009
	Abelardo Bueno	D06 22:00	11	11	22	378	81	459	480
	Abraão Jabour	D06 22:00	32	32	65	1.135	242	1.376	1.441
	Salvador Allende	D06 22:00	11	11	22	378	81	459	480
	Estação Riocentro	D10 22:15	-	0	0	-	2.613	2.613	2.613
	Estação Rio 2	D06 22:00	151	-	151	5.296	-	5.296	5.447
	Total	D06 22:00	1.080	1.080	2.160	37.825	8.052	45.877	48.037
Fluxo simultâneo	Terminal Pq. Olímp.	D05 18:00	19.367	5.247	24.614	7.838	3.910	11.749	36.363
	Condomínio Rio 2	D05 18:00	8.646	2.677	11.323	3.499	1.995	5.494	16.817
	Abelardo Bueno	D05 18:00	346	107	453	140	80	220	673
	Abraão Jabour	D05 18:00	1.038	321	1.359	420	239	659	2.018
	Salvador Allende	D05 18:00	346	107	453	140	80	220	673
	Estação Riocentro	D05 17:45	-	2.278	2.278	-	2.023	2.023	4.301
	Estação Rio 2	D07 18:00	5.040	-	5.040	2.134	-	2.134	7.174
	Total	D05 18:00	34.585	10.708	45.292	13.997	7.980	21.977	67.269

Tabela 7-4. Quadro do volume crítico de pedestres no acessos nos dias do evento esportivo.

Fonte: LOGIT, 2012a, p. 33.

7.5.3 FLUXO DE PEDESTRES E CONCEPÇÃO ARQUITETÔNICA

O estudo foi desenvolvido inicialmente para o detalhamento dos projetos do Parque Olímpico mas, por uma série de fatores e análises posteriores, parte de suas soluções e diretrizes não integrará as futuras obras do Parque Olímpico. O estudo gerou uma série de diretrizes, projetos preliminares e recomendações para a concepção arquitetônica que envolvem o complexo esportivo. Aqui, porém, abordaremos apenas algumas das soluções, onde a simulação de fluxo de pedestres foi fator determinante da concepção arquitetônica.

Com a microssimulação dos veículos e do fluxo de pedestres que se dirigem ao Parque Olímpico desembarcando na Estação Rio 2 foi desenvolvido um estudo preliminar para a concepção de uma passarela e uma rampa para atravessar a avenida, além de determinada a quantidade de bloqueios necessários. Para a concepção da passarela, a alça de acesso de veículos deve ser realocada. Com a simulação foi possível determinar a dimensão mínima da largura das passarelas e o tamanho das filas que se formarão (Figura 7-18).

Figura 7-18. Organização e dimensões sugeridas para a passarela de acesso à Estação Rio 2.

Fonte: LOGIT, 2012a, p. 56.

Para a concepção dos espaços para pedestres a Logit se utilizou de parâmetros de nível de serviço descritos no Highways Capacity Manual (HCM)⁸³. No desenvolvimento de todo estudo foram evitados níveis de serviço E ou F pois estes representam além de pior qualidade e risco aos pedestres, uma redução significativa na velocidade da multidão.

⁸³ O HCM é uma publicação da divisão de pesquisa em transportes da *National Academies of Science* dos Estados Unidos. Ele contém conceitos, diretrizes e procedimentos para calcular a capacidade e qualidade de serviço nas rodovias, avenidas, ruas, bem como no transporte de massa, pedestres, e bicicletas.

NS	Espaço ocupado (m ² /p)	Fluxo (p/min/m)	Velocidade prevista (m/s)	Utilização da capacidade (V/C)
A	11,2	16	1,3	21%
B	5,6	23	1,27	31%
C	3,7	33	1,22	44%
D	2,2	49	1,14	65%
E	1,4	75	0,75	100%
F	0,75	var*	ND	var

*Taxa máxima considerada de 83 pessoas por metro minuto, conforme IT11 do C

Tabela 7-5. Tabela de Nível de serviço segundo o Highways Capacity Manual.

Fonte: LOGIT, 2012a, p. 35.

Valendo-se da simulação de fluxo de pedestres (Figura 7-19) no desenho preliminar das passarelas é apresentada uma série de diretrizes e dimensionamento relativos a distintos trechos do percurso dos pedestres. Para cada trecho é indicada a largura mínima e o nível de serviço atingido em determinada hora do dia. No esquema gráfico apresentado podemos observar que apenas um trecho da passarela apresentará nível de serviço E (passarela que dá acesso ao Condomínio Rio 2) e neste caso é sugerida a alteração de largura de 6,0 m para 7,5m (Figura 7-20).

Figura 7-19. Simulação de fluxo de pedestres no software VISSIM para Estação Rio 2.

Fonte: LOGIT, 2012a, p. 40.

Figura 7-20. Nível de serviço obtidos em horas determinadas com a largura das passagens indicadas.

Fonte: LOGIT, 2012a, p. 40.

Outro local bastante significativo no desenvolvimento do estudo onde a simulação do fluxo de pedestres foi determinante na concepção arquitetônica foi no Terminal Parque Olímpico. A simulação de fluxo de pedestres determinou alteração no leiaute do terminal para facilitar o embarque e desembarque dos usuários do terminal e evitar o conflito dos fluxos. Na imagem da simulação, já com o projeto do espaço alterado, é possível vislumbrar as soluções adotadas (Figura 7-21).

Figura 7-21. Simulação da operação dos bloqueios no Terminal Parque Olímpico.

Fonte: LOGIT, 2012a, p. 59.

A configuração das áreas de formação das filas e o acesso aos bloqueios são feitos de acordo com os estudos de dimensionamento de bloqueios (Figura 7-22). O estudo ressalta que mesmo com as restrições físicas implícitas ao leiaute sugerido seria possível reverter 12 bloqueios de cada setor do total de 70 previstos.

Cenário mínimo (alteração de sentido)	Local	Público eq. 15min pico	Catracas	Utilização da cap.	Espera máx (min)	Fila máx total	Área de fila (m2)
Chegadas/Simultâneo	Desembarque	28.382	30	79%	1	360	144
Chegadas/Simultâneo	Embarque RC	4.410	8	67%	1	56	22
Chegadas/Simultâneo	Embarque PO	8.729	32	33%	0,25	64	26
			70				
Saída	Desembarque	4.536	18	21%	0,25	0	0
Saída	Embarque RC	7.579	12	77%	1	132	53
Saída	Embarque PO	24.914	38	80%	2	494	198

Figura 7-22. Dimensionamento de bloqueios para o Terminal Parque Olímpico.

Fonte: LOGIT, 2012a, p. 47.

7.6 ESTÁDIO DE FUTEBOL MINEIRÃO

O Estádio Governador Magalhães Pinto, popularmente conhecido como Mineirão, foi inaugurado em 1965 na região da Pampulha em Belo Horizonte. Por muito tempo foi o segundo estádio com maior capacidade de público do Brasil, atrás apenas do Maracanã.

Figura 7-23. Maquete eletrônica do projeto do Estádio Mineirão - BCMF Arquitetos.

Fonte: www.minasarena.com.br.

7.6.1 APRESENTAÇÃO GERAL DO PROJETO

Selecionado para sediar a Copa do Mundo de 2014 recebeu um projeto de reforma para adequá-lo aos critérios da FIFA. Ao custo de 695 milhões de reais, a construção e a concessão administrativa do estádio por 27 anos, foi feita por meio de uma parceria público-privada do Governo de Minas Gerais com o consórcio Consórcio Minas Arena S.A., formado pelas construtoras Construcap, Egesa e Hap.

A construção original, em estrutura de concreto armado e volumetria marcante, foi projetada pelos arquitetos Eduardo Mendes Guimarães Júnior e Gaspar Garreto. Na recente reforma do estádio, o escritório brasileiro Gustavo Penna Arquiteto & Associados, juntamente com os escritórios alemães GMP - Von Gerkan, Marg und Partners e SBP - Schlaich, Bergermann und Partners, foram os responsáveis pelo projeto básico. O projeto executivo ficou a cargo do escritório BCMF Arquitetos.

No projeto de reforma do complexo o estádio foi repensado para se tornar uma arena multiuso com espaço para lazer, eventos, shows, lojas e estacionamento. A reforma envolveu, entre outras coisas, o rebaixamento do gramado em 3,5 metros, a redução da capacidade de público de 76 mil para 64 mil lugares, a instalação de 166 amortecedores na parte superior da estrutura, ampliação de camarotes, área de imprensa, etc.

A proposta de ampliar a praça existente no entorno possibilitou a criação de uma grande esplanada com destaque para a vista do conjunto arquitetônico da Pampulha. A construção desta área, com capacidade para mais de 65 mil pessoas, serve de acesso ao estádio, à organização das bilheterias e também à interligação com o ginásio poliesportivo "mineirinho", integrante do complexo.

