

Bruno Moreno Martin
Jean Michell Santiago
Leonardo de Vasconcelos Allil
Lucas Florêncio de Souza

Simulação e análise do fluxo de pedestres em terminais

Trabalho de Formatura do Curso de
Engenharia Civil apresentado à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo

Bruno Moreno Martin
Jean Michell Santiago
Leonardo de Vasconcelos Allil
Lucas Florêncio de Souza

Simulação e análise do fluxo de pedestres em terminais

Trabalho de Formatura do Curso de
Engenharia Civil apresentado à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo

Orientador: Prof. Dr. Cláudio Luiz Marte

Martin, Bruno Moreno

Simulação e análise do fluxo de pedestres em terminais / B. M. Martin, J. M. Santiago, L. V. Allil, L. F. Souza -- São Paulo, 2017.
89 p.

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Transportes.

1.Fluxo de pedestres 2.Simulação de pedestres 3.Viswalk 4.Engenharia Civil I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Transportes II.t. III.Santiago, Jean Michell IV.Allil, Leonardo de Vasconcelos V.Souza, Lucas Florencio de

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	11
1.1. OBJETIVO	12
1.2. PLANO DE AÇÃO	12
1.3. SITUAÇÃO E ESTUDOS NO MUNDO E NO BRASIL	12
2. METODOLOGIA.....	14
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
3.1. CONCEITUAÇÃO DE TERMINAL DE PASSAGEIROS	15
3.1.1. FUNÇÕES	15
3.1.2. NÍVEL DE SERVIÇO.....	15
3.1.3. CAPACIDADE	20
3.1.4. COMPONENTES OPERACIONAIS	21
3.1.5. DIMENSIONAMENTO DE TERMINAIS.....	22
3.1.6. CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE A CONCEITUAÇÃO DE TERMINAIS ..	25
3.2. SIMULAÇÃO DE FLUXO DE PEDESTRES	26
3.2.1. MODELOS MACROSCÓPICOS	29
3.2.2. MODELOS MICROSCÓPICOS.....	30
3.2.3. VISSIM E VISWALK.....	35
3.2.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE A SIMULAÇÃO DE PEDESTRES	43
4. ESTUDO DE CASO - ESTAÇÃO E TERMINAL PINHEIROS.....	44
4.1. ESTAÇÃO DE TREM DA CPTM.....	45
4.1.1. DIMENSÕES FÍSICAS	45
4.1.2. FLUXO DE PESSOAS	46
4.2. ESTAÇÃO DE METRÔ	48
4.2.1. DIMENSÕES FÍSICAS	48
4.2.2. FLUXO DE PESSOAS	51
4.3. TERMINAL DE ÔNIBUS	52
4.3.1. DIMENSÕES FÍSICAS	53

4.3.2. FLUXO DE PESSOAS	54
4.4. LOCAL DE SIMULAÇÃO	55
4.5. SIMULAÇÃO	57
4.5.1. CALIBRAÇÃO e aderência	57
4.5.2. SIMULAÇÃO DE CENÁRIOS	65
4.5.6. INCERTEZAS E POSSÍVEIS ERROS.....	84
4.5.5. CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE AS SIMULAÇÕES.....	85
5. CONCLUSÃO.....	86
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	88

RESUMO

A mobilidade urbana é uma questão que vem sendo amplamente estudada e é de extrema importância para a prosperidade das cidades modernas. Neste contexto, torna-se importante estudar os diferentes meios de transporte utilizados pela população. Um componente de extrema importância na mobilidade das cidades são os terminais de passageiros de transporte público, dentro dos quais ocorrem grandes fluxos de pedestres, tornando estes, um fator de relevância para toda a mobilidade de uma cidade.

O foco deste trabalho é analisar o fluxo de pedestres em terminais de transporte público e como estes podem ser beneficiados através da utilização de mecanismos de simulação de pedestres. O estudo foi baseado em revisão bibliográfica e em um estudo de caso, no qual o Terminal e Estação Pinheiros da cidade de São Paulo foi modelado e simulado no *software* “Viswalk”. Diferentes cenários foram testados a fim de demonstrar a eficiência da simulação de pedestres, tanto em fase de projeto quanto operação de terminais urbanos.

Palavras chave: engenharia civil; fluxo de pedestres; simulação de pedestres.

ABSTRACT

Urban mobility is an issue that has been widely studied and is a factor of great importance for the prosperity of modern cities. In this context, it is important to study all the different means of transport used by the population. An element of great importance to urban mobility are the urban terminals of public transportation, inside which great flow of pedestrians happen every day, making these a factor of relevance to the mobility of the whole city.

The focus of this study is to analyze the flow of pedestrians inside terminals of the public transportation and how these can benefit from the use of mechanisms of simulation of pedestrians. The study was based on literature review and a case study, in which the “Terminal e Estação Pinheiros” of the city of São Paulo was modeled and simulated with “Viswalk” software. Different scenarios were tested to demonstrate the efficiency of pedestrian simulation during both project phase and operation of the terminal.

Key words: civil engineering; pedestrian flow; pedestrian simulation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Gráfico com conceito geral nos níveis de serviço.....	24
Figura 2: Modos de se estudar um sistema.....	26
Figura 3: Experimento com fluxo de pedestres unidirecional passando por gargalo	27
Figura 4: Representação de uma simulação de pedestres (esquerda) e arranjo 2D com suas diversas possibilidades	31
Figura 5: Esquema da interação das forças	32
Figura 6: Simulação Viswalk	37
Figura 7: Efeito de lambda sobre interação de pedestres	38
Figura 8: Área de influência	40
Figura 9: Visualização do mapa de calor de nível de serviço	41
Figura 10: Vista aérea do Terminal Pinheiros	44
Figura 11: Flutuação horária da quantidade de passageiros embarcados em um dia útil (março 2016).....	46
Figura 12: Planta do pavimento superior e passarela de acesso à estação CPTM.....	49
Figura 13: Estação em corte	50
Figura 14: À direita: Terminal SPtrans; À esquerda: Estação do metrô e trem; Acima: Plataforma da CPTM.....	52
Figura 15: Planta Terminal Pinheiros	53
Figura 16 - Imagem à esquerda mostra simulação antes do ajuste na entrada das escadas e imagem a esquerda mostra simulação após ajuste.....	60
Figura 17- Antes do ajuste visual à esquerda e depois à direita.....	62
Figura 18: Nível de serviço na plataforma da CPTM.....	65
Figura 19: Nível de serviço na passarela	65
Figura 20: Nível de serviço no primeiro subsolo	66
Figura 21: Nível de serviço no térreo	66
Figura 22: Nível de serviço no terceiro subsolo	66
Figura 23: Nível de serviço no segundo subsolo.....	66
Figura 24: Nível de serviço na plataforma do metrô	66
Figura 25: Simulação do cenário atual	68
Figura 26: Nível de serviço na plataforma CPTM. (A) 2030 / (B) 2017	72
Figura 27: Nível de serviço na passarela. (A) 2030 / (B) 2017	72

Figura 28: Nível de serviço no térreo. (A) 2030 / (B) 2017	73
Figura 29: Nível de serviço no primeiro subsolo. (A) 2030 / (B) 2017	73
Figura 30: Nível de serviço na plataforma do Metrô. (A) 2030 / (B) 2017.....	74
Figura 31: Nível de serviço na plataforma do Metrô. (A) 2030 / (B) 2017.....	74
Figura 32: Nível de serviço no terceiro subsolo. (A) 2030 / (B) 2017	74
Figura 33: Simulação aumento de demanda.....	76
Figura 34: Configuração Atual	77
Figura 35: Configuração de Menor Percurso	77
Figura 36: Simulação atual	78
Figura 37: Simulação menor percurso	78
Figura 38: Nível de serviço na passarela. (A) Menor Percurso / (B) 2017	79
Figura 39: Nível de serviço na plataforma CPTM. (A) Menor Percurso / (B) 2017.....	80

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Nível de serviço em áreas de locomoção.....	17
Tabela 2: Níveis de serviço em escadas	18
Tabela 3: Níveis de serviço em áreas de espera	19
Tabela 4: Limites de conforto.....	20
Tabela 5: Tabela com dimensionamento FEPASA	23
Tabela 6: Comparativo entre níveis de serviço utilizados até a década de 90 em SP	24
Tabela 7: Parâmetros para o modelo de forças sociais.....	34
Tabela 8: : Funcionalidades Vissim e Viswalk	36
Tabela 9: Valores padrão	42
Tabela 10: Quantidade de embarques e desembarques no trecho Grajaú - Osasco	46
Tabela 11: Quantidade de embarques e desembarques no trecho Osasco - Grajaú	47
Tabela 12: Variáveis de calibração.....	58
Tabela 13: Resultados.....	58
Tabela 14: Variáveis de calibração.....	59
Tabela 15: Resultados.....	59
Tabela 16: Variáveis de calibração.....	61
Tabela 17: Resultados.....	61
Tabela 18: Variáveis de calibração.....	63
Tabela 19: Resultados.....	63
Tabela 20: Variáveis de calibração.....	64
Tabela 21: Resultados.....	64
Tabela 22: Comparação do número de viagens por modal nas últimas duas pesquisas (2007 e 2012):.....	70
Tabela 23: Série histórica do número de viagens realizadas por transporte coletivo.....	70

1. INTRODUÇÃO

A questão da mobilidade urbana vem ganhando relevância desde a formação das primeiras grandes aglomerações urbanas, possibilitadas pela revolução industrial no século XIX. A maior metrópole do Brasil, São Paulo, já apresentava grande porte com uma população de 8 milhões de habitantes em 1970 e atingiu mais de 20 milhões de pessoas em 2012, segundo dados da Pesquisa Mobilidade 2012 do Metrô. Com esse crescimento acelerado a cidade passou a apresentar sérios problemas de mobilidade que se tornaram cada vez piores.

São Paulo tem o sistema metroferroviário mais denso do mundo, apresentando 14,7 milhões de passageiros transportados por quilômetro de via no ano de 2014. Os trens do metrô chegam a operar com quase 9 passageiros por metro quadrado em algumas linhas, no horário de pico. Acontecem 13,6 milhões de viagens por transporte coletivo por dia na capital paulista. Segundo Terra (2014), “na estação Palmeiras – Barra Funda do Metrô, a demanda de passageiros saltou de menos de 90 mil em 1999 para 200 mil passageiros em 2011”.

Para que a cidade apresente níveis adequados de mobilidade, é necessário que o transporte coletivo seja de bom nível. A malha de transporte coletivo de uma cidade é composta pelas vias e linhas que funcionam como “links” por onde se deslocam os veículos e por terminais e estações, que são os nós dessa rede. Nesse contexto, não só os “links” e os veículos devem ser de boa qualidade, mas também as estações e terminais, pois desempenham um papel chave na qualidade do serviço oferecido, podendo representar grandes gargalos de produção em caso de mal dimensionamento ou má operação, além de terem grande influência como mecanismo de planejamento urbano. “Os terminais têm um papel urbano importante, que se sobrepõe à sua função básica de permitir o acesso e egresso dos passageiros aos sistemas de transportes. Podem funcionar como polo gerador de demanda e têm grande impacto no uso do solo do seu entorno ” (Guazzelli, 2011).

A análise do desempenho de um terminal ou estação da rede de transportes leva em conta diversos fatores, tais como a segurança dos passageiros ao utilizarem o sistema, o conforto e o nível de operação, a capacidade de produção, a acessibilidade e até mesmo a identidade física do local. Segundo Alberto (s.d), “um terminal tem a capacidade de ser concebido por um projeto que permita sua identificação como elemento estruturador da rede de transporte e que o usuário se sinta bem ao utilizá-lo”.

Os dados indicam o grande fluxo de passageiros que acontece nos terminais da cidade e mostram que estudar como as pessoas transitam em ambientes fechados, como é o caso de terminais, pode ser importante para melhorar a fluidez destes pedestres, de forma a tornar o transporte de toda a metrópole mais eficiente. Além disso, há a possibilidade de utilizar a simulação como ferramenta complementar de análise e interpretação, visando buscar mecanismos e soluções que permitam uma mobilidade urbana de melhor qualidade.

1.1. OBJETIVO

O objetivo do trabalho é elaborar uma análise técnica multidisciplinar que permita estudar e entender o funcionamento de grandes fluxos de pessoas em ambientes fechados de terminais urbanos, para buscar aperfeiçoar seu desempenho. Serão abordados aspectos desde a concepção arquitetônica até sua operação, sempre visando uma melhora na eficiência do terminal e conseqüentemente a melhora do nível de atendimento de seus passageiros.

1.2. PLANO DE AÇÃO

Na primeira etapa do trabalho de formatura foram feitos: a revisão bibliográfica, estudo de métodos de avaliação operacional de terminais urbanos, estudo de métodos de simulação e análise de fluxo de pessoas em espaços fechados.

Na posse deste material foi realizado um estudo de caso com base no Terminal Pinheiros, onde foram identificados pontos críticos, como: gargalos, corredores, escadas e etc. Estes ambientes foram modelados e simulados na segunda parte deste trabalho de formatura.

1.3. SITUAÇÃO E ESTUDOS NO MUNDO E NO BRASIL

Existe uma grande gama de estudos sobre terminais e estações metroferroviárias em universidades ao redor do mundo, principalmente nos Estados Unidos da América, China e Holanda. Os estudos abordam temas diversos que vão desde a concepção arquitetônica e o projeto de uma estação, até a análise do comportamento dos pedestres nas mesmas, com destaque para Daamen (2001), da universidade de Delft, que dá enfoque especial ao comportamento dos pedestres nas dependências do terminal e analisa diversas variáveis que devem ser consideradas na simulação do fluxo de pedestres.

Também existe uma grande variedade de estudos realizados por empresas privadas, que dão enfoque ao fluxo de pedestres nas mais diversas instalações, inclusive terminais. Estes, porém, são de difícil acesso por serem realizados por empresas que possuem o foco comercial e não acadêmico.

A simulação de pedestres vem sendo amplamente estudada nas últimas duas décadas. Motivados pelo crescimento exacerbado dos grandes centros urbanos, os estudos sobre a simulação, tanto de pedestres quanto de tráfego, tornaram-se uma ferramenta de análise, otimização e planejamento de diferentes componentes das cidades.

A dificuldade intrínseca em simular fluxos de pedestres justifica a grande quantidade de estudos na área. Devido à complexidade do tema, existem muitos métodos e modelos distintos. Todos tentam simular da maneira mais realista possível o comportamento de pedestres nas situações em que se propõe. Vale pontuar aqui a diferença entre os modelos teóricos, que tentam explicar o comportamento dos pedestres, e os programas de simulação, que fazem uso de tais modelos, juntamente com suas configurações próprias para realizar a simulação em si. Por já existirem modelos amplamente aceitos na comunidade acadêmica, muitas das pesquisas atuais focam nos *softwares* que realizam as simulações, como é o caso de uma tese de mestrado sueca de Stina Alexandersson e Emmi Johansson (2013), da Universidade Tecnológica de Chalmers, Gotemburgo.

No Brasil, o tema vem ganhando relevância, porém ainda existe uma carência muito grande de pesquisas relacionadas ao tema. Isto é importante frisar, pois a realidade de mobilidade de outros países pode ser bem diferente da que é vista no Brasil. Somam-se a isso diferenças culturais, que exercem importante influência no comportamento dos pedestres. Desta forma, o grande desafio é traduzir este conhecimento para realidade do pedestre brasileiro e do transporte metropolitano de São Paulo.

2. METODOLOGIA

Este trabalho foi dividido em duas frentes de estudo. De um lado, estudou-se a conceituação de terminais e estações de passageiros, suas funções e seu papel na rede de transportes. Foram estudados métodos de avaliação da operação de um terminal e as características de projeto e operação que influenciam a qualidade do serviço oferecido.

Outra frente de estudo se voltou à simulação computacional do fluxo de pedestres. Não estando no escopo deste trabalho o desenvolvimento, aprimoramento ou avaliação de *softwares* para simulação. Uma vez escolhido o modelo de simulação, estudou-se mais a fundo quais os parâmetros de simulação, como determiná-los e como aplicá-los de forma a melhor representar a realidade.

Em um momento mais avançado, os conhecimentos adquiridos em ambas as frentes, através da extensa revisão bibliográfica, foram utilizados conjuntamente em um estudo de caso, de modo que este pudesse ter maior aderência à realidade, permitindo um entendimento melhor do tráfego de pedestres, e permitindo também proposições de melhorias.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. CONCEITUAÇÃO DE TERMINAL DE PASSAGEIROS

3.1.1. FUNÇÕES

Segundo Gualda (1995), os sistemas de transporte são constituídos basicamente por três subsistemas:

- Os veículos;*
- As vias;*
- Os terminais.*

Os terminais têm como principais funções, segundo Ashford & Wright (1992):

- *Processar passageiros e bagagens;*
- *Fornecer condições necessárias para a mudança de tipo de movimento;*
- *Facilitar a transição de um modo de transporte para outro.*

Essas funções foram atribuídas por Ashford & Wright (1992) pensando em um terminal aeroportuário. No caso específico de terminal urbano de passageiros pode-se afirmar que:

“A função dos terminais de transporte é possibilitar a entrada ou saída do sistema de transportes, ou alteração do modal dos passageiros, atendendo às necessidades de processamento dos mesmos.” (Guazzelli, 2011).

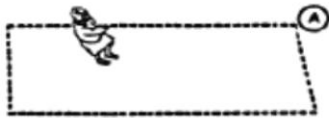
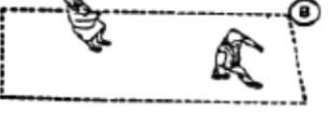

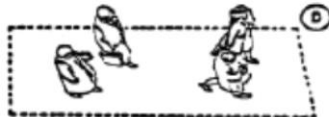


3.1.2. NÍVEL DE SERVIÇO

O fluxo de pedestres é característico por ser de grande irregularidade. Diferentes tipos de pedestres caminham de diferentes formas e velocidades, dependendo do motivo da viagem, bem como do perfil da pessoa, sua idade, além das características físicas do local. A grande quantidade de variáveis que influencia o fluxo o torna um evento de difícil avaliação. Por isso, pesquisas desenvolvidas ao longo do tempo procuram identificar e estabelecer os parâmetros que realmente influenciam as operações dos pedestres de forma relevante, tentando estabelecer limites, em termos de conforto, considerando todos os aspectos, geométricos e operacionais do local de circulação.

Neste contexto, a variável que se utiliza para a avaliação do fluxo é o Nível de Serviço, que pode ser definido como o desempenho total do serviço de transporte medido ou percebido pelo ponto de vista do usuário. É uma variável complexa e de difícil definição, uma vez que diz respeito à percepção do usuário, em relação ao que ele consideraria ideal, ou seja, depende de fatores amplamente subjetivos e culturais.

Fruin (1971), em *Pedestrian Planning and Design*, define alguns parâmetros de nível do serviço (também utilizados pela FTA – Federal Transit Administration em seu manual), que serão a base para as considerações sobre nível de serviço deste trabalho. O nível de serviço, NS, possui a unidade metro quadrado por pedestre que é de simples reconhecimento. As tabelas a seguir representam as definições dos diferentes níveis de serviço para fluxo de pedestres em locais fechados. A Tabela 1 representa os usuários em áreas de locomoção, enquanto a Tabela 2 representa os usuários em áreas de escada e a Tabela 3 os usuários em locais de espera.

Tabela 1: Nível de serviço em áreas de locomoção.

	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Definição NS</th> <th>Espaço por pedestre (m²/p)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Nível de Serviço A</td> <td>$\geq 3,3$</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Velocidade de caminhada definida livremente; conflito com outros pedestres improvável.</td> </tr> </tbody> </table>	Definição NS	Espaço por pedestre (m ² /p)	Nível de Serviço A	$\geq 3,3$	Velocidade de caminhada definida livremente; conflito com outros pedestres improvável.	
Definição NS	Espaço por pedestre (m ² /p)						
Nível de Serviço A	$\geq 3,3$						
Velocidade de caminhada definida livremente; conflito com outros pedestres improvável.							
	<table border="1"> <tbody> <tr> <td>Nível de Serviço B</td> <td>2,3 - 3,3</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Velocidade de caminhada definida livremente; pedestres respondem à presença de outros.</td> </tr> </tbody> </table>	Nível de Serviço B	2,3 - 3,3	Velocidade de caminhada definida livremente; pedestres respondem à presença de outros.			
Nível de Serviço B	2,3 - 3,3						
Velocidade de caminhada definida livremente; pedestres respondem à presença de outros.							
	<table border="1"> <tbody> <tr> <td>Nível de Serviço C</td> <td>1,4 - 2,3</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Velocidade de caminhada definida livremente; ultrapassagem é possível em fluxos unidirecionais; pequenos conflitos com pedestres em fluxo reverso ou cruzado.</td> </tr> </tbody> </table>	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 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.							
	<table border="1"> <tbody> <tr> <td>Nível de Serviço D</td> <td>0,9 - 1,4</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Liberdade restrita para escolha de velocidade e ultrapassagem; alta probabilidade de conflito com pedestres em fluxo reverso ou cruzado.</td> </tr> </tbody> </table>	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 D	0,9 - 1,4						
Liberdade restrita para escolha de velocidade e ultrapassagem; alta probabilidade de conflito com pedestres em fluxo reverso ou cruzado.							
	<table border="1"> <tbody> <tr> <td>Nível de Serviço E</td> <td>0,5 - 0,9</td> </tr> <tr> <td colspan="2">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.</td> </tr> </tbody> </table>	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 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.							
	<table border="1"> <tbody> <tr> <td>Nível de Serviço F</td> <td>$< 0,5$</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Velocidade e possibilidade de ultrapassagem extremamente restritas; constante contato involuntário com outros pedestres; movimento reverso ou cruzado impossível; fluxo esporádico e instável.</td> </tr> </tbody> </table>	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.			
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.							

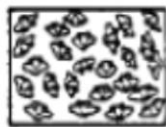
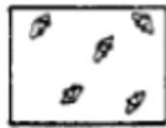
Fonte: FTA 2003

Tabela 2: Níveis de serviço em escadas

Definição NS	Espaço por pedestre (m²/p)
Nível de Serviço A	$\geq 1,9$
Área suficiente para escolha de velocidade e ultrapassagem de pedestres mais lentos; fluxo reverso não causa conflitos restritos.	
Nível de Serviço B	1,4 - 1,9
Área suficiente para escolha de velocidade e certa dificuldade na ultrapassagem de pedestres mais lentos; fluxo reverso causa poucos conflitos.	
Nível de Serviço C	0,9 - 1,4
Velocidade levemente restrita devido à incapacidade de ultrapassagem de pedestres mais lentos; fluxo reverso causa alguns conflitos.	
Nível de Serviço D	0,7 - 0,9
Velocidade restrita devido à incapacidade de ultrapassagem de pedestres mais lentos; fluxo reverso causa conflitos significativos.	
Nível de Serviço E	0,4 - 0,7
Velocidade reduzida de todos os pedestres; paradas intermitentes são prováveis de acontecer; fluxo reverso causa sérios conflitos.	
Nível de Serviço F	$< 0,4$
Colapso total no fluxo de pedestres, com muitas paradas. Movimento depende dos pedestres mais lentos.	

Fonte: FTA 2003

Tabela 3: Níveis de serviço em áreas de espera



Definição NS	Espaço por pedestre (m ² /p)
Nível de Serviço A	$\geq 1,2$
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	

Fonte: FTA 2003

O limite do conforto para o usuário depende muito do local em que ocorre o fluxo. Gondim (2001) classifica os níveis de serviço aceitáveis para o deslocamento de pedestre em função do uso do solo e a classe hierárquica da via, como apresentado na Tabela 4. O estudo diz respeito ao fluxo de pedestres em calçadas, porém pode-se facilmente notar que, nos horários de pico e em regiões de maior movimento, em que o usuário já espera que exista um maior fluxo, como no caso de terminais urbanos, os níveis de serviço aceitáveis são mais baixos, chegando até o nível C. Ver Tabela 4.