Com área total de 209.000m², sendo 42.500m² do estádio e 125.000 da esplanada, o estádio possui uma arquibancada inferior com capacidade de 24.694 assentos e uma superior com capacidade de 39.242 assentos. São 98 novos camarotes totalizando 2.024 assentos exclusivos, áreas de cadeira VIP e capacidade para até 2.867 jornalistas, com 1000 mesas de trabalho.

7.6.2 ESTUDO DE FLUXO DE PEDETTES

A consultoria Modelle Logística e Engenharia Limitada juntamente com a Tectran - Técnicos em Transporte Limitada, foram contratadas para desenvolver um estudo sobre a segurança e conforto dos espectadores, com base em análise e simulação de fluxo de pedestres. Para o estudo foram simuladas tanto situações de evacuação de emergência, como situações de acesso e egresso normais, com destaque para o dimensionamento dos espaços, equipamento de controles, corredores e áreas de acesso.

Assim como no caso do Estádio Arenas das Dunas o objetivo deste estudo para a nova remodelação do Estádio Mineirão esta relacionado ao atendimento dos padrões da FIFA para os estádio, a acessibilidade, a previsão de grande público, a segurança, a visibilidade do evento e os altos custos da reforma arquitetônica.

Os dados de entrada do modelo simulado foram baseados nas previsões de ocupação total do estádio. Os parâmetros de dimensionamento e o nível de conforto do usuário adotados seguiram o Green Guide⁸⁴, a Instrução Técnica 37/2010 do Corpo de Bombeiros (CORPO DE BOMBEIROS MILITAR DE MINAS GERAIS, 2010) e a Norma Técnica de Referência em Prevenção Contra Incêndio e Pânico em Estádios da Secretaria Nacional de Segurança Pública (SENASP). Os dados de saída do modelo são relativos ao atendimento dos espaços e equipamentos, em relação ao número de espectadores previstos, e a evacuação e segurança contra incêndio e serão apresentados a seguir.

Modelo estático e modelo dinâmico

O estudo para o Estádio Mineirão foi realizado em momento já avançado das obras e serviu para consolidar e avaliar o projeto e estruturas existentes e avaliar a capacidade dos equipamentos instalados.

A avaliação, quanto à evacuação de emergência teve como referencia inicial o modelo estático, sendo calculada a capacidade de evacuação de cada um dos elementos que compõem os diversos setores do estádio, com dimensionamentos, cálculos, gráficos, etc. Toda a modelagem estática atendeu às normas locais dentro das taxas de passagem determinadas pelo *Green Guide*, principal referência do estudo.

⁸⁴ *Green Guide* ou *Guide to Safety at Sports Grounds* é uma publicação do governo do Reino Unido adotado pela FIFA como diretriz para segurança de todos os estádio da Copa do Mundo de 2014 (DEPARTMENT FOR CULTURE, MEDIA AND SPORT, 2009).

Com a base do modelo estático foi elaborado um modelo dinâmico utilizando o software Legion Studio 2006. A simulação do fluxo de pedestres, por meio do modelo dinâmico, evidenciou alguns conflitos e gerou alterações do. O modelo dinâmico indicou ainda a necessidade de pequenas adequações na largura de alguns *gangways* do nível superior e inferior das arquibancadas. Em relação à modelagem, a Modelle utilizou ainda um método distinto para a previsão de tempos de espera e comportamento das filas. Utilizando o SIMUL8, software de simulação de processos estocásticos, foi possível identificar gargalos, apurar indicadores de desempenho, tempos de espera, comprimentos de fila, etc.

Evacuação, egresso e fluxo de pessoas

O acesso ao Estádio foi um dos elementos de estudo e simulação do fluxo de pedestres. Nos extremos norte e sul da esplanada ficam os principais acessos, onde foram instalados os bloqueios e o direcionamento para a setorização do estádio. A premissa adotada é de que 65% do público acesse pelo norte, devido a maior oferta de transporte público, e 35% pelo sul, pela avenida Presidente Carlos Luz (Figura 7-24).

Figura 7-24. Implantação do estádio com setorização e representação esquemática do fluxo de pedestres
Fonte: MODELLE, 2011, p.8.

O estádio é dividido basicamente em duas grandes áreas: a arquibancada superior e a arquibancada inferior. A arquibancada superior abriga pouco mais de 40mil espectadores e tem como circulação vertical do público 22 escadas radiais e elevadores de apoio. Cada escada atende a um dos 22 eixos de saída ou vomitórios⁸⁵ por onde saem as pessoas do anel superior diretamente para a esplanada, conforme pode ser observado nos desenhos a seguir (Figura 7-25 e Figura 7-26).

Figura 7-25. Eixos de saída da arquibancada superior

Fonte: MODELLE, 2011, p.10.

⁸⁵ Vomitório ou túnel de acesso é um termo utilizado tanto em bibliografias correntes ao tema quanto por parte do corpo de bombeiros brasileiro. Significa nos termos dos mesmos "passagem coberta que interliga as áreas de acomodação de público (arquibancadas) às circulações de saída ou de entrada do recinto"(IT 12/2011 - Corpo de Bombeiros da Polícia Militar do Estado de São Paulo).

Figura 7-26. Circulação vertical da arquibancada superior até o nível 0 da esplanada.

Fonte: MODELLE, 2011, p. 11.

Na arquibancada inferior são 25 mil assentos. As áreas em roxo hachuradas na imagem a seguir (Figura 7-27) são os camarotes hospitalidade, as áreas em azul setores VIP e VIPP, e a hachura cinza publico geral. A arquitetura do estádio permite uma compreensão relativamente simples nos dois níveis de arquibancada, inclusive com semelhanças quanto aos eixos de rota de fuga, com destinação final à esplanada (Figura 7-28).

Figura 7-27. Setores e rotas de saída da arquibancada inferior.

Fonte: MODELLE, 2011, p. 13.

Figura 7-28. Esquema da circulação vertical da rota de fuga da arquibancada inferior.

Fonte: MODELLE, 2011, p. 14.

Quanto à simulação da evacuação, a configuração arquitetônica do estádio facilitou o dimensionamento das rotas de saída e a modelagem como um todo. Não existe combinação de diferentes rotas e o acesso à esplanada, local de segurança, é feito diretamente por corredores de grande porte. No caso de obstrução de alguma rota foram projetados caminhos alternativos melhor observados na simulação dinâmica.

Para o acesso ao estádio trabalhou-se com uma taxa do *Green Guide* que determina o valor máximo para cálculo de pessoas por bloqueio equivalente a 660 pessoas por hora. Foi adotada a determinação do *Green Guide* de que, mesmo em casos de taxas práticas maiores de acesso, o limite de 660 seja respeitado.

Para o estudo foi admitida uma distribuição uniforme do público pelos seis portões de entrada, com 16 bloqueios por portão. Para as rotas de saída de todo Mineirão, incluindo vomitórios (ou eixos de acesso), corredores e escadas, foi adotada a largura mínima de 3,6 metros. Alguns dos *gangways* das arquibancadas inferiores e superiores serão as menores áreas de passagem, com largura de 1,20m, enquanto outros *gangways* terão 1,8m.

Tempo, espaço e simulação

Nos estudos e concepção do estádio do Mineirão a densidade máxima admitida foi de 4 pessoas/m² de área disponível, conforme recomendações do *Green Guide* (2008). O parâmetro adotado pressupõe um limite de acomodação bem superior ao do estádio analisado no capítulo anterior, com previsão de até 2,5 pessoas/m².

Para o cálculo e modelagem do fluxo dos espectadores foram utilizadas no Estádio as recomendações do *Green Guide* (2008). Em superfícies planas são estimados 100 espectadores transitando em 1,20 metros de largura durante o período de um minuto (83 pessoas por metro por minuto). Em superfícies desniveladas, como escadas e rampas, são 79 pessoas em 1,20 metro de largura por minuto (66 pessoas por metro por minuto).

Com base nos parâmetros citados todo estádio foi modelado no software *Legion* e foram feitas simulações do fluxo de pedestres. Nas simulações diferentes cores representam de A à F uma escala de nível de serviço para pedestres conforme a densidade do espaço ocupado (FRUIN, 1971). Esta simulação com as cores é apresentada na imagem abaixo (Figura 7-29) e assim pode-se, rapidamente, observar os pontos mais densos de cada rota de saída. No estudo a consultoria sempre utiliza a rota de saída como o elemento mais restrito ao percurso, de maneira a se evitar que possíveis gargalos sejam ignorados.

Figura 7-29. Nível de serviço nos *gangways* de cada setor da arquibancada inferior.

Fonte: MODELLE, 2011, p. 29.

Quanto à simulação da evacuação destacamos a imagem onde se registra o tempo que cada espectador da arquibancada superior levará para sair do estádio (Figura 7-30). Através destas ferramentas de análise gráfica torna-se mais rápido precisar os locais e caminhos críticos e onde estão as pessoas que levarão mais tempo para chegar a uma área segura do estádio. Além da simulação da saída dos pedestres o software *Legion* gera uma série de gráficos onde pode ser analisado, por exemplo, o número de espectadores dentro do estádio ao longo do tempo de evacuação (Figura 7-31). Vale observar que na simulação para evacuação admitiu-se o tempo máximo de 6 minutos para as áreas comuns e 2,5 minutos para os camarotes. O tempo menor adotado para os camarotes está relacionado ao fato de ser um local fechado e com maior risco de incêndio.

Figura 7-30. Figura 1 - Tempo de evacuação da arquibancada superior.
Fonte: MODELLE, 2011, p. 36.

Figura 7-31. Figura 1 - Gráfico de tempo de evacuação do Estádio.

Fonte: MODELLE, 2011, p. 37.

7.6.3 FLUXO DE PEDESTRES E CONCEPÇÃO ARQUITETÔNICA

A conclusão do estudo do Estádio Mineirão ocorreu já no período final da obra do estádio. Os cálculos, os modelos e a simulação serviram de base para avaliar a segurança do estádio e os níveis de serviço para os espectadores. Serviram, ainda, para a etapa de instalação dos equipamentos finais como bloqueios e portais magnéticos e a decisão sobre os fluxos de acesso e os portões utilizados. O relatório final do estudo de fluxo de pedestres realizado concluiu que o Estádio Mineirão atende às normas do Corpo de Bombeiros e às exigências do *Green Guide*.

Os elementos mais estruturais do projeto, no entanto, não foram alterados. O estudo e a simulação potencialmente trariam algumas soluções distintas em relação a alguns espaços, corredores e elementos arquitetônicos, porém sua realização em fase avançada do projeto, e mesmo da obra, impediu maiores alterações.

7.7 INTERLIGAÇÃO METROVIÁRIA CONSOLAÇÃO-PAULISTA

A interligação entre as estações Paulista e Consolação do sistema metroviário de São Paulo foi inaugurada quando do início da operação da linha 4 - Amarela, em maio de 2010. A estação Consolação foi concluída em 1991 e tornou-se o ponto de integração entre a linha 2 - verde e a linha 4. Desde o início da operação da nova linha o túnel que funciona como

interligação entre as duas estações apresenta alguns problemas operacionais devido à alta demanda de passageiros.

Figura 7-32. Fotografia do túnel de interligação entre as estações Consolação e Paulista.

Fonte: PINHO, 2013.

7.7.1 APRESENTAÇÃO GERAL DO PROJETO

A linha 4 - amarela - do sistema metroviário de São Paulo foi concebida por meio de uma Parceria Público-Privada - PPP entre o Governo do Estado de São Paulo e o Consórcio ViaQuatro. Após a construção o consórcio tornou-se responsável, através de um regime de concessão de 30 anos, pela operação e manutenção de toda linha. Até o momento a concessionária investiu US\$ 450 milhões em equipamentos, trens e sistemas, e deve investir mais de US\$ 2 bilhões até o fim do processo de concessão.

Atualmente a linha Amarela opera próxima a 700 mil passageiros/dia com pico de até 750 mil passageiros/dia. A previsão, segundo técnicos da própria ViaQuatro, é que com a inauguração das estações intermediárias da linha e sua extensão até a Vila Sônia, o número de passageiros atendidos por dia chegue a 1 milhão.

A linha Amarela foi desenvolvido com alguns elementos diferenciados em relação a tecnologia de operação, dos trens e do funcionamento do sistema: todos os trens operam sem

condutor (*sistema driverless*); os trens são internamente interligados entre si; o sistema *driverless* permite *headways* de até 75 segundos; a conexão de energia que alimenta os trens é feito por catenárias, e não por um terceiro trilho, o que permite aos usuários caminhar pelos trilhos caso haja algum acidente; em todas as plataformas da linha existem portas automáticas que evitam o acesso à via; as escadas rolantes das estações operam de acordo com a demanda, onde caso não haja ninguém utilizando-a, operam em velocidade reduzida.

Dentro deste contexto está situada a estação Paulista da linha Amarela e sua conexão com a estação Consolação. A interligação entre as duas estações possui pouco mais de 200 metros de comprimento. Neste trajeto o passageiro, que sai do mezanino da estação Paulista, percorre um trecho plano até chegar a um ponto com três escadas rolantes, um elevador e uma escada fixa que contorna o elevador. Após atravessar este trecho chega a um túnel com inclinação pouco menor que 5%. Este túnel é dotado de três linhas de esteiras rolantes e um corredor e ao seu final está a plataforma de embarque da estação Consolação.

Inúmeras reportagens apontam problemas na operação e funcionamento dos túneis (RIBEIRO, COSTA, 2012; PINHO, 2013). Nos horários de pico, devido ao excesso de passageiros e por motivo de segurança, as esteiras do túnel são desligadas. Segundo reportagem do jornal Estado de São Paulo (RIBEIRO, COSTA, 2012), com base em informações da concessionária, 240mil pessoas, ou 80% das pessoas que utilizam a estação Paulista, passam diariamente pelo túnel de interligação das estações. Parte do problema de lotação da estação e do túnel está no fato da estação ter sido projetada para receber 145 mil usuários/dia e hoje ter uma demanda de 300 mil usuários/dia. (RIBEIRO, COSTA, 2012

Ainda que haja grandes discussões e controversas sobre a capacidade do túnel, ora citado como funcionando além de sua capacidade, ora com uma demanda muito maior do que a prevista, o Consórcio ViaQuatro contratou uma consultoria para realizar um estudo de simulação do fluxo de pedestres para buscar uma solução ao problema.

7.7.2 ESTUDO DE FLUXO DE PEDESTRES

A consultoria Steer Davies Gleave (SDG) foi contratada pelo consórcio ViaQuatro para a realizar estudos sobre alguns gargalos crônicos existentes na operação da linha 4 - amarela. O trabalho foi desenvolvido por um custo aproximado de 80 mil reais e envolveu

quatro pontos específicos de operação da linha: a modelagem e simulação da interligação das Estações Consolação e Paulista, bem como a apresentação de soluções técnicas; um estudo sobre o acúmulo de usuários nos bloqueios de acesso da Estação Butantã; um estudo sobre o acúmulo de usuários nos bloqueios de acesso da Estação Faria Lima; e um estudo sobre a circulação entre pavimentos na Estação Pinheiros.

Com base no modelo dinâmico, desenvolvido para o problema de acúmulo dos bloqueios das estações Faria Lima e Butantã, chegou-se à diretriz de que os bloqueios deveriam ter sua capacidade de operação aumentada, dos atuais 12 usuários por minutos para 15 usuários por minuto. Em relação ao estudo de fluxos entre os pavimentos na Estação Pinheiros a proposta apresentada acrescentaria mais 8 escadas rolantes à estação. Dos quatro pontos apresentados o que apresentou maior complexidade e que iremos tratar aqui, com maior profundidade, é o relativo à interligação das estações Paulista - Consolação.

O objetivo do desenvolvimento deste estudo de fluxo de pedestres é apresentar uma solução para o gargalo existente no túnel de interligação entre as duas estações. É importante salientar que o contrato de operação da linha amarela prevê que 20% da receita do consórcio está relacionada aos índices de qualidade da operação, e neste ponto, o nível de satisfação dos usuários faz parte da avaliação.

Desenvolvimento do modelo dinâmico

Para a realização do estudo a SDG desenvolveu um modelo dinâmico utilizando o software Legion. Os dados de entrada para o modelo tiveram por base um levantamento feito pelos técnicos da ViaQuatro com o objetivo de mapear a quantidade e os fluxos de pedestres entre as estações ao longo de todo dia. Os parâmetros de desenvolvimento do modelo seguem os níveis de serviço adotados nos projetos do Metrô, apresentados anteriormente, e o comportamento de pedestres simulado por um perfil pré-determinado do software Legion.

Com os desenhos dos projetos arquitetônicos das estações em base CAD e as informações do levantamento de campo, os técnicos da SDG desenvolvem, dentro da plataforma do Legion, uma espécie de mapa de origem e destino dos passageiros dentro da estação. Para cada trecho de deslocamento são acrescentados dados ao modelo. Por exemplo, quando um passageiro sai do trem na estação já é acrescentado no modelo a porcentagem dos passageiros que utilizarão a escada fixa ou a escada rolante.

Desenvolvido o modelo dinâmico, com dados de entrada relativos ao número e frequência de passageiros já determinados, inicia-se a simulação. Primeiramente são feitos ajustes ao modelo, que é calibrados com base na experiência dos técnicos da operação das estações e com a observação do comportamento dos pedestres *in loco*. Posteriormente são feitas alterações no modelo em busca de uma melhor solução, como, por exemplo, a retirada das esteiras rolantes ou acréscimo de um segundo túnel de interligação.

Todas as alterações no modelo são simuladas em busca de uma solução que se apresente como a mais viável do ponto de vista técnico e econômico. Além da possibilidade da análise da simulação do fluxo de pedestres em tempo real, o modelo gera automaticamente alguns gráficos que identificam os pontos de congestionamento e gargalos, como no exemplo de simulação de uma outra estação metroviária no software Legion (Figura 7-33).