Tabela 4: Limites de conforto

Hierarquia da via	Uso do solo	Nível de Serviço
Local	Residencial Lazer	A
Coletora Arterial	Comercial	B C (horários de pico)

Fonte: Gondim (2001)

No caso dos terminais, são aceitáveis níveis de serviço até do tipo D ou E por curtos períodos de tempo (horário de pico), para que o terminal não seja superdimensionado para a maior parte do dia. Além disso, níveis de serviço piores também são aceitos em situações de emergência, onde a garantia da segurança é priorizada em detrimento do conforto do usuário.

Vale ressaltar que os níveis de serviço acima definidos foram estipulados com base na pesquisa de Fruin (1971) nos EUA e, portanto, não são totalmente representativos para os níveis de serviço percebidos por um usuário brasileiro, uma vez que existem fatores culturais em relação ao comportamento e percepção que influenciam na definição dos níveis de serviço.

3.1.3. CAPACIDADE

A capacidade total de um terminal é função da capacidade de seus diversos componentes. O correto balanceamento dessas capacidades permite evitar a formação de gargalos, onde a capacidade de determinado componente é menor que a dos demais, ocasionando um gargalo de produção para todo o terminal, ou pontos ociosos, onde o oposto

ocorre e os componentes acabam subutilizados, causando desperdício de recursos e espaço físico, que poderiam ser utilizados para outras funções mais críticas.

A capacidade dos diferentes componentes pode ser dividida em duas principais análises: a capacidade estática e a capacidade dinâmica. Segundo (Alves, 1981):

“Capacidade estática: Refere-se à capacidade das instalações acolherem, sob determinado nível de conforto, um certo número de usuários. A capacidade estática produz a estimativa do número de passageiros que podem ocupar determinada área;

Capacidade dinâmica: Refere-se à capacidade das instalações processarem um fluxo de usuários. A capacidade dinâmica permite avaliar o fluxo horário que pode ser atendido com as instalações existentes. ”

Vale ressaltar que a capacidade é função do nível de serviço. Portanto, quanto pior for o nível de serviço aceitável para determinado período de tempo, maior será a capacidade.

“O conceito de capacidade está intrinsecamente relacionado com o conceito de qualidade e, portanto, para que a estação cumpra sua função, o transbordo deve sempre respeitar as restrições dos níveis de serviço associados à percepção de qualidade dos usuários.” (Guazzelli, 2011).

3.1.4. COMPONENTES OPERACIONAIS

Os elementos que fazem parte dos componentes operacionais dos terminais metroferroviários são, segundo Feitosa (2000):

Componentes de processamento: são aqueles em que os passageiros são processados dependendo de uma taxa de serviço específica do componente. Ex: bilheteria.

Componentes de espera: são os componentes onde o passageiro aguarda pela liberação ou pelo horário correto para embarque. Ex: plataforma de embarque.

Componentes de circulação: são aqueles por onde os passageiros, funcionários e demais pessoas circulam, para se deslocarem de um componente ao outro. Ex: escadas e corredores.

3.1.5. DIMENSIONAMENTO DE TERMINAIS

Cada projeto tem suas singularidades e tem que seguir suas restrições devido à geotécnica, falta de verba e outros fatores. Contornando essas limitações, deve-se buscar atender os níveis de serviço determinados previamente, além de garantir evacuação imediata em casos de incêndio ou outros acidentes.

Níveis de serviço vão variar ao longo do dia, já que a demanda oscila ao longo do tempo. É importante estar atento para que o desempenho não seja baixo demais durante os momentos de demanda pico e para que não haja ociosidade muito grande durante a maior parte do dia em que a demanda não está próxima da demanda de pico. A busca por esse equilíbrio é complexa e terá uma solução para cada projeto.

Após a previsão da demanda de passageiros e a especificação dos níveis de serviço, deve-se fazer a análise de fluxo e determinação de requerimentos de serviço e espaço e por fim fazer a configuração do serviço e do espaço.

Na busca por simplificar e acelerar o processo de dimensionamento de terminais, foram desenvolvidos vários métodos empíricos de dimensionamento. Métodos estes que nem sempre geram resultado final de boa qualidade. Grandes empresas responsáveis pelo transporte urbano sobre trilhos em São Paulo, como a CBTU e o Metrô, já fizeram uso desses métodos.

Por métodos empíricos, índices são definidos para fazer a relação entre demanda de passageiros e a necessidade de cada componente. Quantidades mínimas de componentes podem ser definidas devido ao “porte da estação”.

Métodos empíricos podem apresentar discrepâncias com a realidade, levando a dimensionamentos superestimados, já que cada projeto tem suas peculiaridades. Dessa forma, métodos empíricos não são as melhores opções para terminais urbanos, principalmente para terminais em áreas de intensa demanda e terrenos muito caros. Ver Tabelas 5 e 6 e a Figura 1.

Tabela 5: Tabela com dimensionamento FEPASA

TABELA 10
RESUMO PARA DIMENSIONAMENTO BÁSICO DE ESTAÇÕES - VALORES MÍNIMOS - FEPASA

Taxa de Desembarque ou Embarque ou Soma da Estação	Frequência		Taxa Média de Desembarque ou Embarque Soma por Trem		Largura da Plataforma		Acessos		Bilhetarias para 2 comprando ao embarcar			Bloquetes	
	Headway 3 min. / trem / hora	Headway 4,5 min. / trem / hora	Headway 3 min. / trem	Headway 4,5 min. / trem	Headway 3 min. / metros	Headway 4,5 min. / metros	Corredores Passarelas	Estrada Fixa	Escada Rolante	30%	50%	70%	Desembarque
1.000	20	13,3	50	75	5,8	5,8	3,2	1,2 (3,6)	1	1	2	1	1
2.000	20	13,3	100	150	5,8	5,8	3,2	1,2 (3,6)	2	2	3	2	2
3.000	20	13,3	150	225	5,8	5,8	3,2	1,8 (3,6)	3	3	4	3	3
4.000	20	13,3	200	300	5,8	5,8	3,2	2,4 (3,6)	4	4	5	4	4
5.000	20	13,3	250	375	5,8	5,8	3,2	2,4 (3,6)	5	5	6	5	5
6.000	20	13,3	300	450	5,8	5,8	3,2	3,0 (3,6)	6	6	7	6	6
7.000	20	13,3	350	515	5,8	5,8	3,2	3,6	7	7	8	7	7
8.000	20	13,3	400	600	5,8	5,8	3,2	4,2	8	8	9	8	8
9.000	20	13,3	450	675	5,8	5,8	3,2	4,8	9	9	10	9	9
10.000	20	13,3	500	750	5,8	5,8	3,2	5,4	10	10	11	10	10
11.000	20	13,3	550	825	5,8	5,8	3,2	6,0	11	11	12	11	11
12.000	20	13,3	600	900	5,8	5,8	3,2	6,6	12	12	13	12	12
13.000	20	13,3	650	975	5,8	5,8	3,2	7,2	13	13	14	13	13
14.000	20	13,3	700	1.050	5,8	5,8	3,5	7,8	14	14	15	14	14
15.000	20	13,3	750	1.125	5,8	5,8	3,5	8,4	15	15	16	15	15
16.000	20	13,3	800	1.200	5,8	5,8	3,7	9,0	16	16	17	16	16
17.000	20	13,3	850	1.275	5,8	5,8	4,0	9,6	17	17	18	17	17
18.000	20	13,3	900	1.350	5,8	5,8	4,2	10,2	18	18	19	18	18
19.000	20	13,3	950	1.425	5,8	5,8	4,4	10,8	19	19	20	19	19
20.000	20	13,3	1.000	1.500	5,8	5,8	4,7	11,4	20	20	21	20	20
21.000	20	13,3	1.050	1.575	5,8	5,8	4,9	12,0	21	21	22	21	21
22.000	20	13,3	1.100	1.650	5,8	5,8	5,2	12,6	22	22	23	22	22
23.000	20	13,3	1.150	1.725	5,8	5,8	5,4	13,2	23	23	24	23	23
24.000	20	13,3	1.200	1.800	5,8	5,8	5,7	13,8	24	24	25	24	24
25.000	20	13,3	1.250	1.875	5,8	5,8	5,9	14,4	25	25	26	25	25
26.000	20	13,3	1.300	1.950	5,8	5,8	6,2	15,0	26	26	27	26	26
27.000	20	13,3	1.350	2.025	5,8	5,8	6,7	15,6	27	27	28	27	27
28.000	20	13,3	1.400	-	5,8	5,8	6,9	16,2	28	28	29	28	28
29.000	20	13,3	1.450	-	5,8	5,8	7,2	16,8	29	29	30	29	29
30.000	20	13,3	1.500	-	5,8	5,8	7,4	17,4	30	30	31	30	30
31.000	20	13,3	1.550	-	5,8	5,8	7,7	18,0	31	31	32	31	31
32.000	20	13,3	1.600	-	5,8	5,8	7,9	18,6	32	32	33	32	32
33.000	20	13,3	1.650	-	5,8	5,8	8,1	19,2	33	33	34	33	33
34.000	20	13,3	1.700	-	5,8	5,8	8,4	19,8	34	34	35	34	34
35.000	20	13,3	1.750	-	5,8	5,8	8,6	20,4	35	35	36	35	35
36.000	20	13,3	1.800	-	5,8	5,8	8,9	21,0	36	36	37	36	36
37.000	20	13,3	1.850	-	5,8	5,8	9,1	21,6	37	37	38	37	37
38.000	20	13,3	1.900	-	5,8	5,8	9,4	22,2	38	38	39	38	38
39.000	20	13,3	1.950	-	5,8	5,8	9,6	22,8	39	39	40	39	39
40.000	20	13,3	2.000	-	5,8	5,8	9,9	23,4	40	40	41	40	40

() Dimensão mínima recomendada para casos de emergência
Fonte: Ref. 19

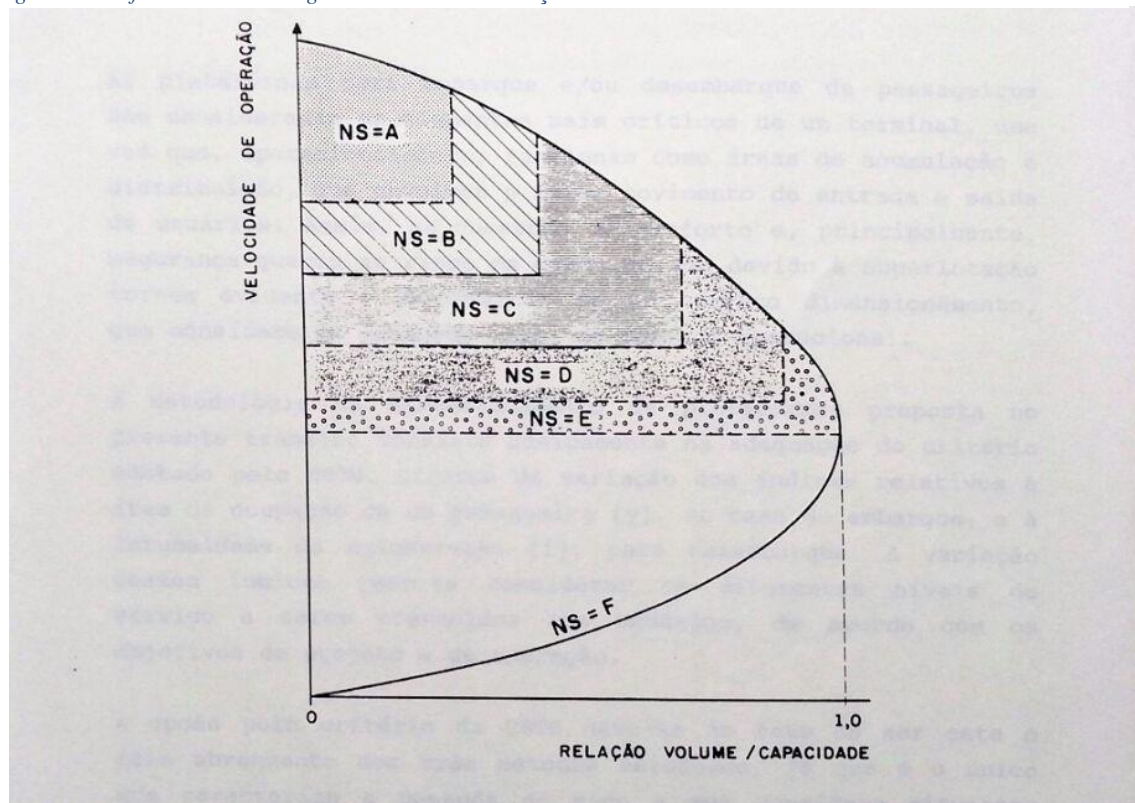
Fonte: Ferreira, 1992

Tabela 6: Comparativo entre níveis de serviço utilizados até a década de 90 em SP

NÍVEL DE SERVIÇO - SÍNTESE COMPARATIVA (CBTU x FEPASA x METRÔ/SP)			
ELEMENTOS	METODOLOGIA		
	CBTU	FEPASA	METRÔ/SP
Plataformas	E	E	E
Acessos	F	E	D
Rampas	F	D	D
Escadas	F	D	D

Fonte: Ferreira, 1992

Figura 1: Gráfico com conceito geral nos níveis de serviço



Fonte: Ferreira, 1992

Outra opção de dimensionamento é feita por métodos analíticos, que se baseiam no método científico, e faz uso de modelos para gerar cenários de solução. A pesquisa operacional é utilizada por meio de teorias de filas, regressões lineares, inteligência artificial e dados estatísticos. Os diversos cenários criados avaliam os impactos gerados por mudanças de premissas e de dados de entrada para que a melhor solução de cada caso possa ser encontrada.

Atualmente, os métodos por simulações são os mais utilizados para análise de terminais de passageiros. O problema pode ser facilmente representado por fluxos que seguem regras lógicas e padrões pré-estabelecidos pelo software de simulação. A simulação de fluxo de pessoas é abordada mais profundamente a partir do item 3.2 desse trabalho de formatura.

3.1.6. CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE A CONCEITUAÇÃO DE TERMINAIS

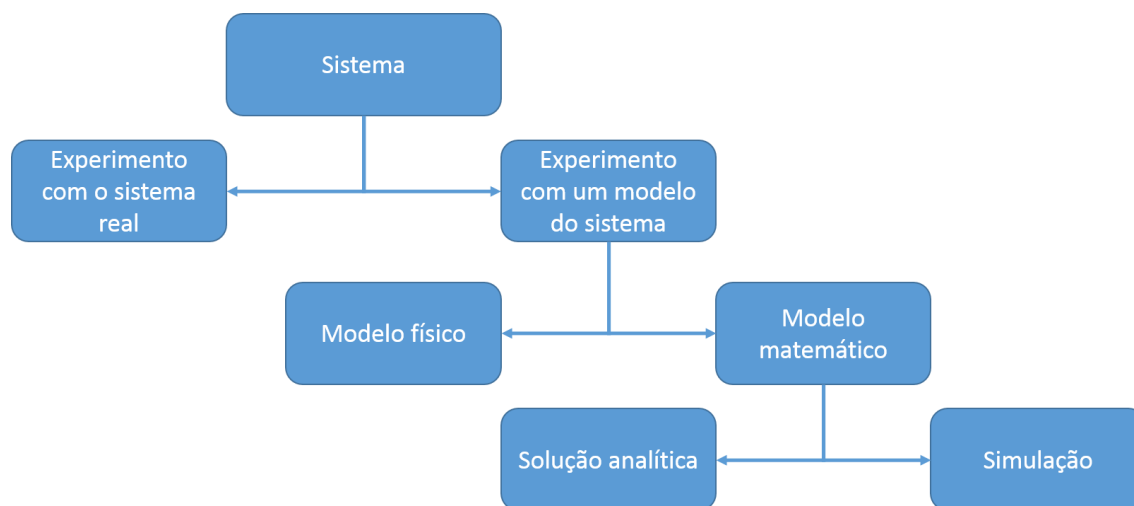
Para se realizar uma análise de fluxo em um terminal, é imprescindível que se tenha como base o conteúdo teórico exposto. Apesar de aparentar ser um tema relativamente simples, existem muitos conceitos, variáveis e parâmetros que devem ser analisados cuidadosamente.

Para enriquecer a análise, também serão expostos conceitos referentes à simulação computacional de pedestres, que será uma ferramenta essencial para garantir a qualidade do estudo, permitindo o teste e proposição de diferentes soluções.

3.2. SIMULAÇÃO DE FLUXO DE PEDESTRES

Antes de expor os métodos de simulação de pedestres, é importante entender os motivos de usar a simulação e suas implicações. Um mesmo sistema pode ser estudado de diversas formas, como mostra a Figura 2, extraído de Law (2010).

Figura 2: Modos de se estudar um sistema

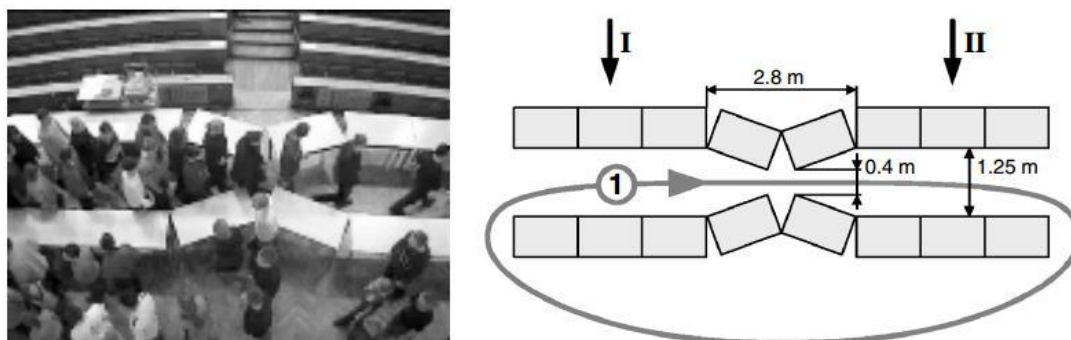


Fonte: Law (2010)

Este fluxograma dá a ideia de escolhas que devem ser tomadas na hora de abordar um sistema em que se deseja testar novas condições. Muitas vezes não é possível fazer a experimentação no sistema real por motivos financeiros ou por serem mudanças muito disruptivas. Por essas razões, é importante que se criem modelos representativos da realidade e então estes podem ser entendidos como substitutos do sistema real.

Os modelos podem ser físicos ou matemáticos, e neste momento entra mais uma vez o quesito financeiro. Por exemplo, não há como se construir uma estação de trem em tamanho real, com trens reais e pessoas reais, só para ver se ela pode melhorar a mobilidade de uma cidade.

Figura 3: Experimento com fluxo de pedestres unidirecional passando por gargalo



Fonte: Helbing, 2005

Entretanto, algumas vezes pode ser útil criar um modelo para extrair informações que possam ser exportadas para o problema real. Este é o caso de modelos de prédios que são testados em túneis de vento, ou mesmo o da Figura 3 que foi extraída de um estudo do Helbing (2005) em que ele testa o comportamento dos pedestres, no caso um fluxo de pedestres passando por um gargalo.

Outras vezes, não é razoável criar o modelo físico para cada proposição de modificação criada. Para isto servem os modelos matemáticos, que se utilizam de relações lógicas e quantitativas para interpretar e modificar o sistema.

Uma vez com o modelo matemático criado, este deve ser examinado para ver como ele pode responder as questões de interesse, do sistema em questão. Sendo simples o suficiente ele pode ser trabalhado de modo a achar uma solução analítica exata. Entretanto, muitos sistemas são altamente complexos – como é caso da movimentação de pedestres – e para estes o modelo deve ser estudado por simulação.

Para Kelton, Sadowski & Sadowski (1998) “simulação é o processo de projetar e criar um modelo, em um computador, de um sistema real ou proposto, com o propósito de conduzir experimentos numéricos, para nos dar uma melhor compreensão do comportamento de um dado sistema, dada uma série de condições. ”

Na mesma linha, segundo Schriber (1974), “simulação implica na modelagem de um processo ou sistema, de tal forma que o modelo imite as respostas do sistema real em uma sucessão de eventos que ocorrem ao longo do tempo”

Posto isto, a utilização da simulação implica em vantagens e desvantagens, pontos positivos e negativos de sua utilização, de acordo com a perspectiva de Law (2010).

Vantagens:

- A maioria dos sistemas complexos, do mundo real, tem elementos estocásticos, que não podem ser descritos, com precisão, por um modelo matemático, que pode ser avaliado analiticamente;
- A simulação permite estimar o desempenho de um sistema existente, sob um conjunto projetado de condições operacionais;
- Propostas alternativas podem ser comparadas, via simulação, para ver qual melhor atende uma exigência específica;
- Em uma simulação, é possível manter um controle muito melhor sobre as condições experimentais, do que seria possível experimentando o próprio sistema.

Desvantagens:

- Cada execução de um modelo de simulação estocástico produz apenas estimativas de características verdadeiras de um modelo, para um determinado conjunto de parâmetros de entrada. Assim, várias repetições independentes do modelo, provavelmente serão necessárias para cada conjunto de parâmetros de entrada a ser estudada;
- Alguns modelos de simulação são muitas vezes caros e demorados;
- Se um modelo não é uma representação "válida" de um sistema em estudo, os resultados da simulação, não importa o quão impressionante pareçam, irão fornecer poucas informações úteis sobre o sistema real

Estas definições dão a dimensão da dificuldade de simular fluxos de pedestres, sejam eles grandes ou pequenos. Pois, inicialmente deve-se propor um modelo que possua parâmetros que permitam que este modelo simule o sistema real. Estes parâmetros devem ainda ser calibrados e passar por testes de aderência com o comportamento real de pedestres, para só então, fazer avaliações.

Diversos são os modelos que tentam imitar esta realidade de pedestres em trânsito. Os modelos podem ser agrupados em duas metodologias principais: Macroscópica e Microscópica. Os modelos macroscópicos focam no sistema como um todo (nas características do fluxo ao invés de um pedestre individualmente), enquanto que os modelos microscópicos estudam o

comportamento e as decisões do pedestre individualmente e de suas interações com os outros pedestres na multidão e são, comumente, mais recomendados para regiões discretas dentro de um sistema.

Normalmente, o objetivo é ou atingir uma simulação “real-time” para grandes multidões – onde o comportamento individual não é importante, contanto que o movimento da multidão como um todo parece realista, ou focar no comportamento individual usando modelos cognitivos complexos (mas atingindo “real-time” apenas para pequenas multidões). (Pelechano, Albeck, Badler – 2008)

A seguir são citados alguns modelos tanto macroscópicos quanto microscópicos. Foi dada uma atenção especial ao modelo de forças sociais de Helbing (1995), por ser este sobre o qual se baseia o Software Viswalk da PTV.

3.2.1. MODELOS MACROSCÓPICOS

Na simulação macroscópica é estabelecida uma relação entre densidade, velocidade e fluxo de forma analítica, e possui fluxo agregado e menor nível de detalhes. A vantagem deste tipo de simulação é que exige menos dados de entrada e em geral é uma solução com processamento e soluções mais rápidas. (Ueta, 2013)

- **Modelos de regressão (Regression Models):**

Modelos de regressão usam relações estabelecidas estatisticamente entre as variáveis de fluxo para prever a operação do fluxo de pedestres sobre determinadas circunstâncias. As características deste fluxo dependem da infraestrutura (escadas, corredores, etc.) (Milazzo et al. 1998)

- **Modelos de escolha de rota (Rout Choice Models):**

Modelos de escolha de rota descrevem o entendimento do ambiente pelo pedestre baseado no conceito de utilidade. Pedestres escolhem seus destinos para maximizar a utilidade da sua viagem. (Hoogendoorn, 2003)

Se baseia em buscas repetidas do menor caminho na rede. Onde a escolha do menor caminho se modifica em função de uma ou mais variáveis, como impedância do “link”, restrições de rota e critério de busca.

- **Modelos de filas (Queuing Models):**

Os modelos de filas usam modelos de sequência de Markov (Lovas, 1994) – ou seja, a distribuição de probabilidade dos eventos depende apenas do estado atual e não da sequência de eventos que a precederam – para descrever como os pedestres se movimentam de um nó ao outro da rede. Nós são normalmente salas e conectores são normalmente portas.