Figura 7-33. Simulação de estação metroviária e análise de congestionamentos no software Legion.
Fonte: COELHO, 2010, p. 8.

7.7.3 FLUXO DE PEDESTRES E CONCEPÇÃO ARQUITETÔNICA

No desenvolvimento deste estudo a modelagem e simulação do fluxo de pedestres é base para as soluções arquitetônicas que visam a solução do problema de congestionamento de passageiros na interligação das estações.

Na apresentação dos estudos, os técnicos da ViaQuatro, discutiram a solução apontada, até então, como a mais adequada: a construção de um túnel paralelo ao existente no trecho após o final da rampa de interligação das estações e a retirada de duas das linhas de esteiras rolantes. Nesta solução o passageiro que estiver se deslocando da estação Consolação para a estação Paulista irá, após descer o trecho inclinado, entrar à direita em um novo túnel no patamar que fica pouco antes das escadas rolantes. Este túnel se conectará à entrada da Estação Paulista em trecho anterior ao mezanino.

Ainda que o estudo não tenha sido dado como definitivo, bem como os custos e projetos para sua execução não tenham sido finalizados, o presidente do Metrô, Luiz Antonio Carvalho Pacheco, afirmou, em recente entrevista ao jornal O Estado de São Paulo, que a obra deverá ser iniciada em 2014 e que sua complexidade envolve escavar um túnel em local de difícil acesso e entre as duas estações em operação (VALLE, 2013).

Infelizmente, a indefinição sobre as intervenções a serem realizadas e sobre quem será o responsável pela obra, impediu que os estudos e relatórios relativos ao modelo e às simulações desenvolvidos, fossem aqui publicados e analisados em maior profundidade.

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

No desenvolvimento desta pesquisa foi realizado um percurso, um deslocamento no espaço-tempo onde se procurou discutir as implicações de se pensar a arquitetura a partir do corpo em movimento, do fluxo de pedestres, do deslocamento de um conjunto de singularidades, a multidão.

A motivação talvez venha da necessidade de dar uma melhor resposta ao corpo, limitado de seus movimentos, confinado em meio às dificuldades de se deslocar na metrópole. A busca por mais conforto, por segurança, maior mobilidade e acessibilidade, sugere grandes desafios aos arquitetos, aos engenheiros e aos projetistas envolvidos na concepção de espaços que envolvem multidões.

Inicialmente, neste percurso, contextualizamos o tema da pesquisa no meio e sociedade em que existimos. Se o corpo com a máquina se desloca de forma diferente do que o corpo sem a máquina, e a velocidade do deslocar-se no espaço se torna uma questão do engenho humano, o espaço e o tempo deixam de ser aspectos entrelaçados e indistinguíveis na experiência da vida cotidiana.

No início do século XX em muitas cidades do mundo, a existência de sistemas de transporte sobre trilhos, caracterizado principalmente pelos bondes e trens, colocava os trabalhadores, em tempos de passagens baratas, em pé de igualdade com aqueles que podiam dar-se ao luxo de possuir veículos particulares. Neste momento talvez as diferentes *classes de velocidade* não eram assim tão diferentes e a relação espaço-tempo ainda era apenas uma referência para os estudos da Teoria da Relatividade de Einstein.

No contemporâneo a fluidez de uma sociedade líquida, do tempo ditado pela técnica, encontra resistência em um tempo lento, das longas durações da história. O *homem lento* de Milton Santos parece uma utopia já sem espaço para ser vivida e a aceleração de Paul Virilio, um vislumbre exacerbado sobre a velocidade de um mundo irreal. O contraponto e equilíbrio entre estes pensadores talvez esteja em se apropriar das técnicas e, com elas, ressignificar os lugares, criando novos espaços, e tempos, para o corpo, para o humano.

Posteriormente a pesquisa aborda alguns elementos e discussões contemporâneas da arquitetura, de uma arquitetura da era digital, onde, como coloca Greg Lynn, o cérebro com o computadores funciona de forma diferente do que o cérebro sem os computadores. Marcos Novak, Greg Lynn e Lars Spuybroek (Grupo Nox) trazem reflexões importantes para se pensar a sociedade atual, onde novas formas de se conceber a arquitetura, por meio de ferramentas digitais, integram o pensamento de um arquitetura líquida, uma arquitetura que aborda uma outra relação entre o espaço e o tempo.

Na utilização das novas tecnologias, das partículas utilizadas por Greg Lynn no conceitual projeto de uma estação de ônibus às potencialidades vislumbradas nos software de modelagem e simulação, um processo de sedução. A máquina numérica, na expressão

utilizada por Flusser, se configura como um elemento determinante no pensamento e na concepção da arquitetura contemporânea e sua utilização deve ser ampla e constantemente discutida. Paul Virilio nos traz um questionamento que vai para além de uma rápida visão da utilização dos computadores nos processos projetuais: ocorre atualmente, na construção das técnicas, um conjunto de mutações espaciais e temporais que reorganizam incessantemente, no campo do cotidiano, as representações estéticas do território contemporâneo, e essas mutações devem ser pensadas constantemente.

Em seguida, chegamos ao objeto central do percurso da pesquisa: a arquitetura das estações metroferroviárias. Diversos conceitos e parâmetros são levantados em uma abordagem sistêmica sobre as estações. Diretrizes sobre dimensionamento, padrões de lotação e nível de conforto são apresentadas e analisadas.

O transporte na Região Metropolitana de São Paulo é referência para a pesquisa. Na quinta maior aglomeração urbana do mundo, os sistemas de transporte de alta capacidade contabilizam diariamente mais de 7,2 milhões de usuários. São Paulo possui o sistema metroviário mais denso do mundo. Os corpos estão unidos não por que assim desejam. As pessoas deixam de se movimentar não porque querem.

Tendo como motivo da viagem o trabalho, o estudo ou lazer, pessoas de diferentes classes sociais se dirigem todos os dias às estações metroferroviárias, ponto de acesso aos sistemas de transporte para milhões de passageiros que se deslocam diariamente em todo mundo. As diferenças de tamanho, de velocidade e mobilidade de cada um dos passageiros deve ser pensada para cada estação metroferroviária. Cada estação deve ser pensada e concebida como única, em sua singularidade, em seu lugar, em seu ambiente, para seus passageiros. Assim se tornará um ponto específico no mapa e formará um conjunto coerente, uma rede, articulada às demais. Assim poderá atender melhor aos anseios da multidão, do conjunto de pessoas, que às utiliza diariamente.

Projetar a complexidade da multidão, em sua diversidade e velocidades, deslocando-se com base no tempo de entrada e saída dos trens das estações e limitadas pelos espaços arquitetônicos ou pelos componentes de processamento, como escadas rolantes, bloqueios, etc., exige uma abordagem complexa e apurada e, neste contexto, o desenvolvimento de modelos matemáticos configura-se como uma estratégia efetiva para a busca de melhores soluções na concepção destes espaços. Da contextualização do objeto inicial da pesquisa caminhamos para o estudo de formas e meios de abordá-lo. Aqui a modelagem e a simulação do comportamento humano, da multidão, do pedestre, são apontadas como meio para se pensar novas soluções, novas arquiteturas.

Duas pesquisas apresentadas desenvolvem, através de abordagens metodológicas distintas, modelos e simulações de estações metroferroviárias. Daamen desenvolve um modelo microscópico bastante complexo e rebuscado, utilizando um software em desenvolvimento. Guazzelli desenvolve um modelo mesoscópico utilizando um software de automação já consolidado. A reflexão sobre ambos os estudos nos leva a conclusão de que

antes do desenvolvimento de cada modelo deve-se ter claro sua finalidade e as potencialidade de seu uso. A abordagem mesoscópica de Guazzelli poderia rapidamente ser utilizada para um estudo que envolvesse diretrizes preliminares para o desenvolvimento de toda uma rede de transportes ou mesmo a pré-concepção e dimensionamento das estações. A abordagem microscópica de Daamen exige maior tempo e quantidade de informações e mostra-se mais efetiva na especificidade da arquitetura, da pequena escala, do desenho das estações.

Da complexidade relacionada ao tema, envolvendo inclusive o desenvolvimento de algoritmos e software específicos, chegamos a um problema de grande relevância ao desenvolvimento e aplicabilidade dos modelos de simulação: sua calibração e validação. Neste trecho do percurso a pesquisa abre como que uma pequena fresta para abordar um tema um tanto amplo, a visão computacional. A visão computacional tende a ser cada vez mais difundida, seja pelo aprimoramento das técnicas de reconhecimento dos padrões de movimento e pela redução do custo dos dispositivos, seja pela necessidade cada vez maior de compreensão de fenômenos complexos envolvendo multidões.