- **Modelos gás-cinéticos (Gaskinects):**

Os modelos “gás-cinéticos” fazem uma analogia com a dinâmica dos gases ou fluídos para descrever como a velocidade e a densidade da multidão variam em função do tempo usando equações diferenciais parciais (Henderson, 1971)

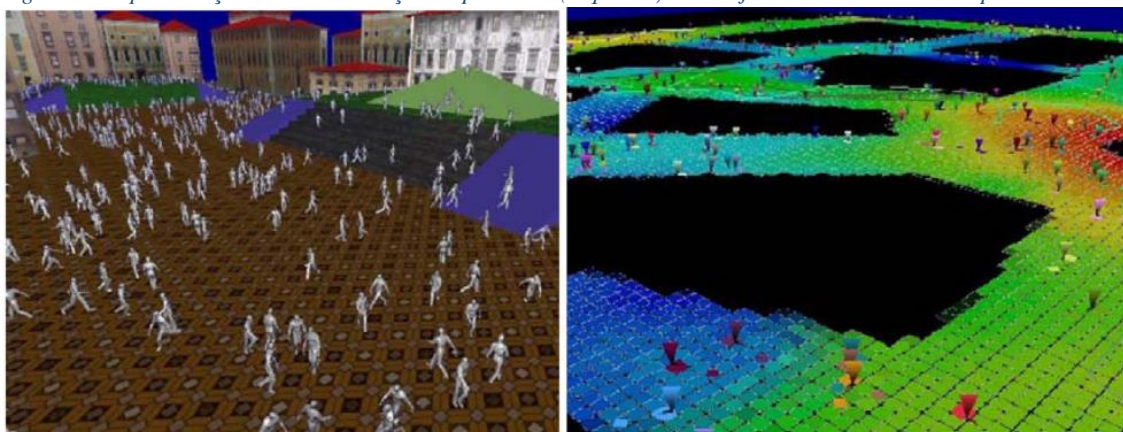
3.2.2. MODELOS MICROSCÓPICOS

Modelos microscópicos são bons métodos de abordagem por possuírem um comportamento autônomo bastante realista, principalmente em regiões menores onde a interação entre os entes do sistema exerça um papel importante como curvas, gargalos e escadas. Sendo assim, os modelos microscópicos mais comuns serão explicados mais detalhadamente a seguir.

3.2.2.1. MODELOS DO AUTÔMATO CELULAR (“CELLULAR AUTOMATA - CA”)

O modelo CA (Dijkstra et al.) é uma abordagem de inteligência artificial para simular modelos definidos como idealizações matemáticas de sistemas físicos, em que espaço e tempo são discretos e quantidades físicas assumem um conjunto finito de valores discretos. Um autômato celular consiste em uma grelha (arranjo 2D) com uma ou mais variáveis discretas em cada posição (células) (Figura 4). Paredes e outros obstáculos fixos são pretos, enquanto as posições brancas podem ser ocupadas por pedestres.

Figura 4: Representação de uma simulação de pedestres (esquerda) e arranjo 2D com suas diversas possibilidades



Fonte: Pelechano, Allbeck, Badler.

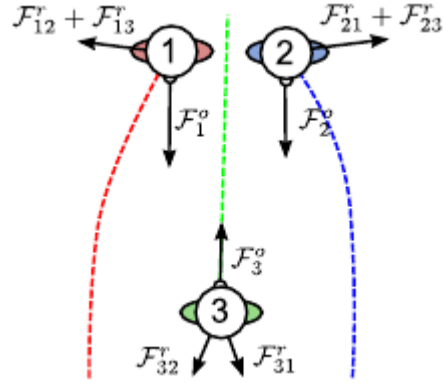
O estado de um autômato celular é completamente especificado pelos valores das variáveis de cada célula. Um autômato celular se desenvolve em espaços de tempo discretos, com o valor da variável de cada célula sendo afetado pelos valores das variáveis das células vizinhas. A variável de cada célula é atualizada simultaneamente, baseado nas variáveis ao seu redor num tempo anterior e de acordo com um conjunto de regras locais (Wolfram 1983). Estas regras definem a tomada de decisão do autômato, assim criando e emulando o comportamento real. Cada autômato avalia as oportunidades caso a caso. O comportamento grupal é resultado das interações de regras locais, enquanto cada pedestre examina as células disponíveis ao seu redor.

Os modelos CA apesar de rápidos e simples de implementar não permitem contato entre os agentes. O espaço é discreto, e os indivíduos só podem se movimentar para uma célula adjacente vazia. Desta forma, esta abordagem oferece resultados realistas para grupos de pequenas densidades (Loscos et al.).

3.2.2.2. MODELO DE FORÇAS SOCIAIS

O modelo de forças sociais proposto por Helbing em 1995 é baseado no conceito de que mudanças comportamentais de indivíduos são consequências de uma força social externa, que afeta a motivação do indivíduo e determina suas ações. Ver Figura 5.

Figura 5: Esquema da interação das forças



Pedestres são modelados como círculos e possuem um destino que querem alcançar e uma certa velocidade que desejam manter. O movimento de um pedestre é determinado pela tendência a manter uma velocidade e direção e pelas perturbações geradas pela presença de outros pedestres e barreiras físicas.

A Equação 1 de movimento para um pedestre i é, de uma forma geral:

$$\frac{m_i dV_i}{dt} = F_i^{(pers)} + F_i^{(soc)} + \Delta_i(t) \quad (1)$$

Onde m_i é a massa de i e V_i é sua velocidade. A tendência a manter a velocidade desejada $V_i^{(0)}$ é expressa pelo termo $F_i^{(pers)}$, que é dado por (Equação 2):

$$F_i^{(pers)} = \frac{m_i(V_i^{(0)} - V_i)}{\tau_i} \quad (2)$$

Onde τ_i é o tempo de reação de i .

O termo $F_i^{(soc)}$ é a sobreposição de dois termos e descreve a influência do ambiente. Um termo ($F_i^{(pers)}$) expressa a interação entre o pedestre com outros pedestres e o outro termo ($F_i^{(soc)}$) expressa a interação entre o pedestre e as barreiras físicas.

A interação com outros pedestres é descrita por um potencial repulsivo (tendo como fim evitar colisões) e por um potencial atrativo (tendência a aproximar-se de pessoas de interesse).

A Equação 3 descreve a força repulsiva entre dois pedestres i e j é dada por:

$$F_{ij}^{(rep)} = A_i \exp\left[\frac{(r_{ij} - d_{ij})}{B_i}\right] n_{ij} \quad (3)$$

Onde:

A_i e B_i são constantes que indicam, respectivamente, a força e o alcance da interação.

r_{ij} é a soma dos raios dos pedestres que são modelados como círculos.

d_{ij} é a distância entre os centros de massa dos pedestres.

n_{ij} é o vetor normalizado apontando de j para i

A força repulsiva entre um pedestre e um obstáculo físico é dada de forma semelhante, porém ao invés de considerar o centro de massa do outro pedestre, considera-se o ponto mais próximo do obstáculo.

O termo $\Delta_i(t)$ é adicionado na Equação 1 como uma flutuação que inclui variações randômicas no comportamento do pedestre e serve para neutralizar situações em que duas alternativas seriam possíveis.

Há quatro parâmetros essenciais no modelo de forças sociais que devem ser calibrados para que o modelo se ajuste a realidade:

$V_i^{(0)}$ - velocidade desejada: é a velocidade que o pedestre mantém quando não é perturbado por outras pessoas ou obstáculos.

τ_i - tempo de reação: é o tempo que um pedestre leva para se adaptar à velocidade desejada.

A_i - intensidade de interação

B_i - alcance de interação

Os parâmetros $V_i^{(0)}$ e τ_i , apesar de dependerem de uma grande gama de fatores como motivo da viagem, faixa etária, sexo, horário, condições do local entre tantos outros, podem ser facilmente obtidos através de medições em campo, normalmente realizada com recursos de vídeo e posterior análise computacional dos dados. Devido à carência de tais ferramentas computacionais e de vídeo, este trabalho de formatura fez uso de medições empíricas de campo, com respaldo na bibliografia para calibrar os parâmetros de forma adequada.

Os parâmetros A_i e B_i são extremamente relativos e sua obtenção exige uma análise matemática e computacional complexa, que foge do escopo deste trabalho. Para a calibração de tais parâmetros foi feito um processo iterativo com base na bibliografia, onde os parâmetros foram definidos de forma a encontrar aquele que melhor simula a realidade. Para cada valor de A_i e B_i foram feitos testes de validação até que se encontrasse a situação em que a simulação computacional mais se aproximou da realidade.

Tabela 7: Parâmetros para o modelo de forças sociais.

		resource	
		Lakoba, Kaup [11]	Hoogendoorn, Daamen [6]
parameters	v_i^0 (m/s)	1.34	1.34 ± 0.21
	τ_i (s)	0.5	1.09 ± 0.35
	A_i (m ² s ⁻²)	$-m_i v_i^0 / \tau_i$	11.96 ± 0.23
	B_i (m)	0.5	0.16 ± 0.08
		Steiner, etc. [7]	Johansson, Helbing[8]
parameters	v_i^0 (m/s)	1.34	—
	τ_i (s)	0.5	—
	A_i (m ² s ⁻²)	2.25	0.42 ± 0.26
	B_i (m)	0.35	1.65 ± 1.01

Fonte: Tang e Jia (2011)

Os parâmetros do modelo de forças sociais foram estudados em diferentes trabalhos, por diferentes autores. Alguns valores encontrados estão na Tabela 7.

O *software* utilizado nas simulações deste trabalho é o Vissim / Viswalk, o qual utiliza o modelo de forças sociais como base na simulação.

3.2.3 VISSIM E VISWALK

Desenvolvido pela empresa alemã *Planung Transport und Verkehr* (PTV), o Vissim é um programa de micro simulação de veículos, contendo também algumas aplicações para simulação de pedestres. Porém, por tratar as pessoas como veículos, o Vissim se mostra uma ferramenta limitada para análise de fluxos de pedestres, uma vez que o fluxo de pedestres se dá de maneira mais imprevisível e complexa que o fluxo de veículos. Por este motivo, o PTV desenvolveu o Viswalk como uma extensão do Vissim, tornando possível a micro simulação de pedestres de maneira mais realista. Também é possível utilizar os dois módulos simultaneamente, simulando os pedestres no Viswalk e veículos no Vissim, permitindo a análise de como se dá a interação entre os pedestres e os veículos.

3.2.3.1. FUNCIONALIDADES

O Viswalk se baseia na construção de um modelo para estudo de diferentes cenários, com o objetivo de analisar e otimizar os fluxos de pedestres, tanto em locais fechados quanto abertos. A simulação no Viswalk permite a análise dos fluxos em diversas situações, levando em consideração fatores como as áreas de espera, as diferentes escolhas de rotas dos pedestres, o embarque e desembarque em veículos de transporte público, filas e gargalos.

A Tabela 8 mostra um comparativo entre as funcionalidades do Vissim e Viswalk na simulação de pedestres, além de dar uma ideia geral do que é possível simular com os programas.

Tabela 8: : Funcionalidades Vissim e Viswalk

	Possible in Vissim	Possible in Viswalk	Comments
Pedestrians walking on sidewalks	X	X	In Vissim simulated as vehicles on links. In Viswalk moving freely on links or areas.
Pedestrians walking on areas (open spaces)		X	
Pedestrians walking on construction elements (ramps, escalators)		X	
Pedestrians walking on different storeys		X	
Pedestrian interacting with vehicular traffic	X	X	In Viswalk only possible in combination with Vissim.
Pedestrians on unsignalized crosswalks	X	X	More complicated model setup in Vissim since the pedestrians are not able to meet each other on the same link.
Pedestrians on signalized crosswalks	X	X	More complicated model setup in Vissim since the pedestrians are not able to meet each other on the same link.
Pure large pedestrian volumes		X	Only Viswalk can deal with large volumes of pedestrians, such as in evacuation situations, airports and central stations.
Public Transport	X	X	Construction elements (areas as platform edges or waiting areas included) only possible in Viswalk.
Pedestrians meeting on the same link		X	Possible when the option "use as pedestrian area" in Viswalk is checked, see Section 3.2.1.2 for more information.
Dwell Time	X	X	Provided in both software programs, but in Vissim only for public transport. In Viswalk, queuing, waiting, etc. can be simulated.

Fonte: Cecilia Friis, Lina Svensson 2013

O *software* pode ser de extrema utilidade, tanto no projeto quanto na operação de edifícios, pois ajuda a analisar a capacidade e otimizar o uso do espaço, além de permitir análises mais detalhadas, como a influência de um obstáculo no fluxo e a formação de gargalos. Outra aplicação importante do Viswalk é na análise de situações de evacuação, onde pode-se determinar as melhores rotas para evacuação em situações de emergência.

Todas essas funcionalidades tornam o Viswalk uma ferramenta muito poderosa para o estudo de um terminal urbano, pois a simulação considera basicamente todas as situações que ocorrem no local, permitindo que o terminal seja simulado integralmente. Um exemplo de aplicação prática é a Estação Central de Amsterdam – Holanda. O *software* foi utilizado durante o projeto de ampliação da estação para localizar os pontos críticos que seriam mais afetados durante a construção. Dessa forma, puderam reorganizar os fluxos e redirecionar os trens de maneira otimizada durante as obras. (PTV Group, 2012). Ver Figura 6.

Figura 6: Simulação Viswalk



Fonte: PTV Group, 2012

3.2.3.2. PARÂMETROS

No Viswalk, além dos parâmetros utilizados no modelo de forças sociais são incluídos novos parâmetros.

Uma adaptação importante é feita na força de repulsão entre pedestres. Esta passa a ser calculada como a soma de duas parcelas:

$$F_1 = A_{iso} w(\lambda_m) n e^{\frac{-d}{B_{iso}}}$$

$$F_2 = \begin{cases} A_{mean} w(\lambda_m) n e^{\frac{-dm}{B_{mean}}} & , se 0 \leq \varphi \leq 180^\circ \\ 0, & caso\ contr\u00e1rio \end{cases}$$

Sendo o termo $dm = \frac{1}{2}\sqrt{((d + |d - (v_1 - v_0)VD|)^2 - |(v_1 - v_0)VD|^2)}$

Onde:

d - Distância entre as superfícies dos pedestres.

n – Vetor que aponta de um pedestre a outro.

v₀-Velocidade do pedestre influenciado.

v₁- Velocidade da pessoa que o pedestre observa.

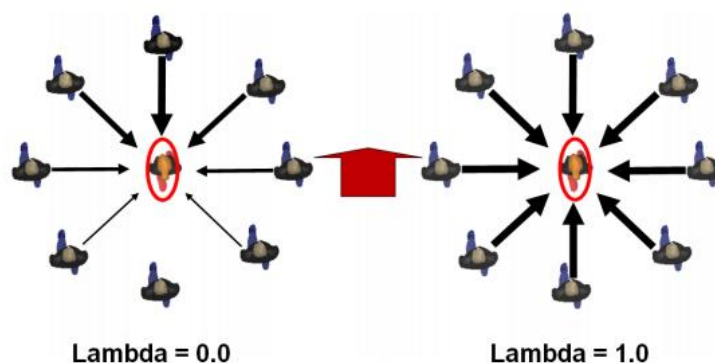
w(λ_m) – Função que suprime as forças quanto mais a pessoa observada está fora do caminho do pedestre.

Sendo d, n, v₀ e v₁ calculados pelo programa.

VD - Corresponde ao Δt do modelo de forças sociais. É o tempo que a pessoa observada leva para dar um passo.

λ_m (lambda_mean)- Corresponde a λ no modelo de forças sociais, é usado para ajustar a diferença na percepção de pessoas e objetos à frente em relação aos que estão atrás. Quanto maior o valor, maior a influência de pessoas atrás do pedestre. Ver Figura 7.

Figura 7: Efeito de lambda sobre interação de pedestres



Fonte: Manual VISWALK.

A_{iso} (A_soc_isotropic)- Determina a intensidade da força em (m²/s), na parcela da equação que considera apenas a distância entre a pessoa observada e o pedestre.

B_{iso} (B_soc_isotropic)- Determina o raio corporal do pedestre em (m), na parcela da equação que considera apenas a distância entre a pessoa observada e o pedestre.

A_{mean} (A_soc_mean)- Determina a intensidade da força em (m^2/s), na parcela da equação que considera a distância e a velocidade relativa entre a pessoa observada e o pedestre.

B_{mean} (B_soc_mean)- Determina o raio corporal do pedestre em (m), na parcela da equação que considera a distância e a velocidade relativa entre a pessoa observada e o pedestre.

Sendo VD , $lambda_mean$, $A_soc_isotropic$, $B_soc_isotropic$, A_soc_mean e B_soc_mean parâmetros ajustáveis pelo usuário com nomenclatura própria.

Além desses parâmetros, outros que podem ser variados no Viswalk são listados com sua nomenclatura própria e explicados abaixo:

Tau : Tempo de reação (τ_i no modelo de forças sociais) que um pedestre leva para se adaptar a velocidade desejada. Quanto menor o valor de tau, maior a aceleração.

Noise : Força aleatória correspondente a flutuação $\Delta_i(t)$ no modelo de forças sociais. É usado para eliminar condições de estabilidade em paradas.

React_to_n : Determina quantas pessoas próximas ao pedestre devem ser levadas em consideração nos cálculos.

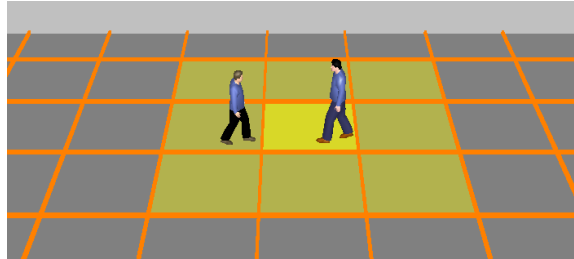
Queue_order : Controla o formato da fila. São usados valores entre 0,0 e 0,1 e quanto maior o valor, mais organizada é a fila.

Queue_straightness : Assim como o queue_order, também controla o formato da fila. São usados valores entre 0,0 e 0,1 e quanto maior o valor, mais organizada é a fila.

Side_preference : Determina se o pedestre tem preferência na ultrapassagem pela direita (valor -1), pela esquerda (valor 1), ou sem preferência (valor 0).

Grid_size : Define o tamanho da área de influência de uma pessoa ou obstáculo em relação ao pedestre.

Figura 8: Área de influência



Fonte: Manual VISWALK

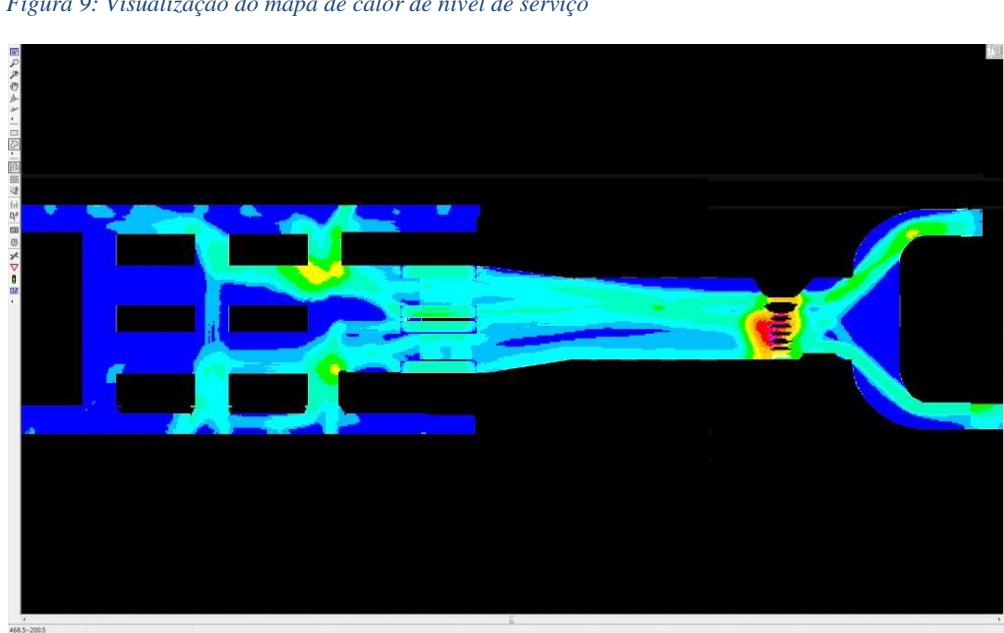
3.2.3.3. PARÂMETROS DE AVALIAÇÃO

O Viswalk permite a avaliação dos resultados das simulações através de uma grande quantidade de parâmetros. Os principais, que foram utilizados no trabalho de formatura, estão listados abaixo:

- **Tempo de viagem:** a medição do tempo de viagem é um parâmetro consolidado em análises de tráfego e está extremamente conectada à qualidade do serviço oferecido ao usuário. O programa permite analisar o tempo médio das viagens que ocorreram em um determinado intervalo de tempo.
- **Densidade:** a medição da densidade de pedestres em determinadas áreas é outro parâmetro presente na maioria das análises de fluxos. Com este valor pode-se inferir o nível de serviço das diferentes áreas do terminal durante um intervalo de tempo.

- Análise visual: além dos parâmetros numéricos o Viswalk possui um *output* visual, em duas ou três dimensões. Assistir às simulações é um método muito eficiente para obtenção de falhas no modelo e identificação dos pontos críticos, onde estão se formando gargalos. Também é possível se obter imagens coloridas de acordo com a densidade de pessoas em cada área.

Figura 9: Visualização do mapa de calor de nível de serviço



Fonte: PTV Group, 2013

3.2.3.4. CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO

A calibração do programa é um processo complexo devido à quantidade de parâmetros envolvidos e principalmente devido às diferenças comportamentais dos pedestres, que dependem de uma grande gama de fatores não mensuráveis (local, motivo da viagem, idade, sexo, etc). Dessa forma, não é possível utilizar valores padrão para todas as simulações. Para cada situação de estudo, é necessária a calibração dos parâmetros de forma a tornar o comportamento dos pedestres aderente à realidade.

A Tabela 9 mostra os valores iniciais utilizados pelo programa, bem como uma breve descrição de cada parâmetro:

Tabela 9: Valores padrão

Parameter	Denotation	Default value	Comment
Relaxation time	τ (tau)	0.4	Within which time a ped tries to reach desired speed and direction. Gives the acceleration
Anisotropy factor	λ (lambda)	0.3	Makes objects influence a ped differently much according to their locations. The influence depends on λ and the angle between the pedestrian's direction and the object
Strength of force between peds	A	$A_{soc_mean}=0.4$ $A_{soc_isotr}=1.6$	The social force between two pedestrians depends on A, B, λ , angle, the distance between the peds and the unit vector between them
Range of force between peds	B	$B_{soc_mean}=2.8$ $B_{soc_isotr}=0.2$	
Impact of relative velocity between peds	VD	3	If $VD > 0$, the relative velocities between two pedestrians influence the force between them
Noise	noise	1.2	Random force. This prevents pedestrians to get stuck. E.g. if two persons can't pass each other, after a while one of them will step back and let the other one pass.
Amount of pedestrians influencing	react_ to_n	8	When calculating the total force of a pedestrian, only the n closest pedestrians are influencing the force.
Side preference	side_ preference	0	This parameter enables you to define on which side pedestrians prefer to pass each other. If it is set to -1 the pedestrians prefer the right side, 1 gives left side preference and 0 gives uncontrolled behaviour.
Queue order	queue_ order	0.7	Two parameters that determines the shape of pedestrian queues. Can have values in the range 0.0-1.0, the larger value the more orderly queues.
Queue straightness	queue_ straightness	0.6	
Grid size	grid_size	5	Maximum distance of influence

Fonte: STINA ALEXANDERSSON, EMMI JOHANSSON 2013

3.2.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE A SIMULAÇÃO DE PEDESTRES

Com todo este arcabouço teórico sobre sistemas, modelos e simulação é possível estimar a dificuldade em simular pedestres.

Como dito anteriormente, uma atenção especial foi dada ao modelo de forças sociais de Helbing (1995) por ser este o modelo matemático sobre o qual se baseia o software Viswalk. O estudo mostrou que, por ser um modelo microscópico, apresenta um comportamento mais realista quando se foca em regiões mais discretas, onde a influência que um pedestre exerce sobre o outro é maior.

A partir da revisão bibliográfica, percebeu-se a importância do modelo ser fiel à realidade. Naturalmente, um pedestre não exerce uma força – utilizando o sentido literal da palavra aqui – no outro. Entretanto, este modelo é extremamente difundido e respeitado. Isto se deve ao fato de possuir uma simplicidade computacional, o que permite que um computador sem muito poder de processamento seja capaz de retornar resultados rapidamente, e por último, mas não menos importante, se bem calibrado ele retorna resultados extremamente aderentes com a realidade.

Prosseguindo, se faz necessário estudar o local que se deseja analisar. Entender demandas, gargalos e dificuldades para então realizar simulações e propor possíveis soluções.

4. ESTUDO DE CASO - ESTAÇÃO E TERMINAL PINHEIROS

A Estação e Terminal Pinheiros (aqui chamado apenas de Terminal Pinheiros para fins práticos) é um complexo de transporte urbano localizado no bairro de Alto de Pinheiros na cidade de São Paulo. É composto por três principais edifícios: A estação de trem, operada pela Companhia Paulista de Trens Metropolitanos (CPTM); a estação de metrô, operada pela ViaQuatro; o terminal de ônibus, operado pela São Paulo Transporte (SPTrans).

O bairro de Pinheiros é densamente ocupado e possui forte concentração de atividades comerciais. Grandes empresas, tais como Oderbrecht, Brasilinvest, Unibanco dentre outras possuem sedes no bairro. Além disso, está localizado ao lado da Avenida Marginal Pinheiros, uma das mais importantes da cidade.

A rede de metrô e trem da cidade de São Paulo possui capilaridade muito pequena, atendendo uma área muito reduzida frente ao tamanho da cidade. Na maioria dos casos os usuários dependem de mais de um modo de transporte para completar sua viagem (menos de 20% dos usuários da cidade completam suas viagens apenas utilizando o metrô, segundo pesquisa origem destino do metrô). Além disso, a baixa capilaridade causa aglomeração de demanda em estações e terminais que permitam a troca de linha ou o modo de transporte.

É fácil notar a importância de um complexo de transporte como o Terminal Pinheiros, que une três dos principais modos de transporte e está localizado em uma região de grande importância econômica para a cidade. Neste contexto o Terminal Pinheiros atua não só como mecanismo de transporte essencial para o funcionamento da cidade, mas também como polo gerador de demanda, que valoriza a região e dá ainda mais relevância para a mesma. Ver Figura 10.

Figura 10: Vista aérea do Terminal Pinheiros



Fonte: Google Maps

4.1. ESTAÇÃO DE TREM DA CPTM

A estação de trem da CPTM faz parte da Linha 9 – Esmeralda que se estende da estação Osasco, localizada no município de Osasco até a estação Grajaú na zona sul de São Paulo.

4.1.1. DIMENSÕES FÍSICAS

A estação é conjunta com a estação de metrô, sendo operada por ambas as companhias. As bilheterias são separadas, porém ambos os bilhetes valem para qualquer um dos dois modais. Uma vez passado o bloqueio, o usuário pode escolher qual modo utilizar. A plataforma de embarque se localiza entre a Avenida Marginal Pinheiros e o Rio Pinheiros e seu acesso só é possível através de uma passarela elevada de pedestres que passa por cima da Avenida Marginal.

Inicialmente a estação era no mesmo local da plataforma de embarque, porém com a construção da estação de metrô e união das estações, as instalações antigas foram desativadas e tornaram-se apenas locais de passagem e áreas de operação.

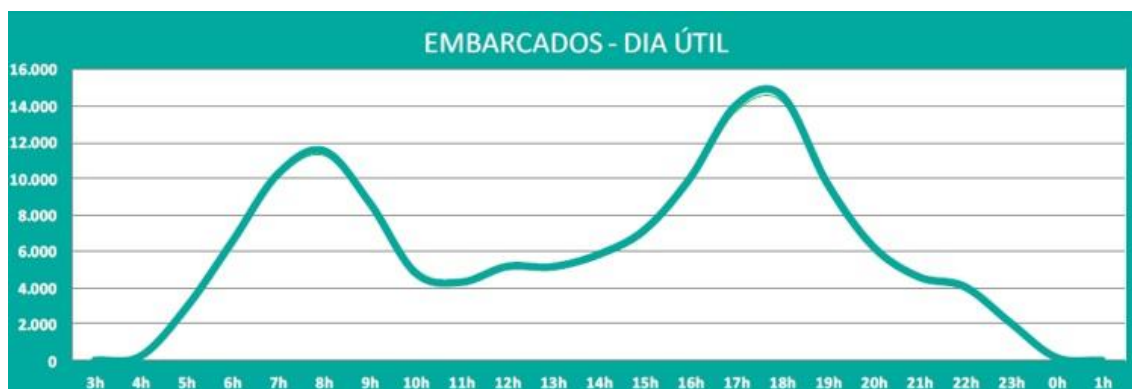
Com a chegada da estação de metrô houve uma grande ampliação nas áreas de circulação e a mudança de nível, antes feita apenas através de escadas normais, passou a ser feita com escadas rolantes na parte nova.

Antigamente o acesso era feito através de uma passarela elevada, sendo sua entrada onde hoje se encontra a estação de ônibus. Esta passarela encontra-se desativada, porém é fácil notar que sua utilização seria benéfica para o fluxo de pessoas do terminal, além de aumentar o conforto do usuário. A passarela permitiria que a troca de modal - ônibus-trem e vice-versa - fosse feita de maneira direta, sem a necessidade de entrar na estação principal de trem ou de metrô, de maneira a desafogar o fluxo na estação. Porém, o difícil diálogo entre os órgãos responsáveis e os custos implícitos na realização de uma nova bilheteria apenas para esta passagem impossibilitaram que a passarela continuasse operando.

4.1.2. FLUXO DE PESSOAS

Segundo a CPTM a Linha 9 – Esmeralda transporta em média 570 mil passageiros em um dia útil, sendo que 40% desta demanda ocorre apenas nos horários de pico (7h-9h e 17h-19h). A Estação Pinheiros é uma das principais estações da linha por permitir a troca de modo de transporte. Portanto, grande parte deste volume de passageiros passa pela Estação Pinheiros a fim de realizar a troca de modo de transporte, o que acaba muitas vezes reduzindo o nível de serviço à patamares inaceitáveis. Cerca de 220 mil passageiros passam pela estação diariamente, sendo 50 mil apenas nos horários de pico (CPTM , 2016).

Figura 11: Flutuação horária da quantidade de passageiros embarcados em um dia útil (março 2016)



Fonte: CPTM

Tabela 10: Quantidade de embarques e desembarques no trecho Grajaú - Osasco

Transportado Base: 2.683.106 Linha 9 - ESMERALDA (Dia útil)					
Trecho	Estação	Embarque	Desembarque	Carregamento	Passageiros / m2
OSA - PAL	OSA	35.373	0	35.373	1,3
PAL - CEA	PAL	38.470	221	73.622	2,8
CEA - JAG	CEA	2.746	2.751	73.618	2,8
JAG - USP	JAG	6.690	1.778	78.530	3,0
USP - PIN	USP	5.706	1.945	82.291	3,1
PIN - HBR	PIN	90.717	19.550	153.459	5,8
HBR - CJD	HBR	11.454	3.511	161.402	6,1
CJD - VOL	CJD	10.665	5.521	166.546	6,3
VOL - BRR	VOL	13.910	14.903	165.552	6,2
BRR - MRB	BRR	9.478	13.805	161.225	6,1
MRB - GJT	MRB	9.184	13.915	156.494	5,9
GJT - SAM	GJT	6.189	9.805	152.878	5,8
SAM - SOC	SAM	17.069	68.028	101.919	3,8
SOC - JUR	SOC	1.575	10.632	92.863	3,5
JUR - AUT	JUR	3.155	12.029	83.989	3,2
AUT - INT	AUT	922	5.703	79.209	3,0
INT - GRA	INT	245	10.145	69.309	2,6
	GRA	0	69.309	0	-
Total		263.550	263.550	166.546	6,3

Capacidade da Composição no Trecho: **2.015** Passageiros.
 Oferta do Trecho no horário: **159.185** Passageiros.

Fonte: CPTM

Tabela 11: Quantidade de embarques e desembarques no trecho Osasco - Grajaú

Transportado Base: 2.683.106 Linha 9 - ESMERALDA (Dia útil)					
Trecho	Estação	Embarque	Desembarque	Carregamento	Passageiros / m ²
GRA - INT	GRA	57.264	0	57.264	2,2
INT - AUT	INT	13.028	217	70.075	2,6
AUT - JUR	AUT	7.204	705	76.574	2,9
JUR - SOC	JUR	9.643	2.680	83.537	3,1
SOC - SAM	SOC	11.566	1.237	93.865	3,5
SAM - GJT	SAM	68.248	13.106	149.007	5,6
GJT - MRB	GJT	9.171	5.669	152.509	5,7
MRB - BRR	MRB	14.114	8.643	157.980	6,0
BRR - VOL	BRR	14.233	8.378	163.835	6,2
VOL - CJD	VOL	15.712	13.725	165.822	6,3
CJD - HBR	CJD	6.835	9.301	163.355	6,2
HBR - PIN	HBR	4.973	9.565	158.763	6,0
PIN - USP	PIN	21.742	87.425	93.080	3,5
USP - JAG	USP	2.859	5.269	90.670	3,4
JAG - CEA	JAG	2.822	6.486	87.007	3,3
CEA - PAL	CEA	2.931	2.939	86.999	3,3
PAL - OSA	PAL	205	60.835	26.368	1,0
	OSA	0	26.368	0	-
	Total	262.548	262.548	165.822	6,3

Capacidade da Composição no Trecho: 2.015 Passageiros.

Oferta do Trecho no horário: 159.185 Passageiros.

Fonte: CPTM

Como pode ser visto nas Tabelas 10 e 11 - em alguns trechos a quantidade de passageiros transportados diariamente excede a capacidade do trecho. A CPTM aceita, em horários de pico, níveis de serviço que equivalem a 6 passageiros/m² (classe F segunda classificação do FTA), o que já é bem crítico. Ainda assim, esse nível é ultrapassado, havendo trechos que operam com mais de 6 passageiros/m².

O fluxo na plataforma é grande, porém escoado de maneira rápida pelas inúmeras escadas, da nova e da antiga construção. As escadas abastecem o pavimento superior, onde se encontra a passarela de acesso.

Todo esse fluxo passa, obrigatoriamente, tanto para embarcar quanto desembarcar, pela passarela elevada de acesso, o que a torna, numa primeira análise, o elemento mais relevante no fluxo de pedestres do local.

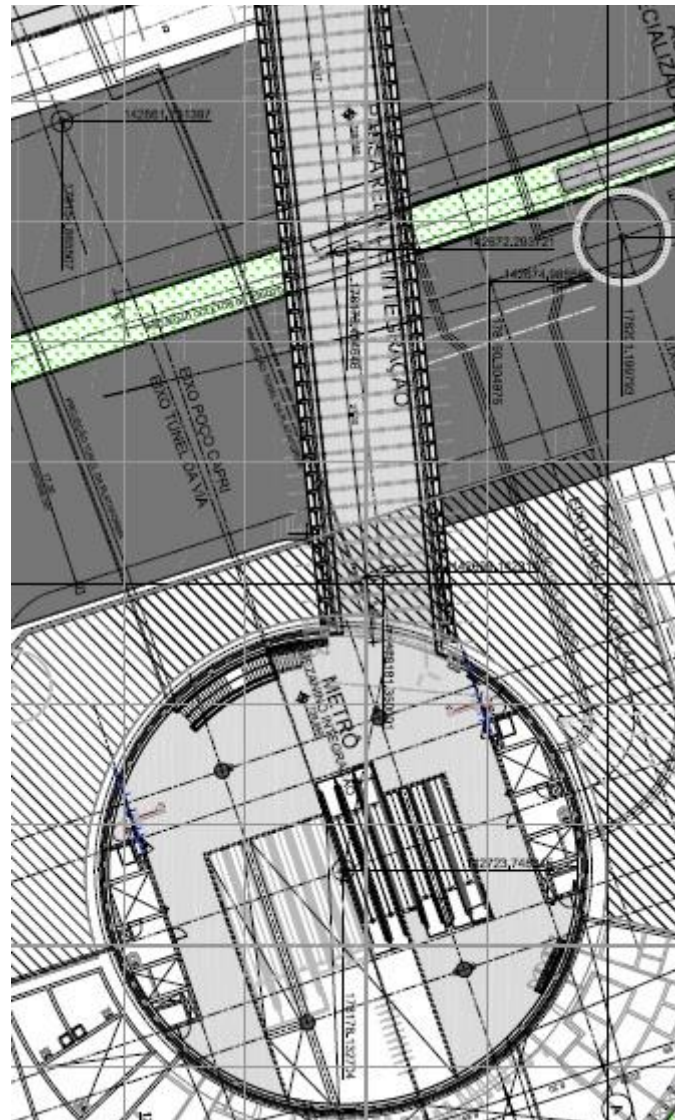
4.2. ESTAÇÃO DE METRÔ

A Estação Pinheiros do metrô faz parte da Linha 4 – Amarela, que começou a operar em maio de 2010 e ainda não está finalizada, restando ainda 4 estações para estar completa. A estação está muito próxima ao rio e o túnel de passagem do trem passa por baixo do mesmo, a cotas muito baixas, o que traz a necessidade de os usuários vencerem esse desnível para chegar à plataforma de embarque através de escadas e elevadores.

4.2.1 DIMENSÕES FÍSICAS

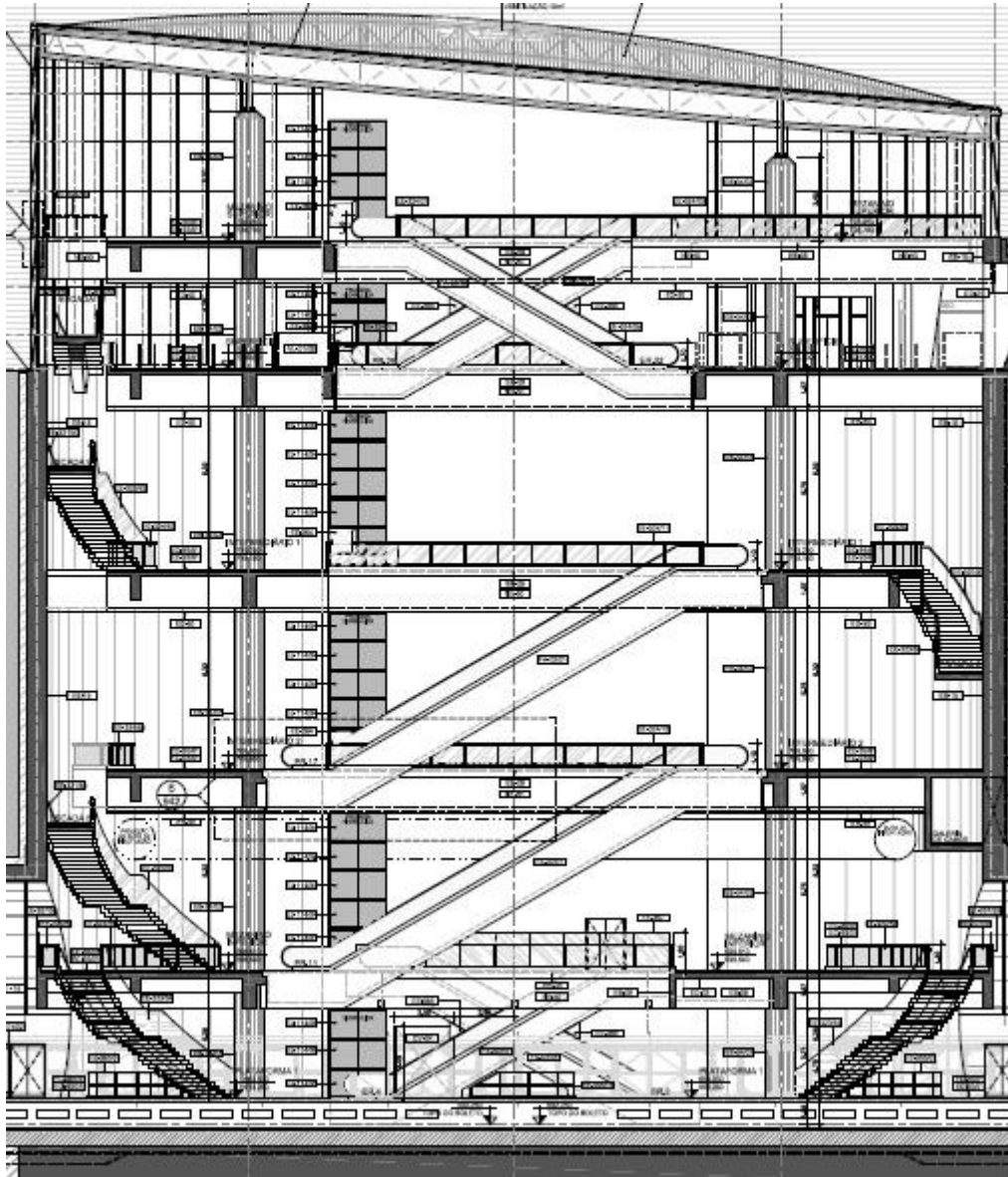
De forma simplificada pode-se descrever a estação como um grande cilindro de 20m de raio e 35m de altura (30m abaixo da superfície). Esse formato peculiar para uma estação se dá justamente pela necessidade de o túnel de passagem passar por baixo do Rio Pinheiros, o que impõe uma cota muito baixa para a plataforma de embarque, já que o transporte metroferroviário não consegue vencer grandes declividades e, portanto, o desnível deve ser vencido pelos usuários. Ver Figura 12.

Figura 12: Planta do pavimento superior e passarela de acesso à estação CPTM.



A estação possui 6 níveis, sendo o superior o mezanino - para acesso à estação da CPTM, no térreo fica a entrada principal e no inferior fica a plataforma de embarque. Ver Figura 13.

Figura 13: Estação em corte



4.2.2. FLUXO DE PESSOAS

Devido à sua arquitetura peculiar, o fluxo de pedestres na estação também não é usual. A fim de embarcar ou sair da estação, os usuários devem vencer diversos desníveis e percorrer pequenas distâncias horizontais, ou seja, o fluxo tem uma orientação mais vertical do que horizontal. Os desníveis são vencidos principalmente por escadas e escadas rolantes e, portanto, estas podem ser os elementos mais relevantes em uma análise do fluxo na estação. A análise do dimensionamento, disposição e parâmetros de operação das escadas se mostra como a ferramenta mais promissora na procura por uma melhoria no fluxo e no nível de serviço oferecido aos usuários.

4.3. TERMINAL DE ÔNIBUS

O terminal de ônibus operado pela SPTrans teve sua inauguração relativamente recente (julho de 2013) e é parte de um conjunto de projetos que compunham a Reconversão Urbana do Largo da Batata, que é uma região de grande importância para a cidade e, até então, não apresentava infraestrutura condizente com essa importância.

O terminal está localizado à beira da Marginal Pinheiros. A arquitetura do terminal é moderna, com grandes vãos e bastante espaço para circulação dos veículos e pessoas. A mudança de modo não é feita por uma ligação física direta, ou seja, o usuário deve circular por fora do terminal para acessar a passarela de acesso da estação de trem ou a entrada da estação de metrô, que é uma queixa dos usuários. O projeto inicial do terminal previa a união física dos três edifícios, de forma que o usuário pudesse trocar de modo sem a necessidade de sair de um edifício e entrar no outro, porém a falta de integração entre os órgãos responsáveis pelos projetos, o excesso de burocracia para tal e a necessidade de concluir-se as obras dentro do prazo impossibilitaram que o plano inicial obtivesse êxito. Ver Figura 14.

Figura 14: À direita: Terminal SPtrans; À esquerda: Estação do metrô e trem; Acima: Plataforma da CPTM



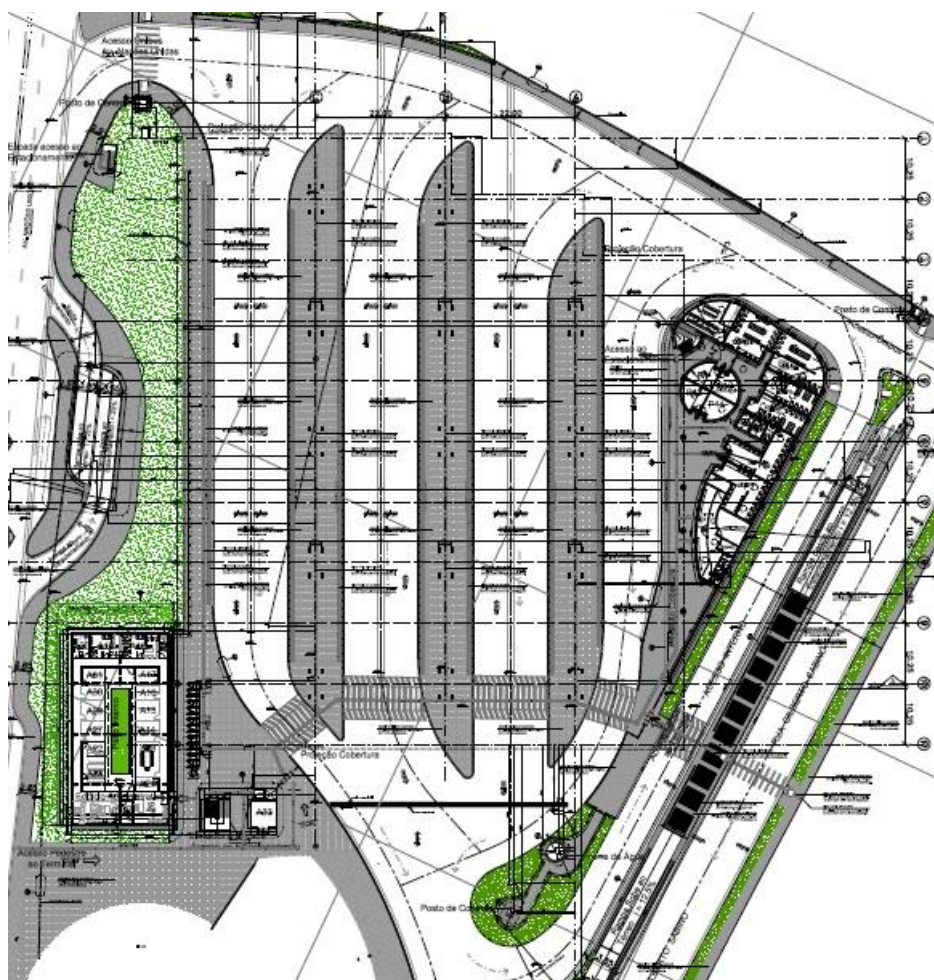
Fonte: Revista Arquitetura & Aço.

4.3.1. DIMENSÕES FÍSICAS

Como citado anteriormente, o terminal possui arquitetura bem moderna, com uma forte identidade visual. Os grandes vãos facilitam a circulação dos veículos e pessoas e permitem a entrada de iluminação natural durante grande parte do dia. A arquitetura do terminal é exemplar no que diz respeito ao fluxo de pessoas e conforto dos usuários. Fatores como iluminação natural e vãos de grande extensão, apesar de parecerem detalhes, são importantes na percepção do usuário, pois dão a impressão de um lugar espaçoso e um sentimento de maior conforto.

O terminal tem uma área construída total de 9000 m², sendo 8000 m² cobertos pela cobertura metálica, sustentada por uma estrutura de aço. No total, o terminal possui 500 m lineares de plataforma que servem de embarque e desembarque para diversas linhas de ônibus. Ver Figura 15.

Figura 15: Planta Terminal Pinheiros



4.3.2. FLUXO DE PESSOAS

O Terminal Pinheiros atende 27 linhas de ônibus municipais e intermunicipais que representam uma média de 123 ônibus por hora durante o funcionamento. Grande parte das linhas tem como destino final o próprio terminal e a Avenida Brigadeiro Faria Lima, que é um dos maiores polos econômicos da cidade. O terminal foi projetado para atender até 80 mil passageiros por dia.

O embarque e desembarque dos passageiros é realizado nos canteiros centrais, sendo necessário atravessar as ruas da estação para sair da mesma. A travessia dos pedestres acontece de forma controlada e todo o Terminal de ônibus flui bem sem que ocorra demanda excessiva no local.