Aqui a abordagem arquitetônica sobre o campo de pesquisa da visão computacional leva-nos ao estabelecimento de um paralelo entre os estudos de Cronofotografia de Marey e uma pesquisa sobre Sintaxe Espacial. Enquanto na cronofotografia desenvolve-se uma espécie de gráfico ou imagem que sintetiza no tempo o movimento de uma pessoa ou de um corpo, o experimento de sintaxe visual dos pesquisadores do Instituto Superior Técnico de Lisboa apresenta gráficos que registram no tempo o movimento de diversas pessoas, o movimento de um coletivo de singularidades, captados e processados por máquinas numéricas.

A Visão Computacional configura-se como uma grande potencialidade para a calibração dos modelos e para se pensar a arquitetura a partir do movimento das pessoas no espaço. Além da interferência na concepção arquitetônica, com a instantaneidade da percepção do movimento, poderíamos ter novas formas de funcionamento das estações e de edifícios inteligentes (domótica). Filmadoras captariam o aumento do número de usuários do espaço e computadores processariam as imagens. Mecanismos automáticos poderiam, por exemplo, acionar às escadas rolantes para operar de forma mais rápida ou mais lenta, e as divisórias e balizadores de fluxos poderiam ser deslocados, reduzindo ou aumentando o espaço para circulação, de acordo com a demanda existente.

Na Visão Computacional existe, ainda, mais um elemento conceitual a ser abordado. Na construção da imagem existe uma ampliação do espectro do visível e uma imensa influência no processo criativo. Esta influência está relacionada à decomposição dos fenômenos em conceitos ou em números, o que permite na arquitetura o desenvolvimento de modelos onde são relacionados aspectos complexos de nossos meios, seja ele o vento, a chuva, ou o movimento do corpo e das multidões. A utilização da máquina numérica no processo de decomposição destes fenômenos, no entanto, está sujeito a falhas. A utilização de modelos irrealistas ou com erros pode nos induzir a diretrizes incorretas. Seja para a concepção arquitetônica ou de equipamentos a autonomia da máquina deve ser constantemente avaliada, sob risco de que desastres ocorram.

O percurso da pesquisa encerra-se na apresentação de um estudo de caso que aborda quatro projetos de espaços de multidão onde foram realizados estudos de fluxo de pedestres. Se no início do desenvolvimento desta pesquisa em 2011, os estudos de simulação de pedestres eram ainda incipientes no Brasil ou voltados apenas para a questão da evacuação dos edifícios e a segurança, atualmente este espectro foi bastante ampliado, com estudos sobre estádios, terminais de transporte, eventos e complexos esportivos.

A necessidade da modelagem e simulação para a concepção arquitetônica destes espaços está relacionada ao alto custo de sua construção, à complexidade de se pensar espaços para multidão que serão esvaziados ou ocupados rapidamente, e à novos padrões de segurança ou de nível de serviço. Os estudos de caso evidenciam os problemas relacionados à falta de simulação prévia e à potencialidade da modelagem, simulação e calibragem na concepção dos edifícios. O problema apresentado no estudo do metrô de São Paulo, por exemplo, poderia ter sido evitada e seu gasto reduzido. Nos estudos para os estádios e no parque olímpico a simulação da maior precisão aos projetistas sobre a segurança dos edifícios e permite soluções tecnicamente mais robustas e ousadas no que diz respeito a concepção dos espaços e equipamentos relacionados ao fluxo de pedestres.

Chegamos às considerações finais deste trabalho. Sem a pretensão de ser exaustivo ou esgotar o assunto, buscou-se desenvolver uma pesquisa de caráter abrangente, conceitual e qualitativa ao tema da modelagem e simulação de fluxo de pedestres. Não se revela ao seu final uma descoberta ou invenção. Vislumbra-se uma série de proposições e reflexões relacionados a um processo de concepção onde a arquitetura é pensada como um elemento dinâmico.

Em uma cenário de revolução tecnológica concentrada nas tecnologias da informação que alteram a base material da sociedade em ritmo acelerado, o estado líquido das relações e formas e a supremacia da velocidade e dos sistemas de transferência, parecem confluir em intervenção arquitetônicas desenvolvidas com base em dispositivos maquínicos, abordados na complexidade da visão sistêmica de um paradigma digital.

Os conceitos e argumentos sobre a técnica e a aceleração foram apresentados na sutileza da dúvida e da complexidade do tema - ora valorizando o que se perde, ora saudando o que se ganha com a velocidade, com a aceleração do tempo por meio da técnica humana. Ainda que tomado o partido pela velocidade, pela máquina, pelos computadores, procuramos ter sempre em mente o impacto que a liquidação dos valores tradicionais do tempo da história, da lentidão, do mundo analógico/mecânico, da percepção humana, trazem para nossa existência.

Por fim, visando contribuir com o pensamento arquitetônico e com o desenvolvimento de futuras pesquisas, levantamos uma hipótese: de que a utilização do fluxo das pessoas como paradigma para concepção do espaço possa gerar novas formas e diretrizes para a arquitetura. Estas "novas" formas, de maior complexidade, só seriam possíveis graças à utilização da tecnologia digital atrelada à modelagem, à simulação, à visão computacional e à fabricação

digital. Na arquitetura fluída os espaços serão gerados a partir do fluxo das pessoas. Uma arquitetura parametrizada pelos corpos em movimento, pela diversidade e singularidades de cada pessoa em meio a multidão.

Enfim, uma indagação para concluir o percurso: Porque na concepção arquitetônica o movimento do corpo ainda é relegado a um papel secundário? ou como diria Paul Valery sobre a arquitetura, se "existimos, movemo-nos, vivemos na obra de um homem!"

9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 14021 - Transporte - Acessibilidade no sistema de trem urbano ou metropolitano**. 2005. Disponível em: <http://www.pessoacomdeficiencia.gov.br/app/sites/default/files/arquivos/%5Bfield_generico_imagens-filefield-description%5D_11.pdf>. Acesso em: 14 mar. 2013.

AUGÉ, Marc. **Não Lugares: introdução a uma antropologia da supermodernidade**. Campinas, Papirus, 1994.

AGÊNCIA ESTADO. **Metrô de SP é o mais lotado do mundo, afirma CoMET**. O Estado de São Paulo, São Paulo, 08 set. 2008. Disponível em: <<http://www.estadao.com.br/noticias/geral,metro-de-sp-e-o-mais-lotado-do-mundo-afirma-comet,237729,0.htm>>. Acesso em: 02 fev. 2012.

AKASHI, Alexandre. **Trens das linhas ouro e prata do Metrô serão de alumínio**. Revista Alauto, São Paulo, 1º trimestre de 2013. Disponível em: <<http://www.abal.org.br/aluauto/ed32/PDFs/transportes.pdf>>. Acesso em: 11 dez. 2013.

ARIOTTI, Paula *et. al.* **Associação de modelos macroscópicos e microscópicos de tráfego para estudo de circulação**. In: Anais do XVIII Congresso de pesquisa e ensino em transporte - ANPET. Florianópolis, 2004. p. 478-489. Disponível em: <http://www.cbtu.gov.br/estudos/pesquisa/anpet_xviiiCongrpesqens/ac/arq45.pdf>. Acesso em: 15 nov. 2013.

AZEVEDO, Ricardo Marques de. **Uma idéia de metrópole no século XIX**. Rev. bras. Hist. [online]. 1998, vol. 18, n. 35, p. 165-183. ISSN 1806-9347. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S0102-01881998000100007>>. Acesso em: 15 mai 2013.

BARBON, Lilian Patrícia. **Da cronofotografia aos efeitos divisionistas das performances digitais**. Anais do VI Ciclo de Investigações do PPGAV-UDESC COM{FLUÊNCIAS}. Florianópolis: 2011. Disponível em: <<http://ppgav.ceart.udesc.br/ciclo6/artigo17.pdf>>. Acesso em: 15 nov. 2013.

BATISTA, Luciana Teixeira. **O processo de projeto na era digital: um novo deslocamento da prática profissional**. 2010. Dissertação (Mestrado). Escola de Arquitetura, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010. Disponível em: <www.bibliotecadigital.ufmg.br/dspace/bitstream/handle/1843/RAAO-8CDKUT/luciana_teixeira.pdf?sequence=1>. Acesso em: 07 out. 2012.

BAUMAN, Zygmunt. **Modernidade líquida**. Rio de Janeiro: Ed. Jorge Zahar, 2001.

BENJAMIN, Walter. **Charles Baudelaire: um lírico no auge do capitalismo**. São Paulo: Brasiliense, 1989.

BERROU *et al.* **Calibration and validation of the Legion simulation model using empirical data. Pedestrian and evacuation dynamics**. 2005, Part 3, Springer. Berlin: Heidelberg, 2007, p. 167-181. Disponível em: <<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.127.559&rep=rep1&type=pdf>>. Acesso em: 15 July 2013.

BIANCHI, Reinaldo Augusto da Costa. **Uma arquitetura de controle distribuída para um sistema de visão computacional propositada**. 1998. Dissertação (Mestrado em Sistemas Eletrônicos) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3142/tde-10122004-222058/>>. Acesso em: 10 mai 2013.

BICHO, Alessandro de Lima. **Da modelagem de plantas à dinâmica de multidões: um modelo de animação comportamental bio-inspirado**. 2009. Tese de Doutorado, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2009.

BRANDÃO, Ludmila. **O "camelódromo", a cidade e os fluxos globais subalternos**. Revista do Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo., v. 25. p. 232-251, São Paulo, 2009.

CARNEIRO, Lílían de Oliveira. **Simulação de evacuação de multidão por autômato celular. Estudo de caso em um estádio de futebol**. 2012. Dissertação de Mestrado. Departamento de Computação, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2012. Disponível em: <http://mdcc.ufc.br/teses/doc_download/175->. Acesso em: 12 set. 2013.

CASTELLS, Manuel. **A sociedade em rede: economia, sociedade e cultura**. São Paulo: Editora Paz e Terra, 2010.

COELHO, Rodrigo Sirio. **Legion: pedestrian simulation technology**. Belo Horizonte: 2010.

CORPO DE BOMBEIROS DA POLÍCIA MILITAR DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Instrução Técnica Nº 12: Centros esportivos e de exibição – requisitos de segurança contra incêndio**. São Paulo, 2011.

CORPO DE BOMBEIROS MILITAR DE MINAS GERAIS. **Instrução Técnica Nº 37: Centros esportivos e de exibição – requisitos de segurança contra incêndio e pânico**. Belo Horizonte, 2010. Disponível em: <<http://bombeiros.mg.gov.br/images/stories/dat/it%2037.pdf>>. Acesso em: 15 ago. 2013.

COMPANHIA PAULISTA DE TRENS METROPOLITANOS (CPTM). **Projeto funcional: modernização da malha da CPTM**. São Paulo, 2003.

CRUZ, Elaine Patricia. **Metrô de São Paulo ainda é o mais lotado do mundo**. Agência Brasil - Empresa Brasil de Comunicação, Brasília, 23 de abril de 2011. Disponível em: <<http://agenciabrasil.ebc.com.br/noticia/2011-04-23/metro-de-sao-paulo-ainda-e-mais-lotado-do-mundo>>. Acesso em 21 fev. 2012.

DAAMEN, Winnie; HOORGENDOORN, Serge Paul. 2003. **Research on pedestrian traffic flow in Netherlands**. In: Proceedings Walk 21 IV (p. 101-117). Portland, Oregon, United States: Walk 21 Conference. Disponível em: <http://www.transport.citg.tudelft.nl/fileadmin/Faculteit/CiTG/Over_de_faculteit/Afdelingen/Afdeling_Transport_en_Planning/Traffic_management_and_traffic_flow_theory/Dynamisch_Verkeers_Management/Special_Projects/Pedestrians/Publications/doc/Walk21_04.pdf>. Acesso em: 13 mai 2013.

DAAMEN, Winnie *et. al.* **Modelling pedestrian in transfer station**. Delft: Delft University Press, 2001. Disponível em: <<http://repository.tudelft.nl/search/ir/?q=Modelling+Pedestrian+in+Transfer+Station&faculty=&department=&type=&year=>>>. Acesso em: 13 may 2013.

DAAMEN, Winnie. **Modelling passenger flows in public transport facilities**. 2004. Tese de Doutorado. Faculdade de Engenharia Civil e Geociências, Departamento de Planejamento e Transporte, Delft University Press, Delft, 2004. Disponível em: <<http://repository.tudelft.nl/view/ir/uuid%3Ae65fb66c-1e55-4e63-8c49-5199d40f60e1/>>. Acesso em: 15 oct. 2012.

DELEUZE, Gilles; GUATARRI, Félix. **Mil Platôs: capitalismo e esquizofrenia**. São Paulo: Ed. 34, vol. 4. 1997.

DEPARTMENT FOR CULTURE, MEDIA AND SPORT. **Guide to Safety at Sports Grounds - Green Guide**. SGSA. Inglaterra, 2009.

DE VLEESHAL. Ana Maria Tavares. **Middelburg airport lounge with parede Niemeyer**. Vleeshal, 2001. Disponível em: <<http://vleeshal.nl/en/tentoonstellingen/ana-maria-tavares-middelburg-airport-lounge-with-parede-niemeyer>>. Acesso em: 12 dec. 2013.

DIÁRIO OFICIAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. São Paulo: DOSP. 03 de abril de 2013.

EDWARDS, Brian. **The modern station: new approaches to railway architecture**. Londres: E & FN *sponsor*, 1997.

EMPRESA PAULISTA DE PLANEJAMENTO METROPOLITANO (EMPLASA). **Rede urbana e regionalização do Estado de São Paulo**. – São Paulo: EMLASA, 2011. Disponível em: <http://www.emplasa.sp.gov.br/emplasa/ProjetosEstudos/Relatorios/Livro_miolo%20em%20baixa.pdf>. Acesso em: 15 dez. 2013.

FABRIS, Annateresa. **A captação do movimento: do instantâneo ao fotodinamismo**. São Paulo: Ars, v. 2, n. 4, p. 50-77, 2004. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/ars/v2n4/05.pdf>>. Acesso em: 10 nov. 2013.

FERNANDES, Bruno Ribeiro. **Transformações das estações ferroviárias com o advento da integração com a rede do metrô em São Paulo**. 2012. Tese de Doutorado em Projeto de Arquitetura - Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/16/16138/tde-03072012-152042/>>. Acesso em: 04 abr. 2013.

FISCHER, Lígia Catarina *et al.* **Avaliação sistemática - elemento chave na gestão de fluxo**. In: 18ª Semana de Tecnologia Metroferroviária, 2012, São Paulo. 18ª Semana de Tecnologia Metroferroviária. São Paulo: Associação dos Engenheiros e Arquitetos de Metrô, 2012. v. 1. p. 1-10. Disponível em: <<http://biblioteca.aeamesp.org.br/smns/18smtf120912t08.pdf>>. Acesso em: 17 out. 2012.

FISCHER, Lígia Catarina. **A implantação de comércio e serviços em estações de transporte de alta capacidade: um estudo sobre a adequação de estações metroviárias à luz dos resultados da avaliação pós-ocupação**. 2013. Dissertação de Mestrado em Tecnologia de Arquitetura - Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

FLORIO, Wilson. **O uso de ferramentas de modelagem vetorial na concepção de uma arquitetura de formas complexas**. 2005. Tese de Doutorado – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

FOLHA DE SÃO PAULO. **Não foi 'geração espontânea', diz Alckmin sobre tumulto no metrô**. São Paulo: 06 fev. 2014. Cad. C, p.3.

FLUSSER, Vilém. **O mundo codificado: por uma filosofia da comunicação**. Rafael Cardoso (Org.). Raquel Abi-Sâmara (Trad.). São Paulo: Cosac Naify, 2007.

FRUIN, John J. **Pedestrian planning and design**. New York: Metropolitan Association of Urban Designers and Environmental Planners, 1971.

FTA (Federal Transit Administration). **Transit capacity and quality of service manual**. 2ª ed. Washington: Transportation Research Board, 2003.

GALLO, Ricardo. **Linha mais cheia do Metrô só terá alívio em 2015, diz diretor**. Folha de São Paulo. São Paulo: 09 fev. 2014. Cad. C, p.5.

GIROTO, Ivo Renato. **Arquitetura para a multidão: explosão demográfica na arquitetura de Fábio Penteado**. In: 9º Seminário Docomomo Brasil, Brasília, 2011. Disponível em: <www.docmomobsb.org>. Acesso em: 13 mai 2013.

GONÇALVES, P. H. **Estimação do fluxo multidirecional de pedestres em ambientes abertos e não restritos, pela análise de sequências de imagens digitais**. 2005. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18133/tde-02092006-132813/>. Acesso em: 21 set. 2012.

GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Metrô (Cia do Metropolitano de São Paulo)**. Disponível em: <http://www.saopaulo.sp.gov.br/orgaos/empresas_metro>. Acesso em: 12 dez. 2013

GRILLO, Antonio Carlos Dutra; CRUZ JUNIOR, Adilson Assis. **Arquitetura líquida**. In: I ENANPARQ - Encontro Nacional de Pós-Graduação e Pesquisa em Arquitetura e Urbanismo, 2010, Rio de Janeiro. Rio de Janeiro: PROURB, 2010. v. CD-ROM. p. 1-17. Disponível em: <http://www.anparq.org.br/dvd-enanparq/simposios/186/186-832-1-SP.pdf>. Acesso em: 15 set. 2013.

GUALDA, Nicolau Dionísio Fares. **Terminais de transporte: contribuição ao planejamento e ao dimensionamento operacional**. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1995.

GUAZZELLI, Cauê Sauter. **Contribuição ao dimensionamento e à avaliação operacional de terminais urbanos de passageiros metroviários e ferroviários**. 2011. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2011. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3138/tde-05082011-153908/>. Acesso em: abr. 2012.