Por se tratar de um terminal de ônibus, o fluxo de passageiros difere do fluxo em estações de trem e metrô, sendo mais irregular e seguindo padrões probabilísticos que dependem do número de chegadas e saídas de ônibus no período de tempo analisado. Em estações de trem ou metrô, a chegada de um trem carregado é acompanhada de um grande fluxo de pessoas embarcando e outro desembarcando, de forma que todo esse fluxo deve ser escoado de maneira conjunta através das estruturas da estação. O terminal de ônibus apresenta números variáveis de chegadas e saídas em diferentes períodos de tempo e, portanto, não possui essa regularidade no fluxo. O fluxo é feito de maneira mais constante e não em grandes contingentes de uma só vez, uma vez que a chegada ou saída de um ônibus não é relevante frente ao fluxo total. Além disso, os horários de chegada e saída dos ônibus dificilmente são seguidos de maneira exata, o que traria certa regularidade ao fluxo. Dessa forma, o fluxo varia probabilisticamente com a quantidade de ônibus chegando e saindo do terminal em determinado momento.

A análise dos fluxos no terminal eram parte do escopo inicial do trabalho, porém num momento mais avançado decidiu-se focar na estação de trem e metrô, por ser a parte do complexo de transporte mais relevante no fluxo de pedestres.

4.4. LOCAL DE SIMULAÇÃO

Como dito anteriormente, o objetivo deste trabalho é avaliar o fluxo de pedestres no terminal, com base em conhecimentos teóricos de dimensionamento de terminais e níveis de operação e utilizar o auxílio de ferramentas computacionais de simulação para enriquecer esta análise e possibilitar a proposição de soluções.

Inicialmente o plano do trabalho era realizar simulações de áreas distintas do terminal e uma posterior análise individual de cada área. Porém o Viswalk se mostrou uma ferramenta muito poderosa e o domínio do programa permitiu que a estação fosse simulada inteiramente (com exceção da estação de ônibus da SPTrans). A simulação da estação como um todo é muito mais vantajosa em uma análise de fluxo, uma vez que as áreas menores e suas singularidades são simuladas, mas também se leva em conta a influência de uma área em outras, além de permitir uma análise geral do fluxo de maneira mais palpável.

Foi dada atenção especial às áreas identificadas como pontos chave do fluxo de pedestres, tais como a passarela de acesso à plataforma de trem, pela qual todos os passageiros que embarcam e desembarcam deste são obrigados a passar e as escadas rolantes, que levam todo o fluxo de pedestres do metrô.

O fluxo de pedestres em toda a estação é organizado com a utilização de barreiras móveis. As barreiras dividem os fluxos opostos, direcionam os pedestres e auxiliam nas curvas, muitas vezes forçando os pedestres a realizarem caminhos mais longos, porém mais eficientes. De acordo com a demanda de cada horário, as escadas rolantes funcionam em sentidos diferentes, de forma que mais escadas estejam disponíveis no sentido de maior demanda.

Na passarela, as barreiras, apesar de serem móveis, ficam sempre na mesma posição, dividindo o espaço de maneira desigual. O sentido CPTM – Metrô fica com mais espaço do que o sentido contrário, mesmo em momentos em que o fluxo horário no sentido oposto é maior (pico da tarde). Este é um fato um pouco contra intuitivo, porém um possível motivo é a diferença na forma como se dá o fluxo. No pico da tarde o sentido Metrô – CPTM possui um fluxo maior, porém esse fluxo se dá de maneira organizada e constante, enquanto o fluxo CPTM – Metrô ocorre de maneira irregular, havendo momentos de muita demanda e momentos em que a passarela fica vazia. A seguir estão descritos sucintamente os fluxos nos dois sentidos.

4.4.1. CPTM - Metrô

O fluxo de pessoas no sentido CPTM – Metrô é característico de uma estação metroferroviária. A chegada de um ou dois trens, simultaneamente, representa a chegada de um grande contingente de pessoas, com dificuldade para ser escoado, levando a formação de gargalos e uma diminuição nos níveis de serviço. Após esse período de grande fluxo, a passarela fica praticamente vazia nesse sentido, até que chegue um outro trem.

Outro fator que caracteriza o fluxo é o fato de existirem diversas escadas, da nova e da antiga estação, que permitem o acesso da plataforma à passarela. A grande quantidade de acessos permite que um fluxo muito grande (média de 350 passageiros por trem) chegue à passarela simultaneamente, gerando gargalos na entrada da mesma e na escada rolante na saída.

A primeira escada rolante funciona como um gargalo, e a quantidade de pedestres que segue para os níveis seguintes é igual à capacidade que a escada consegue transportar. Após vencer o primeiro desnível, os pedestres têm a opção de sair da estação ou seguir para o Metrô. Com o fluxo já filtrado pela primeira escada rolante, os pedestres seguem sem formar gargalos na entrada das demais escadas.

O fato da caminhada até o metrô ser relativamente longa (em torno de 7 minutos) e, no horário de pico, o intervalo entre os trens ser reduzido (aproximadamente 3 minutos) faz com que novos trens cheguem na estação antes que os pedestres, do trem anterior, tenham chegado ao metrô. As pessoas do trem atual, que andam mais rápido, acabam alcançando as pessoas mais lentas do trem anterior, criando a impressão de um fluxo constante e intermitente na chegada ao metrô.

4.4.2. Metrô - CPTM

O fluxo de pessoas no sentido Metrô – CPTM é muito semelhante ao descrito anterior. As primeiras escadas rolantes são gargalos, que hora ficam cheias, devido à chegada de um ou dois trens, e hora vazias, no intervalo entre os trens. A partir do segundo nível o fluxo vai se estabilizando e chega de maneira constante e intermitente na passarela de acesso à CPTM.

4.5. SIMULAÇÃO

4.5.1. CALIBRAÇÃO E ADERÊNCIA

Dada a dificuldade de tornar o modelo representativo da realidade, a calibração foi feita de maneira iterativa através da alteração dos parâmetros do modelo de forças sociais e das configurações do programa. Foram realizadas simulações com os valores padrão do programa e aos poucos se alteraram os parâmetros e configurações. Após cada conjunto de simulações fez-se um teste de validação, comparando os resultados com os dados obtidos em campo. A aderência de cada simulação foi testada por meio de uma análise dos indicadores listados abaixo:

- Tempo de viagem: Comparação entre o tempo médio de viagem (segundos) simulado e real em diferentes trechos.
- Análise visual: Devido à carência de ferramentas de imagem para obtenção de dados concretos do fluxo, tais como a distância média entre os pedestres e a densidade de pedestres em uma área, não foi possível a validação através de indicadores numéricos. Foi feita uma análise visual dos fluxos, real e simulado, com o objetivo de identificar eventuais diferenças perceptíveis à olho nu.

Para os tempos de viagem, a diferença máxima entre os valores reais e simulados foi definida em 15%. Quando este requisito foi cumprido para todas as rotas juntamente com uma análise visual satisfatória, considerou-se o programa devidamente calibrado.

Abaixo encontram-se as Tabelas 12 e 13 com os parâmetros alterados em cada situação destacados em verde, bem como os tempos de viagem (medidos e simulados) de diversas rotas ao longo da estação:

Simulações com valores padrão:

Tabela 12: Variáveis de calibração

VARIÁVEIS DA CALIBRAÇÃO										
Walking Behavior :	Tau	ReactToN	ASoclso	BSoclso	Lambda	AsocMean	BSocMean	VD	Noise	SidePref
	0,4	8	2,72	0,2	0,176	0,4	2,8	3	1,2	None
Walking Behavior nas escadas:	Tau	ReactToN	ASoclso	BSoclso	Lambda	AsocMean	BSocMean	VD	Noise	SidePref
	0,4	8	2,72	0,2	0,176	0,4	2,8	3	1,2	None
Desired Speed :	IMO 30 - 50 (M e F)									
Desired Speed nas escadas :	IMO 30 - 50 (M e F)									
Velocidade das escadas (m/s) :	Escada 0	0,5	Escada 1	0,5	Escada 2	0,5	Escada 3	0,5	Escada 4	0,5

Resultados:

Tabela 13: Resultados

	ROTAS	TRAVEL TIMES (seg)		MEDIDO / SIMULADO (%)
		MEDIDOS	SIMULADOS	
DESCENDO	Trajeto na passarela	48	72	67
	Fim da passarela até escada 5	23	18	126
	Escada 4	20	32	63
	Até escada 3	25	29	87
	Escada 3	30	39	77
	Até escada 2	21	19	109
	Escada 2	30	40	76
	Até escada 1	55	40	137
	Escada 1	30	40	74
	Até escada 0	13	8	156
	Escada 0	20	30	66
SUBINDO	Escada 0	20	31	66
	Até escada 1	32	91	35
	Escada 1	30	42	72
	Até escada 2	53	80	66
	Escada 2	30	40	74
	Até escada 3	26	26	100
	Escada 3	30	37	82
	Até escada 4	29	20	145
	Escada 4	20	31	65
	Até início da passarela	26	28	92
	Trajeto na passarela	47	50	94

Ajuste da velocidade das escadas:

Tabela 14: Variáveis de calibração

VARIÁVEIS DA CALIBRAÇÃO										
Walking Behavior :	Tau	ReactToN	ASoclso	BSoclso	Lambda	AsocMean	BSocMean	VD	Noise	SidePref
	0,4	8	2,72	0,2	0,176	0,4	2,8	3	1,2	None
Walking Behavior nas escadas:	Tau	ReactToN	ASoclso	BSoclso	Lambda	AsocMean	BSocMean	VD	Noise	SidePref
	0,4	8	2,72	0,2	0,176	0,4	2,8	3	1,2	None
Desired Speed :	IMO 30 - 50 (M e F)									
Desired Speed nas escadas :	IMO 30 - 50 (M e F)									
Velocidade das escadas (m/s) :	Escada 0	0,75	Escada 1	0,75	Escada 2	0,75	Escada 3	0,7	Escada 4	0,8

Resultados:

Tabela 15: Resultados

	ROTAS	TRAVEL TIMES (seg)		MEDIDO / SIMULADO (%)
		MEDIDOS	SIMULADOS	
DESCENDO	Trajeto na passarela	48	77	63
	Fim da passarela até escada 5	23	18	125
	Escada 4	20	20	99
	Até escada 3	25	28	91
	Escada 3	30	34	89
	Até escada 2	21	22	95
	Escada 2	30	27	111
	Até escada 1	55	47	116
	Escada 1	30	28	109
	Até escada 0	13	9	143
	Escada 0	20	21	97
SUBINDO	Escada 0	20	21	96
	Até escada 1	32	52	61
	Escada 1	30	49	62
	Até escada 2	53	113	47
	Escada 2	30	27	110
	Até escada 3	26	26	99
	Escada 3	30	27	112
	Até escada 4	29	24	121
	Escada 4	20	22	93
	Até início da passarela	26	34	75
	Trajeto na passarela	47	58	81

Ajuste na entrada das escadas:

Durante as simulações, percebia-se o conflito no fluxo de pedestres na entrada da escada: alguns pedestres tentavam descer a escada depois ingressar nela, esses pedestres tentavam descer enquanto a escada os empurrava pra cima e esses pedestres travavam o fluxo na escada. Foram feitas alterações na simulação para que esse problema não mais acontecesse.

Figura 16 - Imagem à esquerda mostra simulação antes do ajuste na entrada das escadas e imagem a esquerda mostra simulação após ajuste.

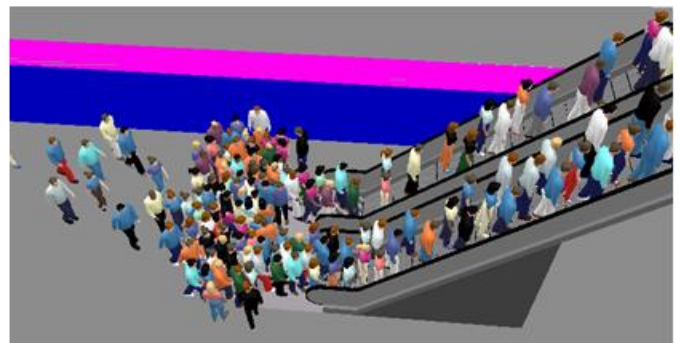
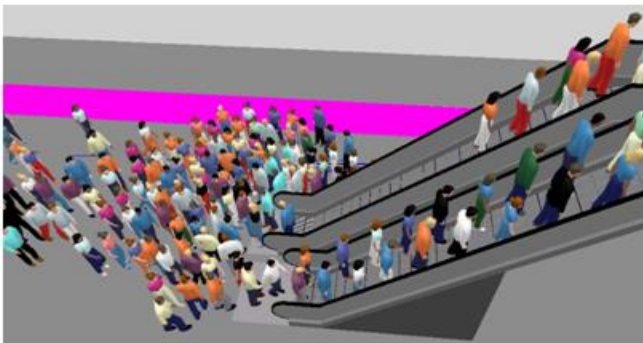


Tabela 16: Variáveis de calibração

VARIÁVEIS DA CALIBRAÇÃO										
Walking Behavior :	Tau	ReactToN	ASocIso	BSocIso	Lambda	AsocMean	BSocMean	VD	Noise	SidePref
	0,2	3	2,72	0,2	0,176	0,4	2,8	3	1,2	None
Walking Behavior nas escadas:	Tau	ReactToN	ASocIso	BSocIso	Lambda	AsocMean	BSocMean	VD	Noise	SidePref
	0,05	2	2,72	0,2	0,176	0,4	2,8	3	1,2	None
Desired Speed :	IMO 30 - 50 (M e F)									
Desired Speed nas escadas :	1.5 km/h									
Velocidade das escadas (m/s) :	Escada 0	0,75	Escada 1	0,75	Escada 2	0,75	Escada 3	0,7	Escada 4	0,8

Resultados:

Tabela 17: Resultados

	ROTAS	TRAVEL TIMES (seg)		MEDIDO / SIMULADO (%)
		MEDIDOS	SIMULADOS	
DESCENDO	Trajeto na passarela	48	64	75
	Fim da passarela até escada 5	23	18	127
	Escada 4	20	23	86
	Até escada 3	25	20	123
	Escada 3	30	31	96
	Até escada 2	21	15	137
	Escada 2	30	30	99
	Até escada 1	55	47	118
	Escada 1	30	31	96
	Até escada 0	13	11	117
SUBINDO	Escada 0	20	24	82
	Até escada 1	32	26	124
	Escada 1	30	31	96
	Até escada 2	53	57	93
	Escada 2	30	32	94
	Até escada 3	26	27	97
	Escada 3	30	30	99
	Até escada 4	29	24	120
	Escada 4	20	24	83
	Até início da passarela	26	33	79
Trajeto na passarela	47	61	77	

Ajuste visual:

Durante as simulações com os valores padrão, percebeu-se que os pedestres estavam andando muito próximos uns aos outros, e em uma fila relativamente organizada, fato que não acontece na realidade. Para corrigir esse comportamento, foram alterados os valores de A_{sociso} e B_{sociso} que dizem respeito à força exercida de um pedestre no outro e ao raio que um pedestre ocupa respectivamente. Os resultados podem ser observados nas figuras abaixo:

Figura 17- Antes do ajuste visual à esquerda e depois à direita.



Tabela 18: Variáveis de calibração

VARIÁVEIS DA CALIBRAÇÃO										
Walking Behavior :	Tau	ReactToN	ASoclso	BSoclso	Lambda	AsocMean	BSocMean	VD	Noise	SidePref
	0,2	3	5	0,7	0,176	0,4	2,8	3	1,2	None
Walking Behavior nas escadas:	Tau	ReactToN	ASoclso	BSoclso	Lambda	AsocMean	BSocMean	VD	Noise	SidePref
	0,05	2	2,72	0,2	0,176	0,4	2,8	3	1,2	None
Desired Speed :	IMO 30 - 50 (M e F)									
Desired Speed nas escadas :	1.5 km/h									
Velocidade das escadas (m/s) :	Escada 0	0,75	Escada 1	0,75	Escada 2	0,75	Escada 3	0,7	Escada 4	0,8

Resultados:

Tabela 19: Resultados

	ROTAS	TRAVEL TIMES (seg)		MEDIDO / SIMULADO (%)
		MEDIDOS	SIMULADOS	
DESCENDO	Trajetos na passarela	48	86	56
	Fim da passarela até escada 5	23	40	57
	Escada 4	20	23	86
	Até escada 3	25	35	71
	Escada 3	30	31	96
	Até escada 2	21	23	93
	Escada 2	30	30	99
	Até escada 1	55	55	100
	Escada 1	30	31	96
	Até escada 0	13	10	130
	Escada 0	20	23	87
	SUBINDO	Escada 0	20	23
Até escada 1		32	68	47
Escada 1		30	31	97
Até escada 2		53	93	57
Escada 2		30	32	94
Até escada 3		26	39	66
Escada 3		30	30	101
Até escada 4		29	30	95
Escada 4		20	23	87
Até início da passarela		26	34	77
Trajetos na passarela		47	59	79

Ajuste na velocidade desejada dos pedestres:

Tabela 20: Variáveis de calibração

VARIÁVEIS DA CALIBRAÇÃO										
Walking Behavior :	Tau	ReactToN	ASoclso	BSoclso	Lambda	AsocMean	BSocMean	VD	Noise	SidePref
	0,2	3	5	0,7	0,176	0,4	2,8	3	1,2	None
Walking Behavior nas escadas:	Tau	ReactToN	ASoclso	BSoclso	Lambda	AsocMean	BSocMean	VD	Noise	SidePref
	0,05	2	2,72	0,2	0,176	0,4	2,8	3	1,2	None
Desired Speed :	5 km/h +- 0,5									
Desired Speed nas escadas :	1.5 km/h									
Velocidade das escadas (m/s) :	Escada 0	0,75	Escada 1	0,75	Escada 2	0,75	Escada 3	0,7	Escada 4	0,8

Resultados:

Tabela 21: Resultados

	ROTAS	TRAVEL TIMES (seg)		MEDIDO / SIMULADO (%)
		MEDIDOS	SIMULADOS	
DESCENDO	Trajetos na passarela	48	56	86
	Fim da passarela até escada 5	23	23	98
	Escada 4	20	23	85
	Até escada 3	25	23	110
	Escada 3	30	31	96
	Até escada 2	21	20	107
	Escada 2	30	30	99
	Até escada 1	55	48	115
	Escada 1	30	31	96
	Até escada 0	13	11	113
	Escada 0	20	23	87
SUBINDO	Escada 0	20	23	87
	Até escada 1	32	29	110
	Escada 1	30	31	97
	Até escada 2	53	62	85
	Escada 2	30	32	94
	Até escada 3	26	29	89
	Escada 3	30	30	99
	Até escada 4	29	25	115
	Escada 4	20	23	87
	Até início da passarela	26	29	89
	Trajetos na passarela	47	54	87

4.5.2. SIMULAÇÃO DE CENÁRIOS

4.5.2.1. SITUAÇÃO ATUAL

Primeiramente foram realizadas simulações do cenário atual para análise e comparação com as outras situações. A seguir são apresentados os resultados:

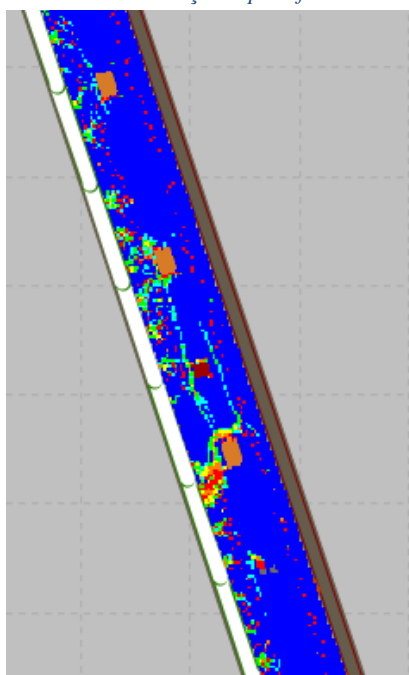
Tempo médio de viagem Metrô – CPTM: 418 segundos

Tempo médio de viagem CPTM – Metrô: 381 segundos

Número de pedestres na estação ao final da simulação (1700 segundos): 3.315

Níveis de serviço:

Figura 18: Nível de serviço na plataforma da CPTM



Nível de Serviço	Pessoas / m ²	
A	0 - 0,308	Blue
B	0,308 - 0,431	Cyan
C	0,431 - 0,718	Green
D	0,718 - 1,07	Yellow
E	1,07 - 2,153	Orange
F	>2,153	Red

Figura 19: Nível de serviço na passarela

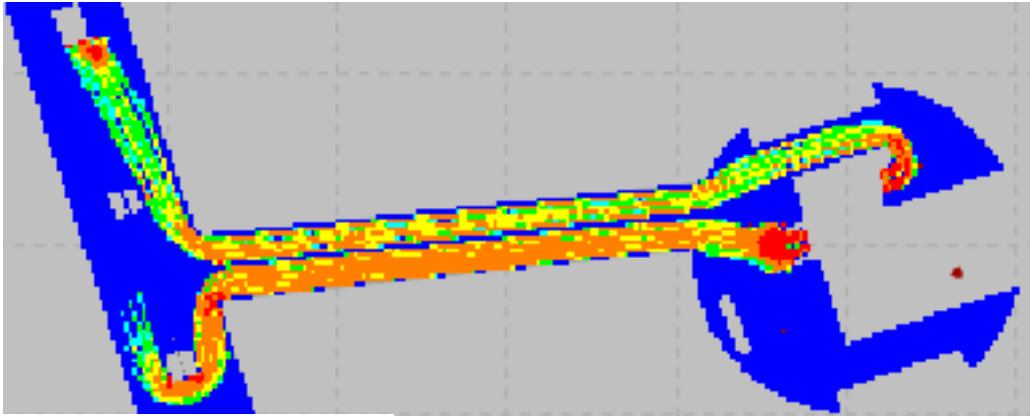


Figura 21: Nível de serviço no térreo

Figura 20: Nível de serviço no primeiro subsolo

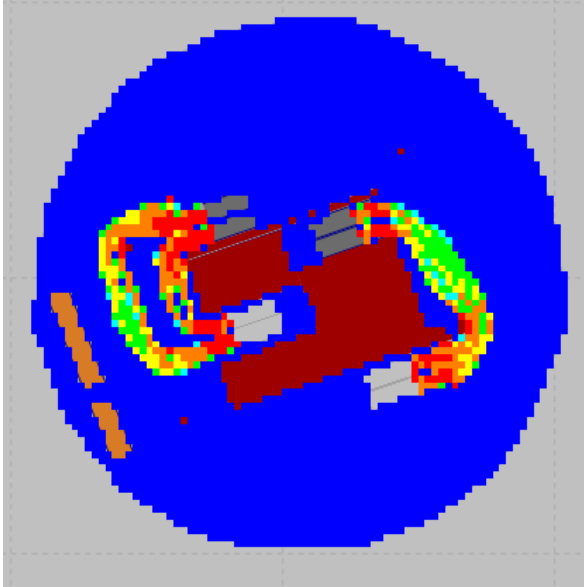


Figura 23: Nível de serviço no segundo subsolo

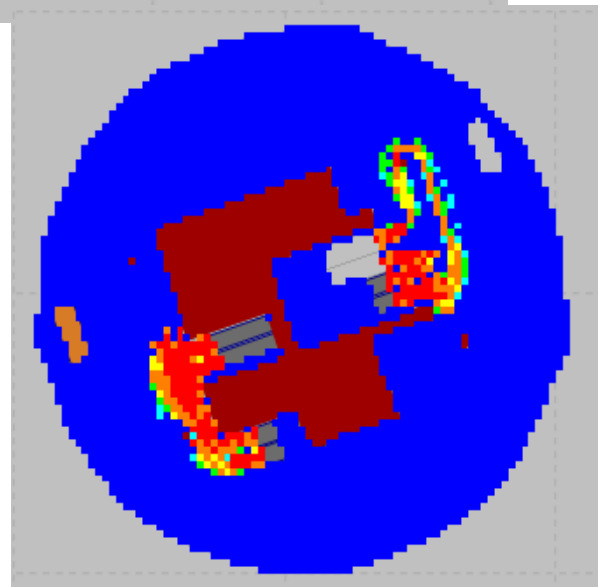


Figura 22: Nível de serviço no terceiro subsolo

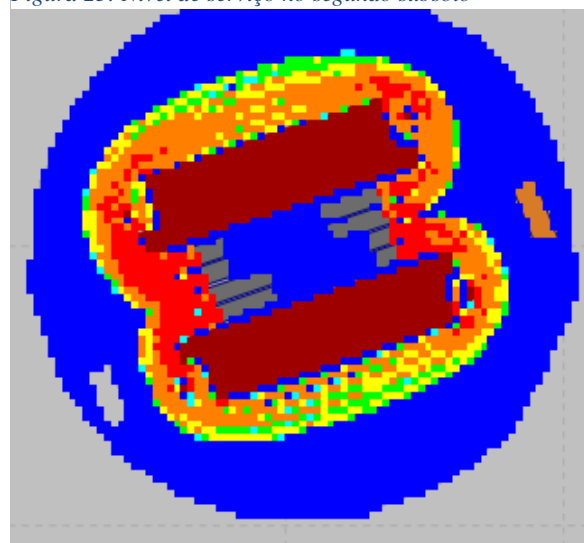
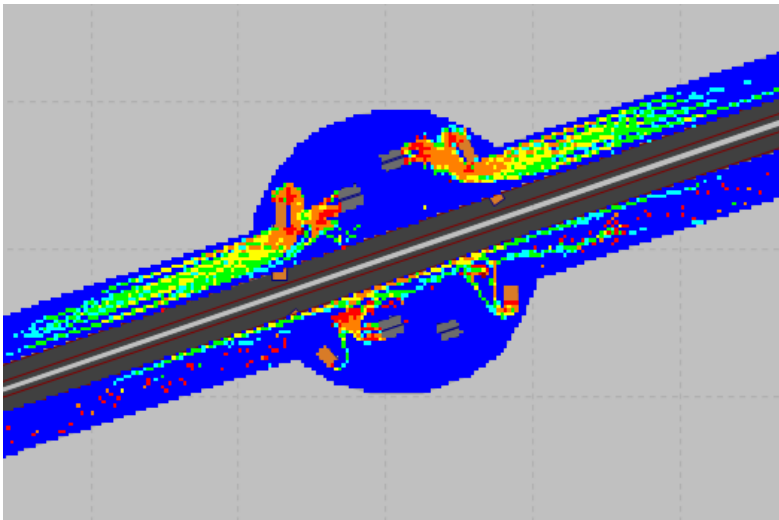


Figura 24: Nível de serviço na plataforma do metrô



Nível de Serviço	Pessoas / m ²	
A	0 - 0,308	Blue
B	0,308 - 0,431	Cyan
C	0,431 - 0,718	Green
D	0,718 - 1,07	Yellow
E	1,07 - 2,153	Orange
F	>2,153	Red

Como citado anteriormente, um dos elementos chave no fluxo da estação é a passarela de acesso, por onde todos os passageiros que fazem a integração Metrô – CPTM e CPTM – Metrô são obrigados a passar. A passarela é dividida por barreiras, que, apesar de serem móveis, ficam sempre na mesma posição, deixando mais espaço para o fluxo CPTM – Metrô. Um dos motivos já explicitados para tal fato é a diferença na natureza do fluxo. Enquanto o fluxo Metrô – CPTM chega de maneira mais constante, o fluxo contrário chega em grandes comboios. Esse fato pode ser observado com bastante clareza nos Gráficos 1 e 2.