HARDING, P. J. **Evacuation modelling and people dynamics**, 2008. Disponível em: <http://www2.docm.mmu.ac.uk/STAFF/P.Harding/>. Acesso em: Aug. 2012.

HARVEY, David. **Condição pós-moderna**. São Paulo: Edição Loyola, 1999.

HEITOR, Teresa, TOMÉ, Ana. **Can mobility flow analysis improve informal learning processes in traditional education establishments?** In: 7th Space Syntax International Symposium. Estocolmo, Suécia: 2009. p. 040:1-040:13. Disponível em:

<http://www.sss7.org/Proceedings/09%20New%20Modes%20of%20Modelling%20and%20Methodological%20Development/040_Heitor_Tome.pdf>. Acesso em: 31 june 2013.

HELBING, Dirk, JOHANSSON, Anders. **Pedestrian, crowd and evacuation dynamics**. 2008. Disponível em: <<http://www.springerreference.com/docs/html/chapterdbid/60554.html;jsessionid=7A8314E20E7BBCD0C867CA8927D598EB>>. Acesso em: 12 june 2012.

INOVAÇÃO TECNOLÓGICA. **Trem de ferro começa a virar trem de plástico**. São Paulo, de 19 jun. 2012. Disponível em: <<http://www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/noticia.php?artigo=trem-ferro-comeca-virar-trem-plastico>>. Acesso em 22 nov. 2013.

ISODA, Marcos Kiyoto de Tani e. **Transporte sobre trilhos na Região Metropolitana de São Paulo: estudo sobre a concepção e inserção das redes de transporte de alta capacidade**. 2013. Dissertação de Mestrado em Planejamento Urbano e Regional - Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/16/16139/tde-29072013-095552/>>. Acesso em: 3 jan. 2014.

IZIDORO, Alencar. **Metrô de SP vai aumentar a velocidade de escada rolante: estações terão novos equipamentos de 15% a 50% mais rápidos que os atuais**. Folha de São Paulo, São Paulo, 20 set. 2009. Cad. C, p.1.

KANDEE, Somruedee. **Intermodal concept in railway station design**. Bangkok University, Bangkok, v.3, nº 1, jan-jun., 2004. Disponível em: <http://www.bu.ac.th/knowledgecenter/epaper/jan_june2004/somruedee.pdf>. Acesso em: 13 dez.13.

KOLAREVIC, Branko. **Architecture in the digital age: design and manufacturing**. New York; London: Taylor & Francis, 2009.

KRETZ, Tobias. **Pedestrian Simulation with VISSIM**. PTV Planung Transport Verkehr AG. Karlsruhe: 2011.

LACOMBE, Octavio. **Diagramas digitais: pensamento e gênese da arquitetura mediada por tecnologias numéricas**. 2006. Tese de Doutorado em Projeto, Espaço e Cultura - Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/16/16136/tde-09082006-143023/>>. Acesso em: 6 jan. 2012.

LEGION. **Help system Legion Studio 2006**. Londres: 2006.

LLANQUE AYALA, Rosemary Janneth. **Procedimento para identificação dos principais parâmetros dos microssimuladores a serem considerados no processo de calibração**.

2013. Dissertação de Mestrado em Transportes, Universidade de Brasília, Brasília, 2013. Disponível em: <<http://repositorio.unb.br/handle/10482/13892>>. Acesso em: 21 jul. 2013.

LOBO, Renato. **Até 2020 deve mais que dobrar número de passageiros transportados pelo Metrô e CPTM**. Portal Via Trólebus, São Paulo, 28 out. 2013. Disponível em: <<http://viatrolebus.com.br/2013/10/ate-2020-deve-mais-que-dobrar-numero-de-passageiros-transportados-pelo-metro-e-cptm/>>. Acesso em: 05 dez. 2013.

LOPES, Renata Kintschner. **Relações e influências da aplicação da acústica no processo de projeto de arquitetura contemporânea**. 2010. Dissertação de Mestrado - Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2010. Disponível em: <<http://www.bibliotecadigital.unicamp.br/document/?code=000771433>>. Acesso em: 20 jul. 2012.

LYNN, Greg. **Animate form**. Nova York: Princeton University Press, 1999.

LOGIT. **Plano para a Zona Barra durante os Jogos Olímpicos e Paraolímpicos de 2016**. Relatório Final - Rev.3. São Paulo: 08 jan. 2012a.

_____. **Arena das Dunas: fluxo de multidões**. Relatório de fluxo de multidões - R01. São Paulo: 07 dez. 2012b.

MACHADO, Arlindo. **Anamorfoses cronotópicas ou a quarta dimensão da imagem**. In: PARENTE, André (Org.). *Imagem-Máquina: a era das tecnologias do virtual*. Rio de Janeiro: Editora 34, 1993.

MARTINS, Lucas dos Reis. **Massa e humanização, de Canetti a Sloterdijk**. 2009. Dissertação de Mestrado em Filosofia. Instituto de Filosofia e Ciências Humanas da Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2009.

MARTINO, Jarryer Andrade de, CELANI, Gabriela. **O Algoritmo Evolutivo como método projetual**. In: Congresso de La Sociedad Iberoamericana de Gráfica Digital Sigradi, 2012, Fortaleza: Universidade Federal do Ceará, 2012. p. 570-574.

MELLO, B. A. 2007. **Modelagem e simulação de sistemas**. Erechim-RS: Departamento de Engenharias e Ciência da Computação. Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões. Disponível em: <<http://www.munif.com.br/munif2/arquivos/ap-sim.pdf?id=319>>. Acesso em: Ago. 2012.

MERLEAU-PONTY, Maurice. **Conversas, 1948**. São Paulo: Editora Martins Fontes, 2004.

_____. **Fenomenologia da percepção**. São Paulo: Martins Fontes, 1994.

METRÔ (Companhia do Metropolitano de São Paulo). **Capacidade do transporte urbano de passageiros sobre trilhos**. São Paulo: Documento Técnico. Diretoria de Operação. 2005.

_____. **Diretrizes para elaboração de projeto de arquitetura**. Documento São Paulo. Documento Técnico. Departamento de Concepção de Arquitetura – CIA 2008.

_____. **Relatório da Administração 2011**. São Paulo: 2012. Disponível em: <<http://www.metro.sp.gov.br/metro/institucional/pdf/rel-administracao.pdf>>. Acesso em: 10 out. 2012.

MILANO, Danilo de; HONORATO, Luciano Barrozo. **Visão computacional**. Limeira: Faculdade de Tecnologia - Universidade Estadual de Campinas, 2010. Disponível em: <http://www.ft.unicamp.br/liag/wp/monografias/monografias/2010_IA_FT_UNICAMP_visa_oComputacional.pdf>. Acesso em: 20 jul. 2013.

MODELLE. **Análise do fluxo de multidões: Estádio Governador Magalhães Pinto - Mineirão**. Relatório de fluxo de multidões - Rev.03. Belo Horizonte: dezembro, 2011.

MOLZ, Rolf Fredi. **Uma metodologia para o desenvolvimento de aplicações de visão computacional utilizando um projeto conjunto de hardware e software**. 2001. Tese de Doutorado em Ciência da Computação - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/2783/000326081.pdf?sequence=1>>. Acesso em 7 jan. 2013.

MUMFORD, L. **A cidade na história: suas origens, transformações e perspectivas**. 4ª ed. São Paulo: Martins Fontes, 1998.

NATIVIDADE, Verônica Gomes. **Fraturas metodológicas nas arquiteturas digitais**. 2010. Dissertação (Mestrado em Projeto de Arquitetura) - Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010. Disponível em: <www.teses.usp.br/teses/disponiveis/16/16138/tde-16062010-153027>. Acesso em: 15 nov. 2011.

NEGRI, Antonio; HARDT, Michael. **Multidão: guerra e democracia na era do império**. São Paulo: Multitude, 2010.

NOVAK, Marcos. **Transarquitetura e o transmoderno**. São Paulo: Projeto Brasmitte, 1999. Disponível em: <<http://www.sescsp.org.br>>. Acesso em: 20 fev. 2012.

O ESTADO DE SÃO PAULO. **Metrô de SP é o mais lotado do mundo**. São Paulo, 9 de abr. 2011. Disponível em: <<http://www.estadao.com.br/noticias/impresso,metro-de-sp-e-o-mais-lotado-do-mundo,703954,0.htm>>. Acesso em: 20 out. 2012.

_____. **Lotado, metrô bate recorde de passageiros**. São Paulo, 11 de set. 2012. Disponível em: <<http://blogs.estadao.com.br/jt-cidades/lotado-metro-bate-recorde-de-passageiros/>>. Acesso em: 20 out. 2012.

OLIVEIRA, Marina Rodrigues, FABRICIO, Márcio Minto. **Modelos físicos e virtuais como ferramentas do ensino de projeto de arquitetura: relato de uma vivência**. In: SIGRADI - Congress of Iberoamerican Society of Digital Graphics, 2009, São Paulo. Disponível em: <www.arquitetura.eesc.usp.br/pesquisa/grupos/arquitec/.../Artigo_Sigradi.pdf>. Acesso em 12 ago. 2010.