Gráfico 1: Variação no fluxo de pessoas ao longo do tempo no sentido CPTM – Metrô. Passo de contagem de 10 segundos.

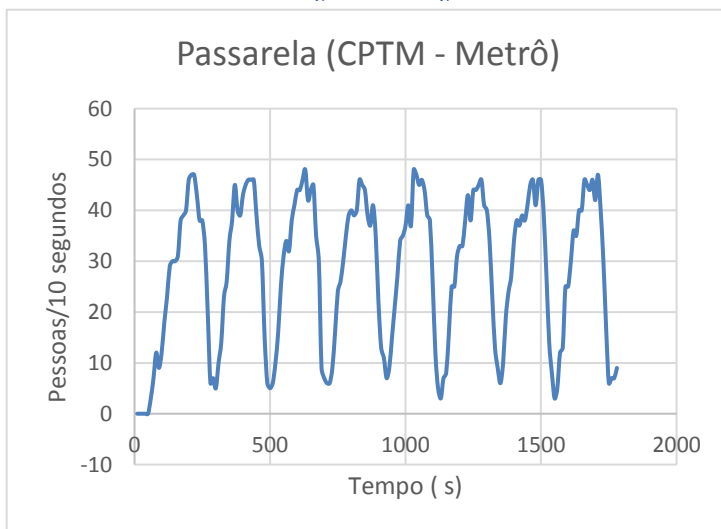
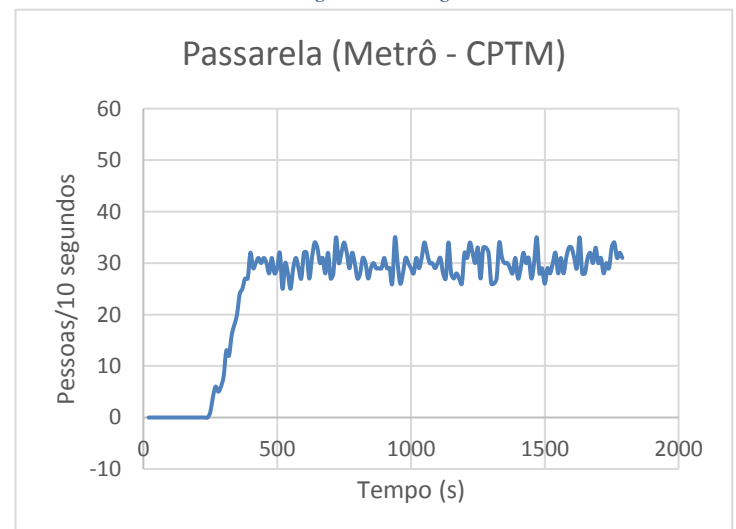


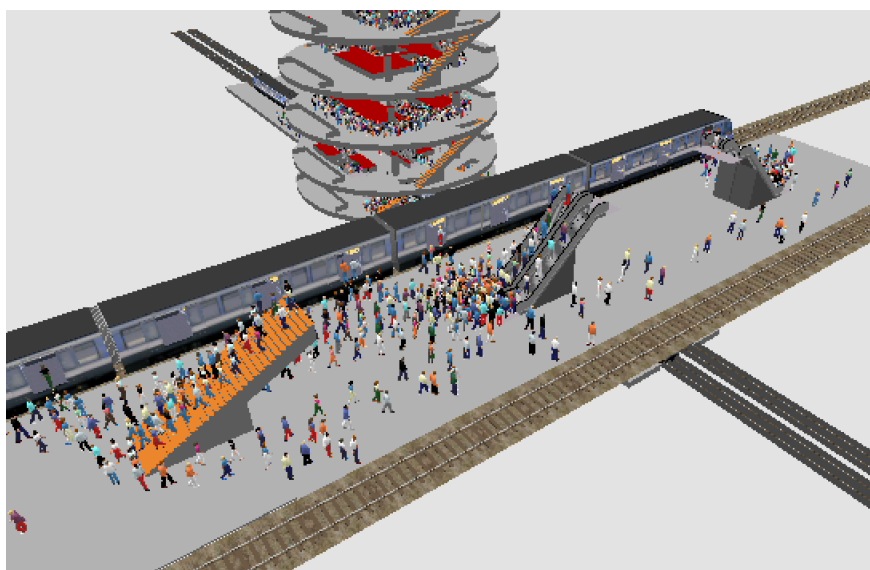
Gráfico 2: Variação no fluxo de pessoas ao longo do tempo no sentido Metrô - CPTM. Passo de contagem de 10 segundos.



Uma análise geral das simulações da situação atual da estação confirma aquilo que já era esperado. A estação, apesar de comportar o fluxo, apresenta diversos pontos críticos onde os níveis de serviço caem drasticamente no horário de pico. Vale lembrar aqui que a capacidade de uma estação é função do nível de serviço considerado aceitável. Quanto mais baixo o nível de serviço aceitável, maior será a capacidade. Em alguns pontos, já ocorrem níveis de serviço da categoria F, definida na seção 3.1.2: “velocidade e possibilidade de ultrapassagem extremamente restritas; constante contato involuntário com outros pedestres; movimento reverso ou cruzado impossível; fluxo esporádico e instável.”. Além disso, mesmo em áreas em que o fluxo escoar melhor, é possível observar níveis de serviço D e E, que também representam situações de desconforto para o usuário. Ver Figuras 18 até 24.

Tudo isso sugere que a estação está operando à níveis próximos de sua capacidade ou até mesmo acima da mesma. Nos próximos anos, a demanda tende a aumentar ainda mais, o que tornará essa situação ainda mais crítica, podendo passar de uma questão de nível de serviço e conforto dos usuários para uma questão de segurança.

Figura 25: Simulação do cenário atual



4.5.2.2. AUMENTO DE DEMANDA

Outro cenário simulado foi a operação do terminal, mas mesmas condições de hoje, porém considerando o aumento de demanda que ocorrerá nos próximos anos.

Ao estudar demandas passadas, é possível perceber que ela já teve um grande salto em sua demanda recentemente. Em 2010, apenas 5762 passageiros embarcavam por dia na Estação

Pinheiros. Em outubro de 2011, começou a ser feita a integração gratuita entre CPTM e Linha Amarela do Metrô, conseqüentemente o número de embarques na Estação escalou rapidamente. Em 2012, a Estação passou a ter 87440 embarques por dia. Ou seja, em dois anos, o número de embarque aumentou em mais de 15 vezes (Folha, 2017).

Entre janeiro e maio de 2016, devido à crise financeira, provavelmente, o metrô de São Paulo teve queda de aproximadamente 2% em sua demanda, em relação ao mesmo período de 2015. Entretanto, nesse mesmo intervalo de tempo, a ViaQuatro indicou ter aumentado o número de passageiros em 2% na Linha Amarela (Exame, 2017).

Considerando o histórico recente, espera-se que a Estação não tenha mais nenhum salto de demanda, como o ocorrido entre 2010 e 2012, pois esse foi devido a integração gratuita da CPTM ao Metrô. Porém espera-se que o crescimento da demanda seja consistente já que a Linha Amarela continuou aumentando seu número de passageiros, mesmo em meio à crise e ela ainda terá inauguração de outras estações num futuro próximo.

Além disso, previsões demográficas apontam que a população da Região Metropolitana de São Paulo (RMSP) continuará crescendo. A população atual é de 20,7 milhões e deve chegar a 22,1 milhões até o ano de 2030 (aumento de 6,7%), segundo o site da Fundação Sistema Estadual de Análise de Dados (SEAD). Esse crescimento populacional também incentivará a expansão da demanda por transporte público na RMSP.

Dada a dificuldade de se estimar o aumento de demanda para o Terminal Pinheiros em específico, o crescimento na demanda foi estimado a partir de dados da pesquisa de mobilidade do metrô encontrados nas Tabelas 23 e 24.

**EVOLUÇÃO DAS VIAGENS DIÁRIAS POR MODO PRINCIPAL
REGIÃO METROPOLITANA DE SÃO PAULO
1967, 1977, 1987, 1997, 2007 e 2012**



MODO	VIAGENS											
	1967		1977		1987		1997		2007		2012	
	(x 1.000)	%	(x 1.000)	%	(x 1.000)	%	(x 1.000)	%	(x 1.000)	%	(x 1.000)	%
Coletivo	4.894	68,1	9.580	62,8	10.455	56,1	10.473	51,2	13.913	55,3	16.144	54,3
Individual	2.293	31,9	5.683	37,2	8.187	43,9	9.985	48,8	11.254	44,7	13.595	45,7
Motorizado	7.187	100,0	15.263	100,0	18.642	100,0	20.458	100,0	25.167	100,0	29.739	100,0

Tabela 23: Série histórica do número de viagens realizadas por transporte coletivo

Gráfico 3: Previsão de demanda por transporte coletivo

Fonte: Metrô, 2012

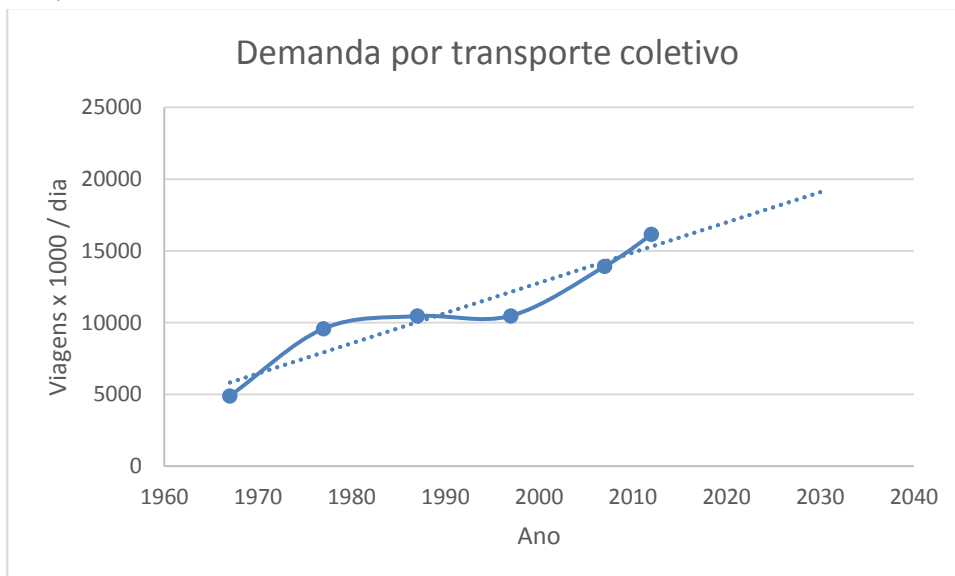
Tabela 22: Comparação do número de viagens por modal nas últimas duas pesquisas (2007 e 2012):

**VIAGENS DIÁRIAS MOTORIZADAS POR MODO PRINCIPAL
REGIÃO METROPOLITANA DE SÃO PAULO
2007 e 2012**



MODO PRINCIPAL	2007		2012	
	Viagens (x 1.000)	%	Viagens (x 1.000)	%
Metrô	2.223	8,8	3.219	10,8
Trem	815	3,2	1.141	3,8
Ônibus	9.034	35,9	9.383	31,6
Fretado	514	2,0	390	1,3
Escolar	1.327	5,3	2.011	6,8
Auto	10.381	41,2	12.351	41,5
Táxi	91	0,4	135	0,5
Moto	721	2,9	1.039	3,5
Outros	61	0,2	70	0,2
TOTAL	25.167	100,0	29.739	100,0

Fonte: Metrô, 2012



O Gráfico 3 sugere um crescimento de 18% na demanda total por transporte coletivo no período entre 2012 e 2030.

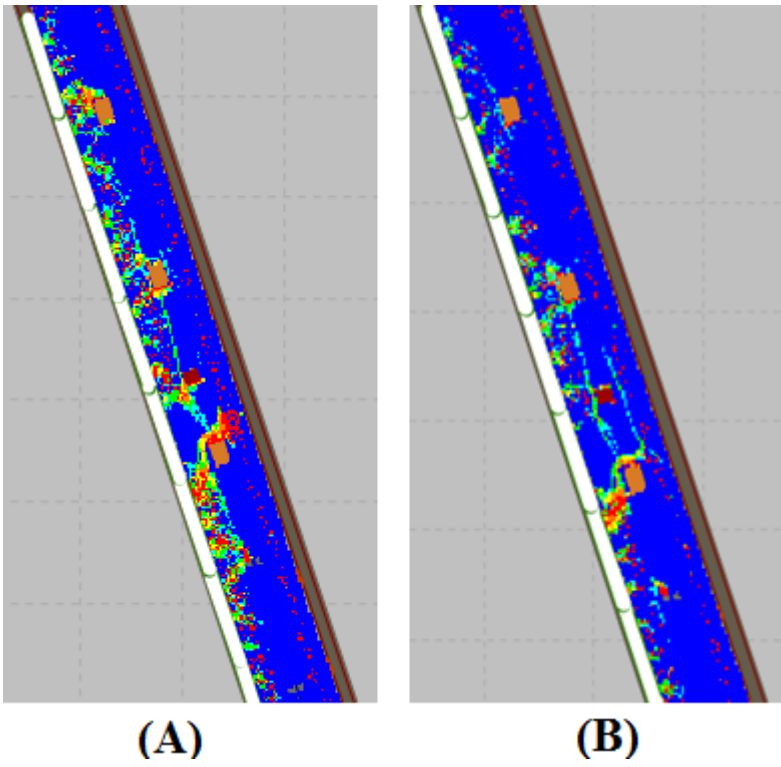
Entre os anos de 2007 e 2012, houve um aumento na demanda por transporte coletivo, sendo que as viagens realizadas com trem e metrô são responsáveis por 60% deste crescimento. Este valor, apesar de parecer alto, é explicado por uma malha metroferroviária ainda em expansão, bem como uma rede de ônibus já bastante saturada.

Projetando este mesmo percentual no aumento de viagens estimado até 2030, estimou-se que a demanda por trem e metrô na RMSP crescerá em até 40% até o ano de 2030.

Os resultados das simulações considerando este aumento de demanda, em comparação com a situação de controle encontram-se abaixo:

	Aumento de demanda	Controle
Tempo médio de viagem Metrô – CPTM:	460 segundos.	418 segundos.
Tempo médio de viagem CPTM – Metrô:	428 segundos.	381 segundos.
Número de pedestres na estação ao final da simulação (1700 segundos):	5.312	3.315

Figura 26: Nível de serviço na plataforma CPTM. (A) 2030 / (B) 2017



Nível de Serviço	Pessoas / m ²	
A	0 - 0,308	Blue
B	0,308 - 0,431	Cyan
C	0,431 - 0,718	Green
D	0,718 - 1,07	Yellow
E	1,07 - 2,153	Orange
F	>2,153	Red