ONO, Rosaria. **O impacto do método de dimensionamento das saídas de emergência sobre o projeto arquitetônico de edifícios altos: uma análise crítica e proposta de aprimoramento**. 2010. Tese de Livre Docência em Segurança Contra Incêndio - Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/livredocencia/16/tde-24022011-140224/>>. Acesso em: 26 set. 2012..

OXMAN, Rivka. **Theory and design in the first digital age**. Design Studies vol. 27, 2006. p. 229-265. Disponível em: <http://www.technion.ac.il/~rivkao/topics/publications/Oxman_2006_DeStudies.pdf>. Acesso em: 15 oct. 2012.

PEIXOTO, Nelson Brissac. **A cidade e sua história**. In: Intervenções urbanas: Arte/Cidade. PEIXOTO, Nelson Brissac (org.). São Paulo: Editora SENAC, 2002. p. 96-121.

PEREIRA, Elvis. **Trânsito: passado, presente e futuro**. Folha de São Paulo, São Paulo, 17 nov. 2013. Revista São Paulo, p. 22-33.

PEREIRA, Rafael Henrique Moraes. *et al.* **O uso da sintaxe espacial na análise do desempenho do transporte urbano: limites e potencialidades**. Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada - IPEA, junho de 2011. Disponível em: <http://www.ipea.gov.br/portal/images/stories/PDFs/TDs/td_1630.pdf>. Acesso em 21 nov. 2013.

PINHO, Marcio. **Metrô diz que ligação entre Paulista e Consolação não atingiu superlotação**. Portal G1. São Paulo: 05 de set. 2013. Disponível em: <http://g1.globo.com/sao-paulo/noticia/2013/09/metro-diz-que-ligacao-entre-paulista-e-consolacao-nao-atingiu-superlotacao.html>. Acesso em: 15 out. 2013.

REICHEN, Bernard. **Mobilité et grands ensembles: d'un urbanisme de zones à un urbanisme de flux.** Revue Urbanisme nº 347. Paris: Publications d'architecture et d'urbanisme, mar/abril 2006. Disponível em: <<http://www.urbanisme.fr/issue/report.php?code=347>>. Acesso em: 15 août 2013.

RIBEIRO, Bruno; COSTA, Nataly. **Lotação da Estação Paulista já supera, proporcionalmente, a da Sé.** Agência Estado. São Paulo: 26 de abr. 2012. Disponível em: <<http://www.estadao.com.br/noticias/cidades,lotacao-da-estacao-paulista-ja-supera-proporcionalmente-a-da-se,865819,0.htm>>. Acesso em: 20 out. 2012

ROCHEFORT, Michel. **Redes e sistemas: ensinando sobre o urbano e a região.** São Paulo: Hucitec, 1998.

ROVIRIEGO, Lucas Fernando Vaquero; SILVA, Vitor Borges da.; SILVA; Antônio Nélon Rodrigues da. **Explorando recursos de um SIG-T para avaliação do layout de terminais de transporte.** In: *Anais do XVIII Congresso de pesquisa e ensino em transporte - ANPET*. Florianópolis, 2004. p. 1225-1236. Disponível em: <http://www.cbtu.gov.br/estudos/pesquisa/anpet_xviiiCongrpesqens/ac/arq109.pdf>. Acesso em: 10 nov. 2013.

SANTOS, Milton. **Por um espaço transformador.** Revista AU. São Paulo: PINI. nº 21, ano 5, dez.1988 - jan. 1989. p. 87-89.

_____. **A natureza do espaço: técnica e tempo, razão e emoção.** 4ª ed. São Paulo: Edusp, 2003.

SERRA, G. Geraldo. **Pesquisa em arquitetura e urbanismo: guia prático para o trabalho de pesquisadores em pós-graduação.** São Paulo: Edusp: Mandarin, 2006.

SGUIZZARDI, Silvio. **Modelando o futuro: a evolução do uso de tecnologias digitais no desenvolvimento de projetos de arquitetura.** 2011. Dissertação de Mestrado em Tecnologia da Arquitetura - Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011. Disponível em: <www.teses.usp.br/teses/disponiveis/16/16132/tde-26012012-153604>. Acesso em: 5 jan. 2012.

SILVA, Fábio Aragão. **Simulação multiagentes e visão computacional modelando o fluxo de pedestres.** 2012. Dissertação de Mestrado. Engenharia da Informação. Universidade Federal do ABC, Santo André, 2012.

SILVA, Marcos Solon Kretli. **TRANSmuseus entre, através e além dos espaços expositivos: a arquitetura museológica contemporânea e sua relação com a cidade, a arte e as novas mídias.** 2012. (Relatório de pesquisa de Pós-Doutorado). Escola de Comunicação e Artes, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012. Disponível em:

<<http://www3.eca.usp.br/sites/default/files/webform/projetos/pos-doc/MSKS.pdf>>. Acesso em: 9 jul 2013.

SILVA, Tatiane Cazarin da. **Simulações computacionais aplicadas ao processo de evacuação de ambientes: uma análise comparativa de variantes geométricas via autômatos celulares bidimensionais**. 2012. Dissertação de Mestrado - Departamento de Matemática, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2012. Disponível em: <<http://www.ppgmne.ufpr.br/arquivos/diss/260.pdf>>. Acesso em: 12 dez. 2013.

SOLA-MORALES, Ignasi. **Diferencias, topografía de la arquitectura contemporánea**. Barcelona: Gustavo Gili, 2003.

SORT, Jordi Julià. **Redes metropolitanas**. Barcelona: Gustavo Gili, 2006.

SPERLING, David Moreno. **Arquiteturas contínuas e topologia: similaridades em processo**. 2003. Dissertação de Mestrado em Tecnologia do Ambiente Construído - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18131/tde-28032006-155803/>>. Acesso em: 16 set. 2013.

SPUYBROEK, Lars. **NOX: Machining architecture**. London: Thames & Hudson, 2004.

TERRA, Ulisses Demarchi Silva *et al.* **Modelagem por partículas em engenharia, arquitetura e construção**. In: Congresso de La Sociedad Iberoamericana de Gráfica Digital Sigradi, 2012, Fortaleza: Universidade Federal do Ceará, 2012. p. 405-409.

TERRA, Vinicius Demarchi Silva. **Pedaços do tempo, gestos partidos: memórias do corpo em movimento na fotografia de Étienne-Jules Marey**. 2002. Dissertação de Mestrado - Faculdade de Educação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2002. Disponível em: <<http://www.bibliotecadigital.unicamp.br/document/?code=vtls000265181&fd=y>>. Acesso em: 7 jul. 2012.

TOMÉ, Ana, HEITOR, Teresa. **Para um método de análise espaço-uso – uma abordagem sintática**. CAMPINAS: PARC: Pesquisa em Arquitetura e Construção, v.2 - nº 7, p.142. 2011. Disponível em: <<http://www.fec.unicamp.br/~parc/vol2-n7.htm>>. Acesso em: 15 mai 2013.

TOYAMA, M. C. **Uma abordagem multiagentes para dinâmica de pedestres**. 2006. Dissertação de Mestrado, Instituto de Informática, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2006. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/8125?show=ful>>. Acesso em: 22 out. 2012.

UETA, Paulo Seiti, FERREIRA, Francisco de Assis Paulino. **Simulação macroscópica e simulação microscópica da Copa do Mundo 2014**. 19º Congresso Brasileiro de Transporte Trânsito. Brasília, 2013. Disponível em: <http://www.antp.org.br/_5dotSystem/download/dcmDocument/2013/10/06/8AF2728A-0A48-4DBC-8238-4DCFE8C9C2C0.pdf>. Acesso em: 15 out. 2013.

VALLE, Caio do. **Metrô terá 2º túnel para ligar as Estações Paulista e Consolação**. Agência Estado. São Paulo: 09 de out. 2013. Disponível em: <<http://www.estadao.com.br/noticias/impresso,metro-tera-2-tunel-para-ligar-as-estacoes-paulista-e-consolacao,1083537,0.htm>>. Acesso em: 30 out. 2013

VALÉRY, Paul. Eupalinos ou O Arquiteto. Rio de Janeiro: Ed. 34, 1996.

VELOSO, Pedro Luís Alves. **Gesto técnico: interferências da modelagem digital na criação arquitetônica**. 2011. Dissertação de Mestrado em Projeto de Arquitetura - Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011. Disponível em: <www.teses.usp.br/teses/disponiveis/16/16138/tde-13012012-153919>. Acesso em: 2 jul. 2012.

VIRILIO, Paul. **O espaço crítico**. Rio de Janeiro: Editora 34, 1993.

_____. **A arte do motor**. São Paulo: Estação Liberdade, 1996a.

_____. **La freccia del tempo. The arrow of time**. Domus dossier. “Alta Velocità. Treni e Stazioni. High Speed. Trains and Stations”. Milão: Editora Domus. Nº 4, ano IV/1996b. p. 6-9.