Figura 27: Nível de serviço na passarela. (A) 2030 / (B) 2017

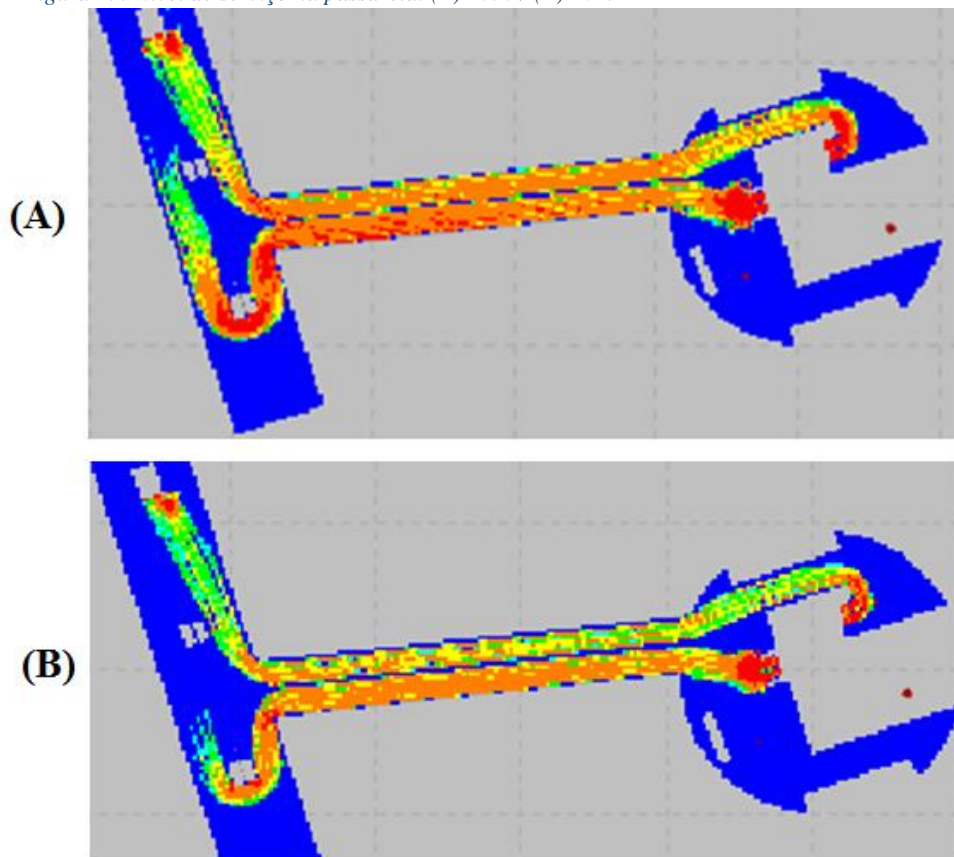


Figura 28: Nível de serviço no térreo. (A) 2030 / (B) 2017

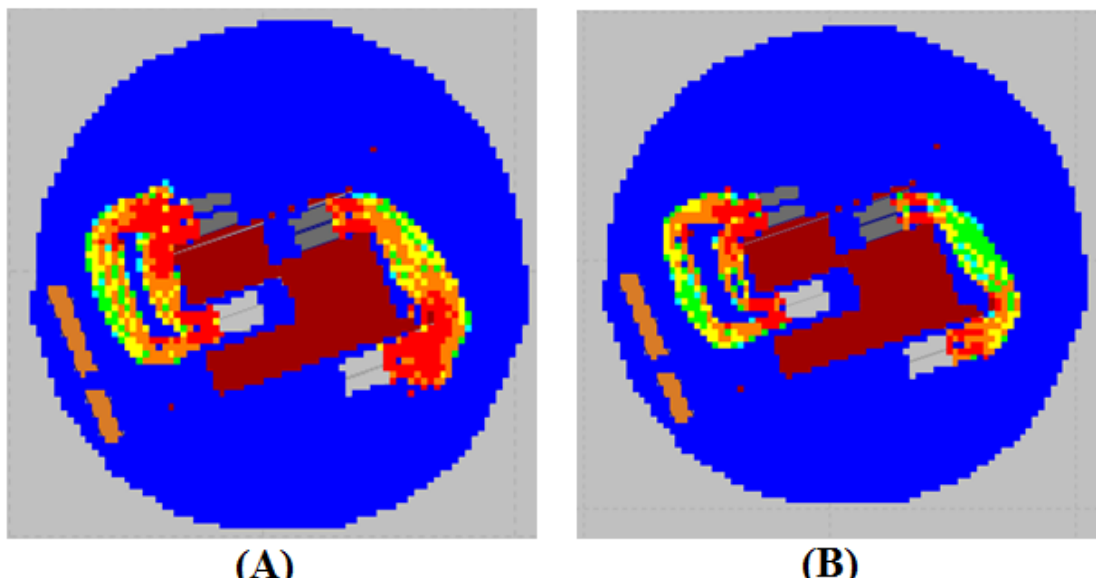


Figura 29: Nível de serviço no primeiro subsolo. (A) 2030 / (B) 2017

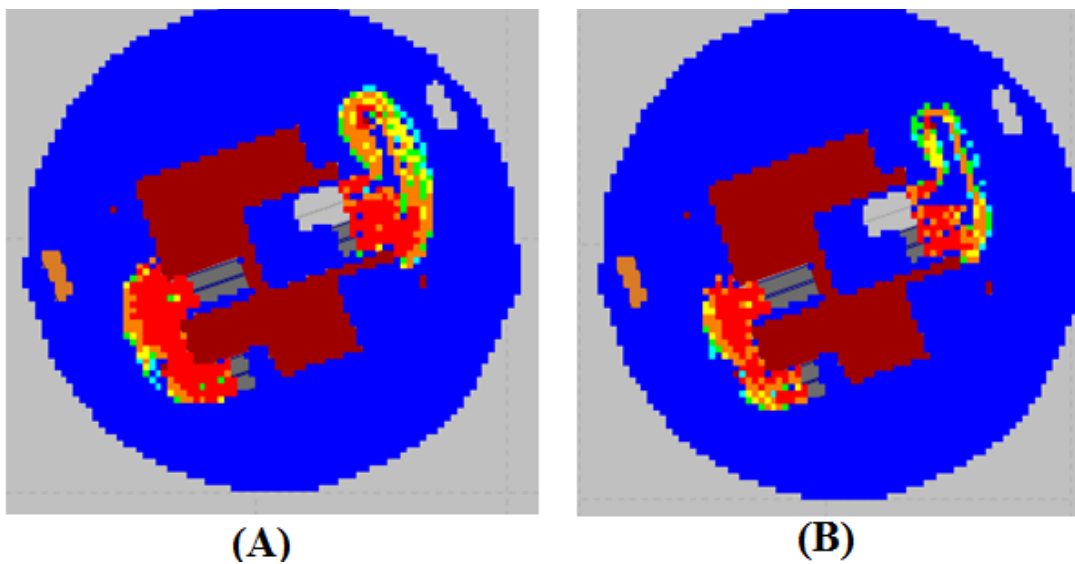


Figura 30: Nível de serviço no segundo subsolo. (A) 2030 / (B) 2017

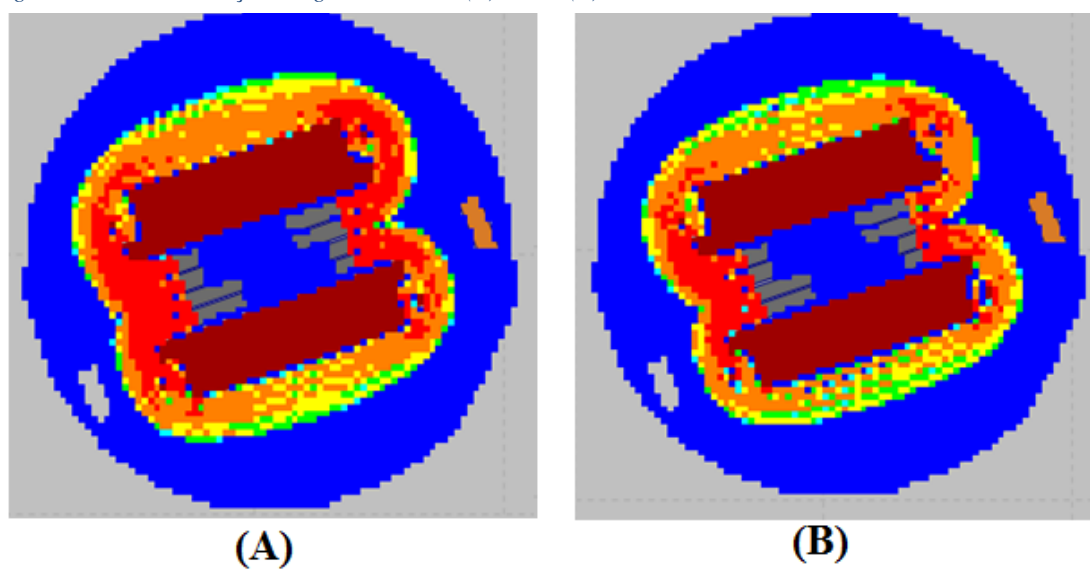


Figura 32: Nível de serviço no terceiro subsolo. (A) 2030 / (B) 2017

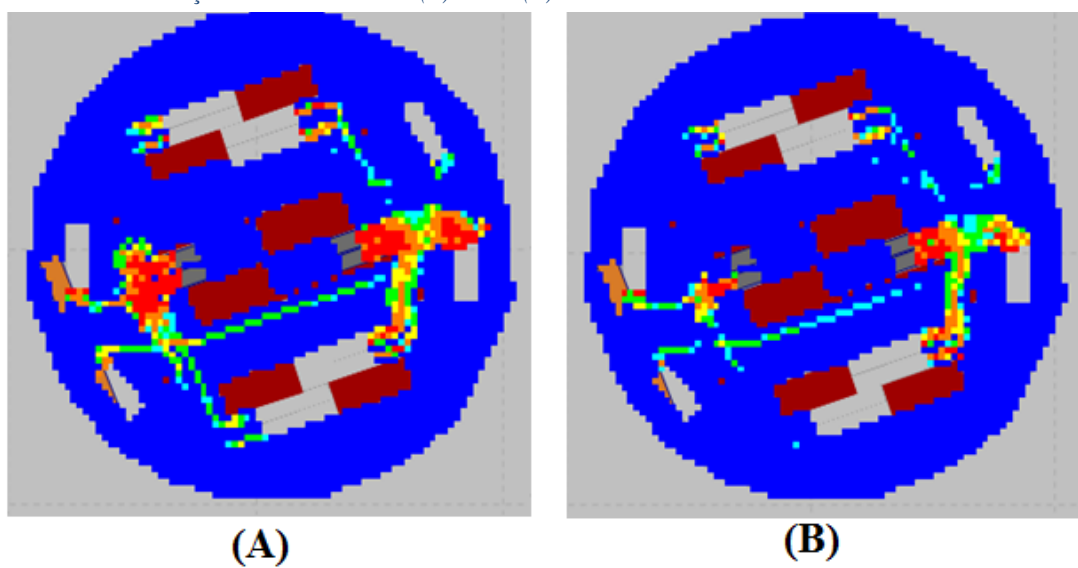
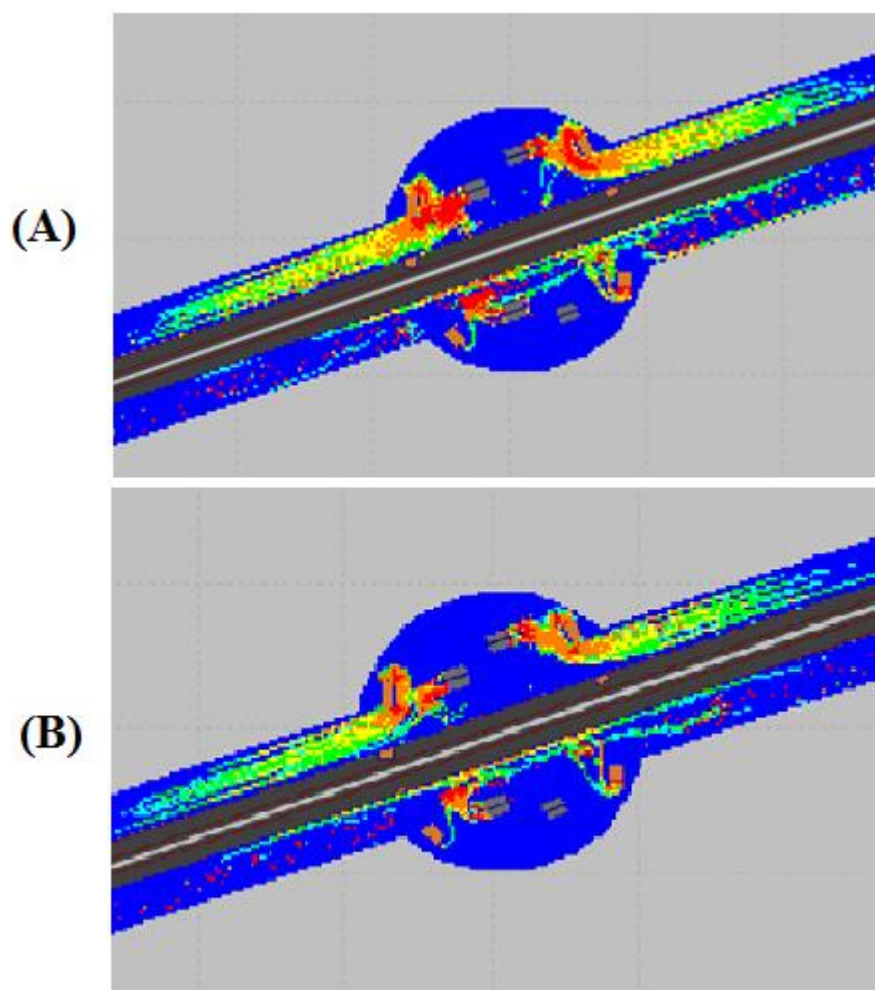


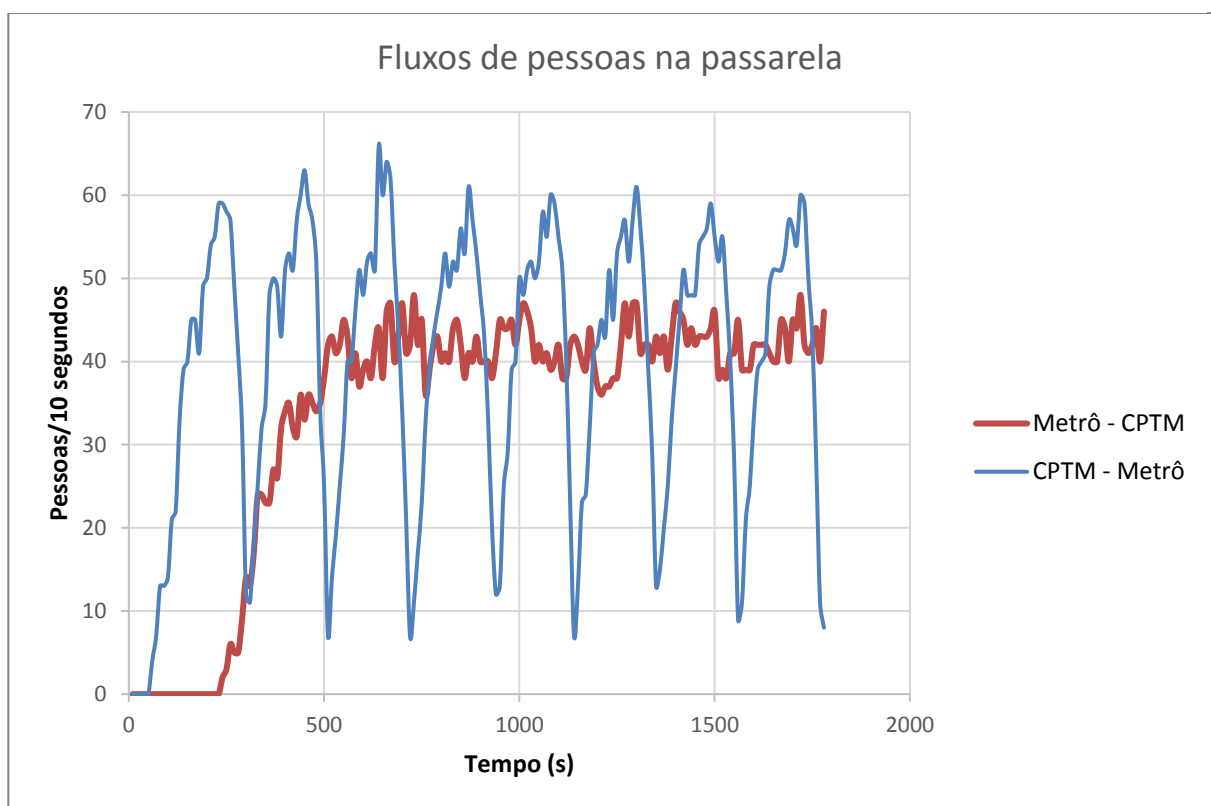
Figura 31: Nível de serviço na plataforma do Metrô. (A) 2030 / (B) 2017



Assim como esperado, o aumento na demanda causa a diminuição nos níveis de serviço em diferentes áreas do terminal e as áreas que já possuíam os piores níveis de serviço passam a ser maiores. Além disso, os tempos de viagem nos dois sentidos se tornam aproximadamente 10% maiores, ou seja, o usuário, além de estar numa pior situação, com níveis de serviço mais baixos, demora mais tempo para realizar o seu percurso e é obrigado a ficar mais tempo na situação de desconforto.

Com o aumento do número de pedestres, a passarela continua possuindo as mesmas características de fluxo, em termos de periodicidade. Modificando, entretanto, as amplitudes.

Gráfico 4: Variação nos fluxos na passarela. Passo de contagem de 10 segundos

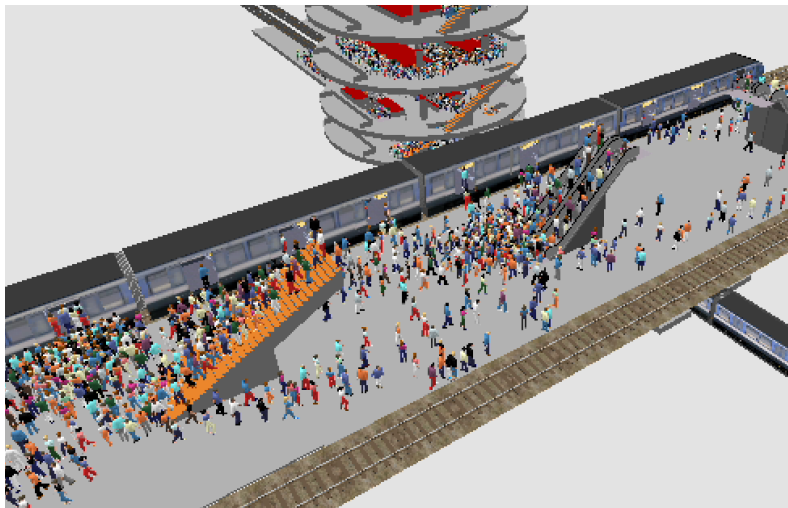


Outro fator importante a ser analisado é a quantidade de pessoas dentro do terminal em determinado momento. Na situação de hoje, o número de pessoas, dentro da estação, ao mesmo tempo, durante o período de pico é de aproximadamente 3.300 pessoas. No cenário de aumento de demanda este número salta para 5.300 pessoas. Essa é uma informação relevante não só para se ter uma ideia do tamanho do fluxo que ocorre no local, mas também para analisar a segurança do terminal. Não está no escopo deste trabalho a análise dos níveis de segurança do terminal, porém sabe-se que em situações de emergência, como incêndios, o prédio deve ser evacuado

de maneira rápida e eficiente e essa tarefa torna-se proporcionalmente mais difícil quanto maior for a quantidade de pessoas que deve ser escoada.

Dada a situação crítica que o terminal já se encontra e observando a previsão de que a situação só tende a piorar, outros cenários foram simulados a fim de encontrar pontos que podem ser melhorados na operação deste e na concepção de novos terminais semelhantes.

Figura 33: Simulação aumento de demanda



4.5.2.3. MENOR PERCURSO

Ao observar a configuração arquitetônica da Estação Pinheiros, foi possível perceber que as escadas e acessos nem sempre estavam o mais perto possível dos pedestres. Isso parecia culminar em percursos mais longos feitos pelos pedestres e, conseqüentemente, maior tempo de deslocamento dentro da estação.

Para verificar se a configuração arquitetônica atual não é a ideal, desenvolveu-se uma alternativa arquitetônica onde os pedestres saem de uma escada rolante e logo em seguida, sem precisar dar a volta na estação, já entram na próxima, tanto na subida quanto na descida. Usando essa alternativa com escadas e acessos em posições que buscavam menor deslocamento dos pedestres, simulou-se o fluxo de usuários da Estação Pinheiros.

A seguir encontram-se algumas imagens para exemplificar a concepção arquitetônica utilizada:

Figura 34: Configuração Atual

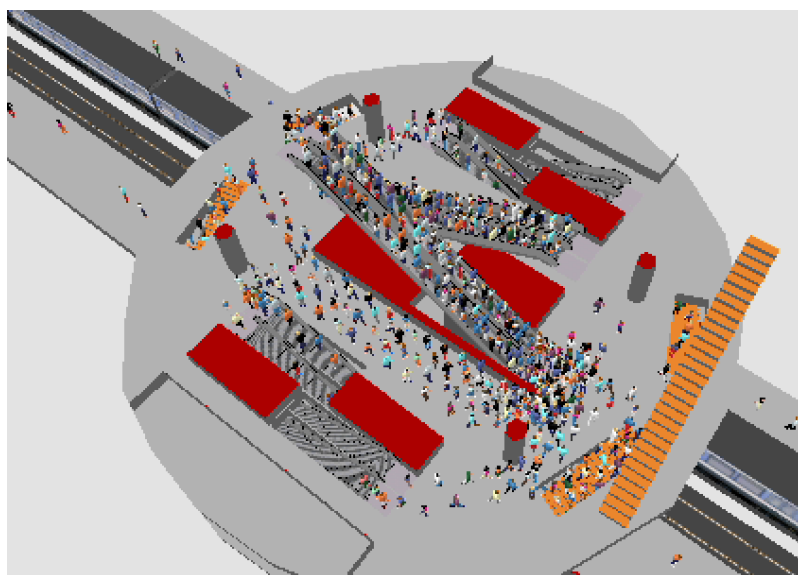


Figura 35: Configuração de Menor Percurso

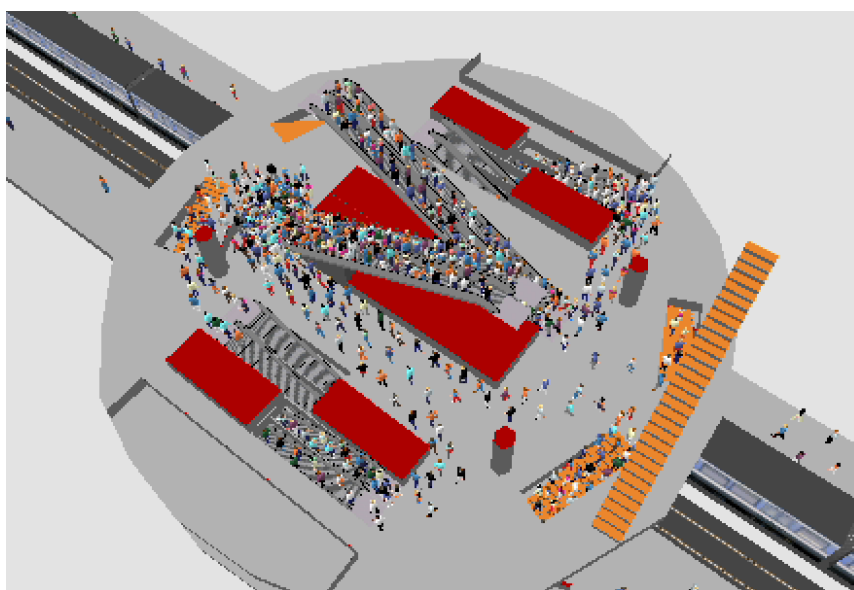


Figura 36: Simulação atual

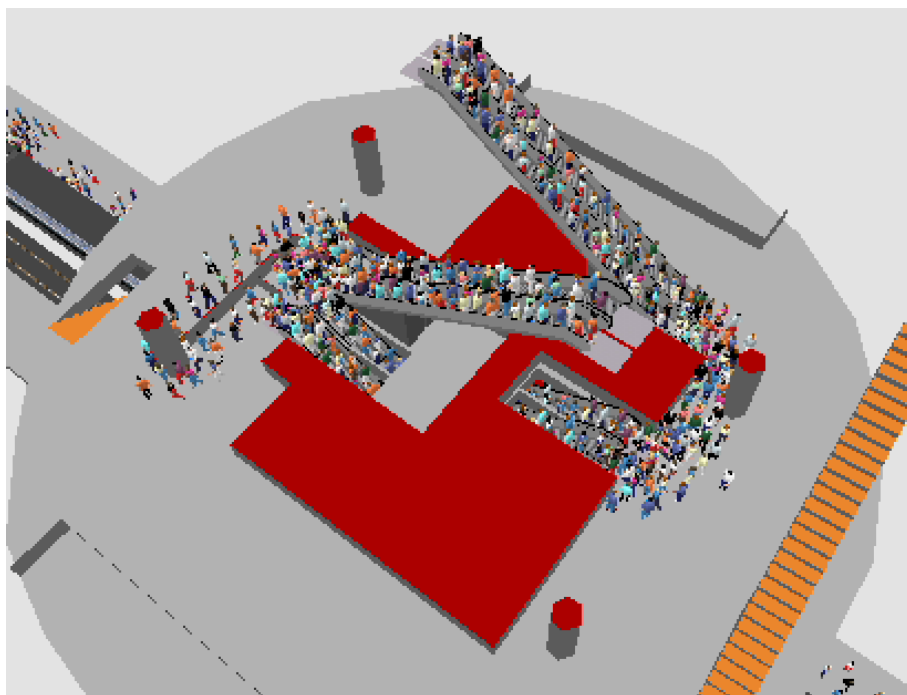
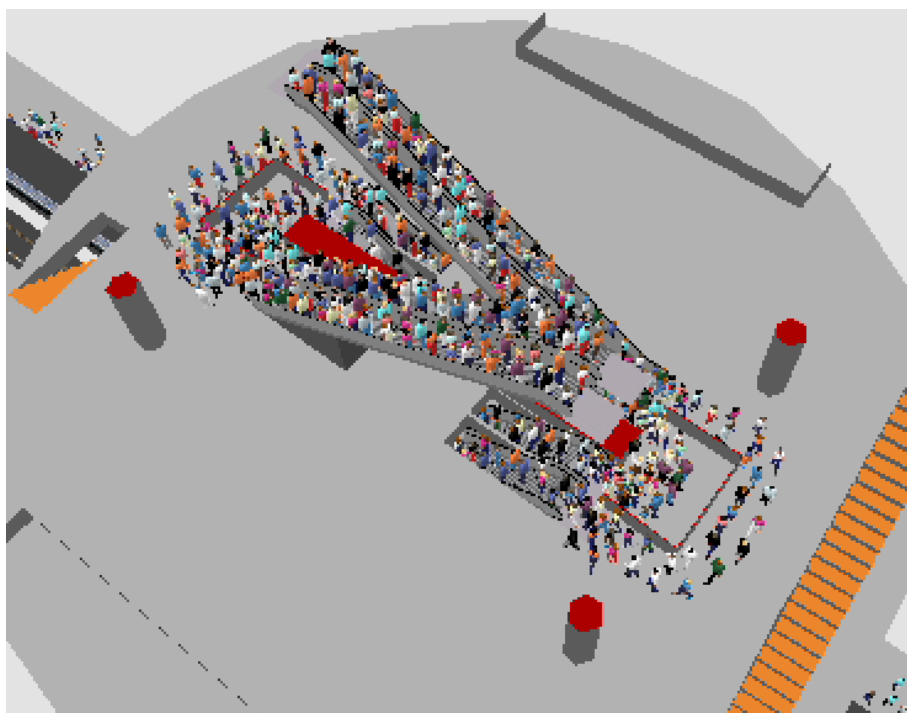


Figura 37: Simulação menor percurso



	Menor Percurso	Controle
Tempo médio de viagem Metrô – CPTM:	376 segundos.	418 segundos.
Tempo médio de viagem CPTM – Metrô:	353 segundos.	381 segundos.
Número de pedestres na estação ao final da simulação (1700 segundos):	3.127	3.315

Figura 38: Nível de serviço na passarela. (A) Menor Percurso / (B) 2017

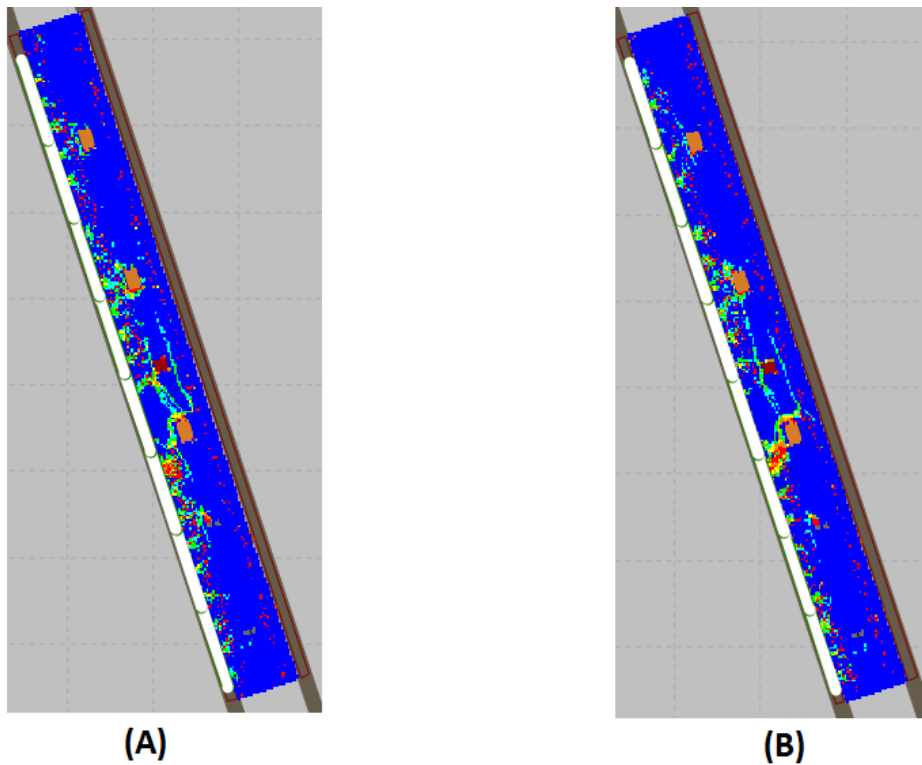


Figura 39: Nível de serviço na plataforma CPTM. (A) Menor Percurso / (B) 2017

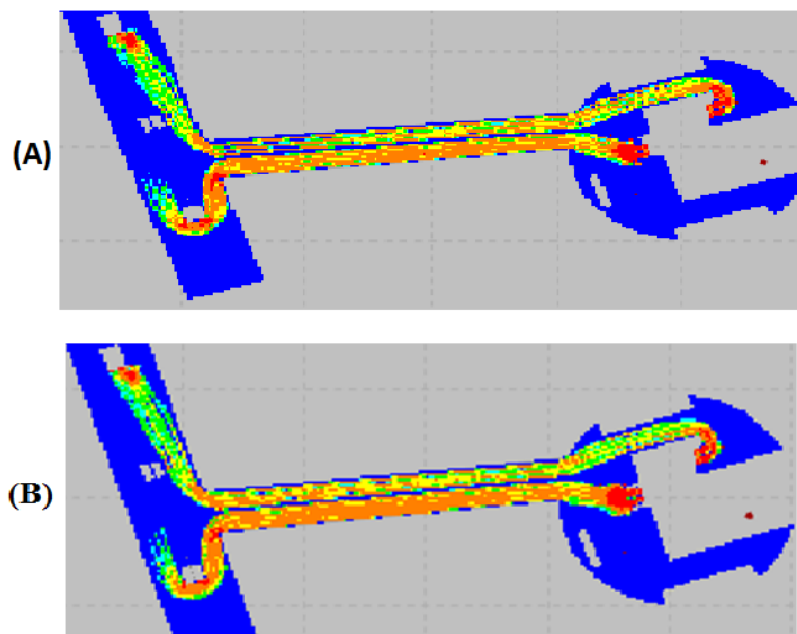


Figura 40: Nível de serviço no térreo (A) Menor Percurso / (B) 2017

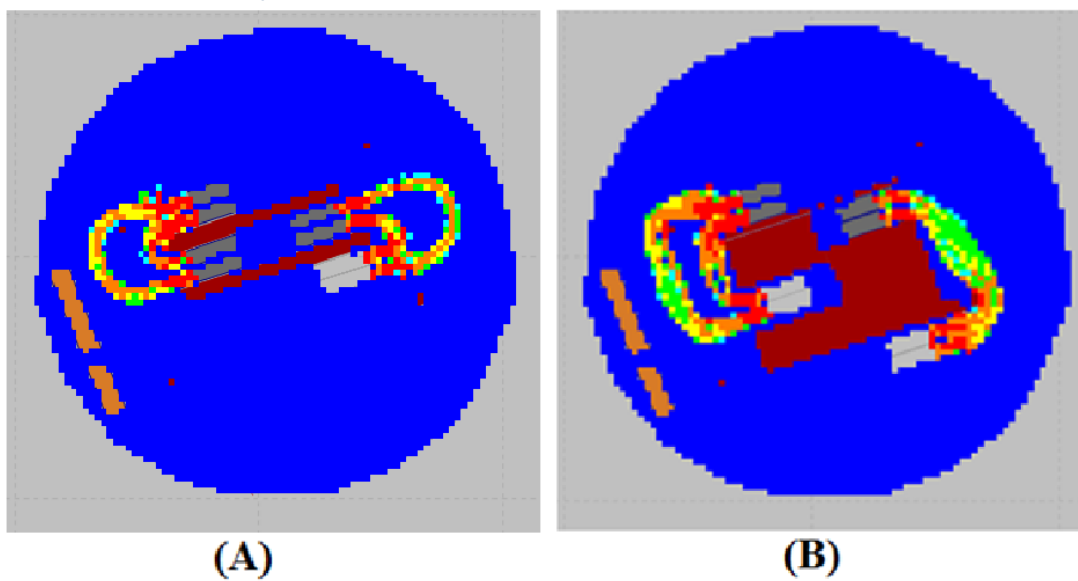


Figura 41: Nível de serviço no primeiro subsolo. (A) Menor Percurso / (B) 2017

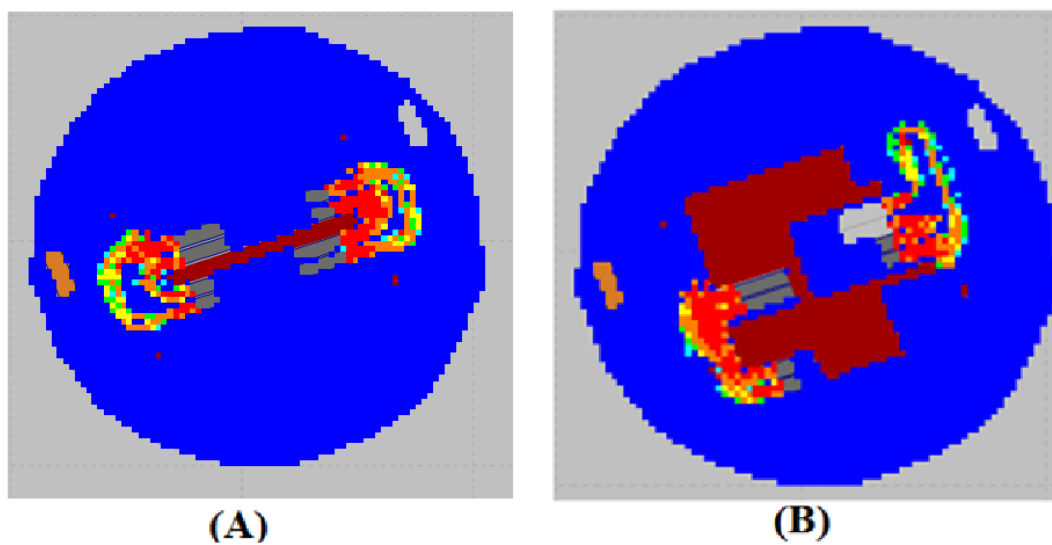


Figura 42: Nível de serviço no segundo subsolo. (A) Menor Percurso / (B) 2017

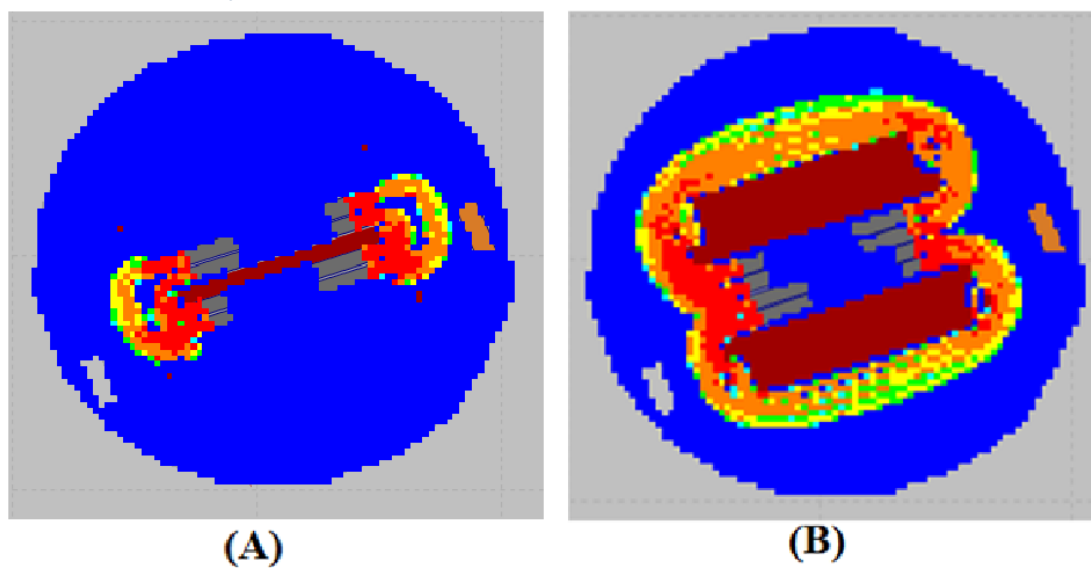


Figura 43: Nível de serviço no terceiro subsolo. (A) Menor Percurso / (B) 2017

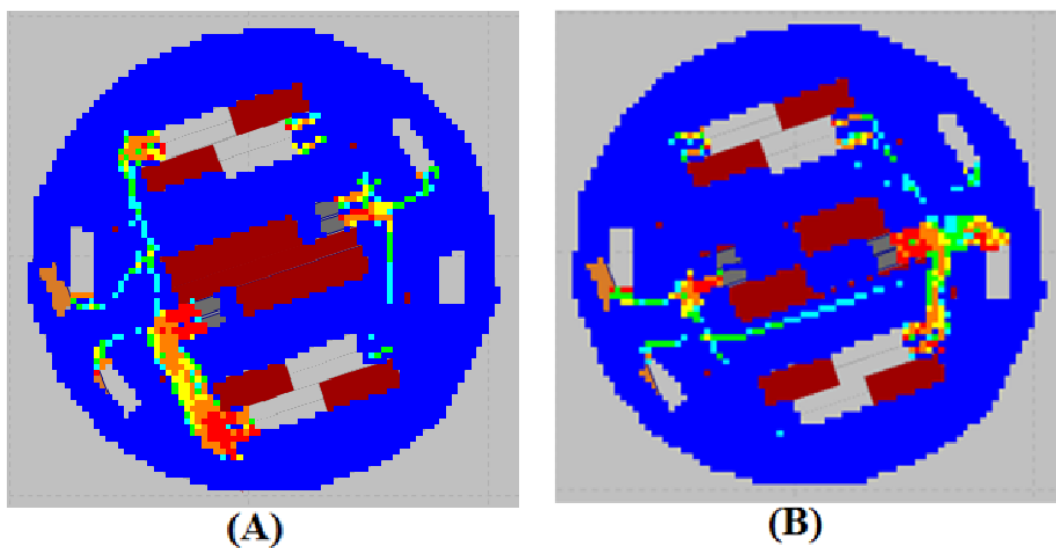
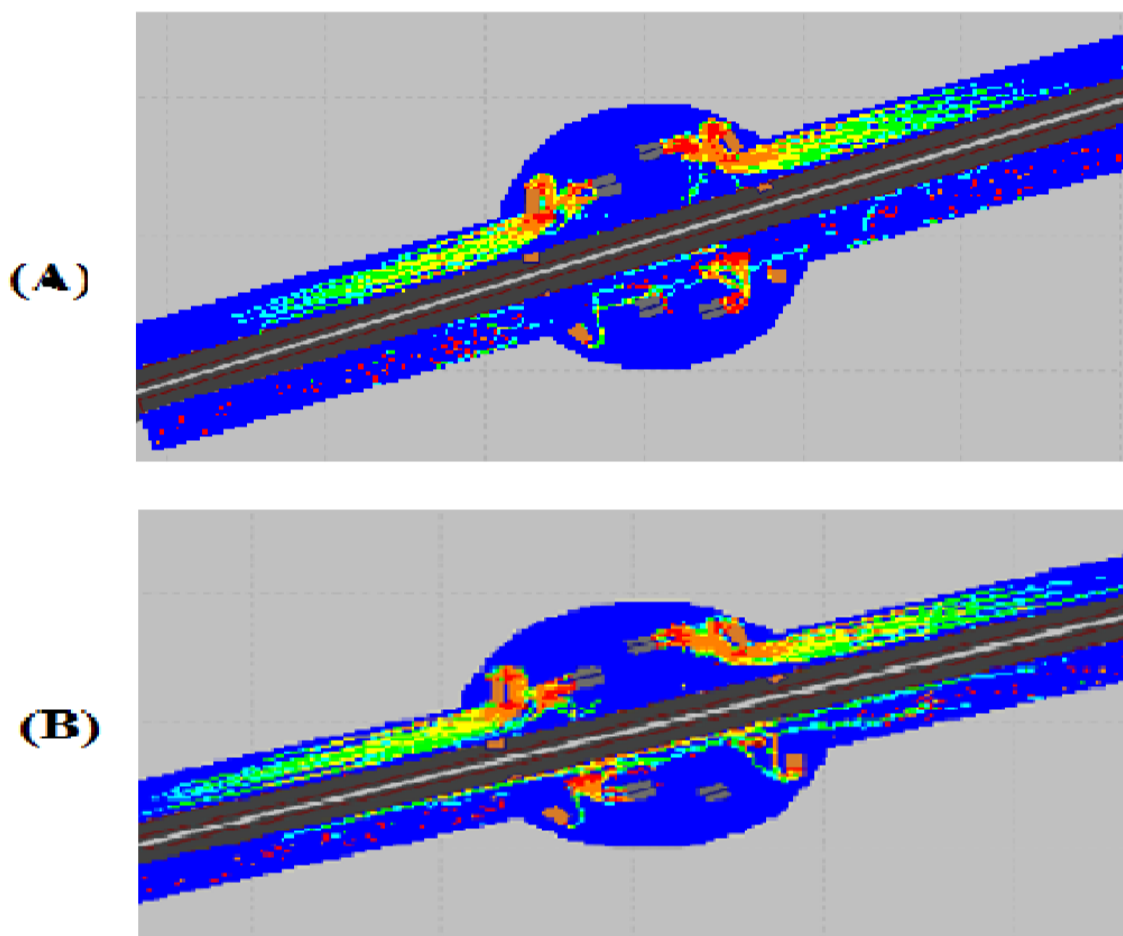


Figura 44: Nível de serviço na plataforma do Metrô. (A) Menor Percurso / (B) 2017

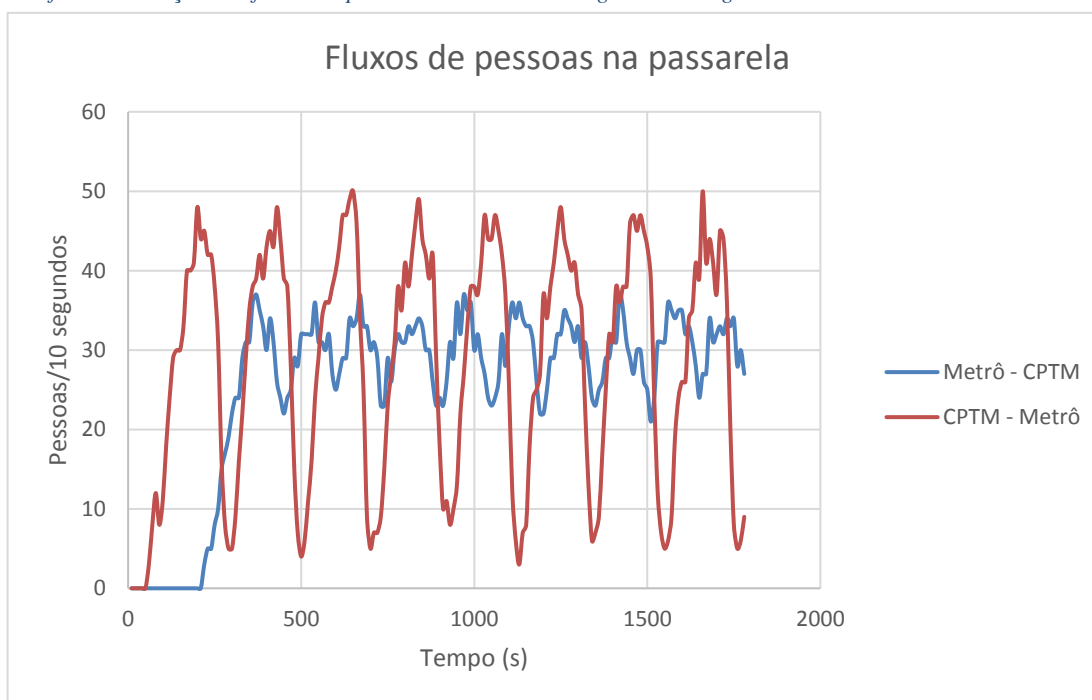


A mudança para menor percurso resultou em tempos de deslocamento 10,0% menores no sentido Metrô- CPTM e 7,3% menores no sentido CPTM-Metrô. E, conseqüentemente,

resultou em também um número menor de pessoas na estação ao fim dos 1700 segundos de simulação (5,7% menor). Enquanto isso, o tamanho das áreas de nível de conforto E e F, visualmente, parecem ser semelhantes e as áreas de nível de conforto C e D são em grande parte substituídas por níveis de conforto A e B nessa nova configuração de espaços.

Apesar das mudanças percebidas na simulação da nova configuração arquitetônica da Estação, o gráfico de pessoas na passarela fica bastante semelhante ao percebido atualmente.

Gráfico 5: Variação nos fluxos na passarela. Passo de contagem de 10 segundos



Um ponto importante neste cenário é a segurança do usuário, apesar dos tempos de viagem reduzidos com níveis de serviço semelhantes, que nos induzem a pensar ser um cenário mais vantajoso. O fato da saída das escadas rolantes ser muito próxima da entrada da próxima escada pode representar um risco aos pedestres. No caso de uma escada parar de funcionar, ou caso se forme uma aglomeração na entrada de alguma escada, a escada anterior continuará trazendo pedestres, que não terão área suficiente para se dispersarem, aumentando o risco de acidentes no local.

4.5.6. INCERTEZAS E POSSÍVEIS ERROS

- Dificuldade na obtenção de dados com Metro e SPTrans: apesar de terem fornecido alguns dados, as companhias ofereceram resistência e não foram abertas em relação aos dados de fluxo, que eram necessários para que a simulação fosse aderente à realidade. A CPTM foi a única companhia que colaborou e informou os dados de fluxo contidos na seção 4.1.2. A falta de dados oficiais obrigou o grupo ir à campo para realizar contagens de pessoas.
- Impossibilidade de coletar uma amostra representativa: a contagem de campo, apesar de ser precisa, impossibilitou o grupo de obter uma amostra grande, com dados de fluxo de vários dias ou meses, uma vez que era inviável ir à estação muitas vezes realizar as contagens. O baixo número de contagens possibilita erros devido às flutuações aleatórias, que passam a influenciar de maneira significativa o resultado final.
- Variações sazonais: outro problema gerado pela obtenção de dados em campo é a dificuldade de se considerar variações sazonais. De acordo com os dados fornecidos pela CPTM, março é o mês de maior fluxo. Foi utilizada a proporção de aumento de fluxo neste mês para considerar os fluxos no pior mês do ano.
- Carência de ferramentas de imagem: a falta de ferramentas de imagem afetou a capacidade de calibrar e validar as simulações adequadamente. As ferramentas de imagem possibilitam a filmagem e posterior análise computacional do fluxo, onde se pode obter dados como a velocidade e aceleração de cada pedestre, o espaçamento entre os mesmos e a densidade de pedestres em cada área. Todos estes dados são de extrema importância para a calibração do programa e validação das simulações. Para contornar este problema, foram utilizados valores padrão de velocidade e aceleração de pedestres e a densidade e espaçamentos foram calibrados por análise visual.
- Problemas nas escolhas de rotas dos pedestres: O Viswalk possui a opção de fazer com que os próprios pedestres tomem a decisão de qual rota tomar de acordo com diferentes critérios (tempo mínimo de viagem, distância mínima, caminho com menor densidade de pessoas). Em uma estação metroferroviária os pedestres tendem a escolher sua rota em busca do menor tempo de viagem, sem considerar a distância e densidade deste caminho. Entretanto, essa opção estava gerando um comportamento irreal nos pedestres, que hora escolhiam todos a mesma rota, hora escolhiam rotas aleatórias, que não

ocorrem na realidade. Para contornar o problema, dividiu-se o fluxo em rotas parciais e atribui-se a cada rota uma porcentagem (medida em campo) do total.

- Irregularidade na chegada dos trens: O Viswalk, apesar de adicionar certa aleatoriedade em suas simulações, não representa de maneira fiel as aleatoriedades que ocorrem na realidade. Os tempos de chegada dos trens, tanto da CPTM quanto do Metrô são extremamente irregulares, variando de dois a cinco minutos. No programa, o input de intervalo dos trens foi sempre o mesmo, trazendo uma regularidade ao fluxo que não ocorre na realidade.

4.5.5. CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE AS SIMULAÇÕES

A simulação traz resultados de diversos cenários de forma rápida e sem necessidade de interferir no espaço real. Nesse trabalho, foi possível estimar o comportamento do fluxo de pessoas dentro de um cenário de aumento de demanda que deve acontecer até 2030 e também simular um cenário com mudança na configuração espacial da estação, sem que fosse necessário interferir nas atividades do local.

O cenário futuro com a demanda 40% maior é um cenário preocupante e já dá indícios de que alterações precisarão ser feitas na Estação Pinheiros para que ela possa comportar sua demanda em 2030, de forma que os usuários não estejam expostos à riscos de segurança e níveis de serviço inaceitáveis.

O cenário de menor percurso traz resultados de conforto e tempo de deslocamentos melhores que os resultados atuais. Essas alterações podem ser uma maneira de trazer mais conforto aos usuários da atualidade e indicam que a arquitetura atual pode não ser a ideal. Vale ressaltar que este cenário necessita de uma análise mais detalhada da segurança no fluxo, como citado anteriormente.

A simulação de fluxo de pedestres em projetos de estações de transporte público traz grandes benefícios sem exigir grandes investimentos de tempo e dinheiro. A simulação do Projeto da Estação Pinheiros certamente poderia ter ajudado a melhorar a atual estação e ainda pode ser usada com a estação pronta para buscar alternativas favoráveis ao funcionamento atual.

5. CONCLUSÃO

Ao iniciar a elaboração deste trabalho não se tinha a real dimensão da dificuldade que ele apresentaria e, por essa razão, seu escopo foi se transformando durante o processo.

Foi acertada a decisão de iniciar o projeto com o estudo do Modelo de Forças Sociais, implementado no software e com a conceituação teórica de terminais. Este entendimento permitiu dar um passo importante, ao permitir se ver a concretude do algoritmo e dos principais parâmetros que calibram o comportamento dos entes, além de facilitar a análise de resultados após as simulações.

Posteriormente, focou-se no estudo de caso. O Terminal Pinheiros foi escolhido pelo grande volume de pedestres, pela sua complexidade originada de suas integrações e pela sua importância na malha de transportes da Cidade de São Paulo. Todo o terminal foi estudado de maneira qualitativa e quantitativa através de visitas à campo e obtenção de dados com os órgãos responsáveis.

Com todo este arsenal o cenário real foi simulado, com o entendimento que ele foi suficientemente aderente à realidade, apesar de todas as dificuldades. Os diferentes cenários simulados podem dar alguma indicação para melhorias, porém novos estudos são necessários para aprofundar as análises.

Na mesma linha, os parâmetros encontrados na calibração servem de ponto de partida para novos estudos. Mas, não devem ser considerados como valores absolutos, pois sabe-se que ainda se fazem necessárias algumas análises de sensibilidade para melhorar a calibração.

Desta forma, considera-se este estudo como um ponto de partida para novos estudos que tenham como tema a simulação voltada para pedestres, tema que certamente ganhará mais enfoque nos próximos anos.

Antes de apresentar soluções concretas para problemas pontuais, a grande lição deste trabalho foi demonstrar o poder da simulação de pedestres. A simulação se mostrou uma ferramenta extremamente poderosa e versátil, podendo contribuir para o projeto e operação de qualquer local onde existam grandes fluxos de pedestres. Na fase de projeto, pode-se simular como será o fluxo de pessoas no local e testar diferentes arquiteturas, de maneira a otimizar a disposição espacial para proporcionar qualidade e segurança no serviço oferecido aos pedestres.

Da mesma forma, na operação, é possível simular diferentes situações, prever cenários futuros e testar diferentes soluções, de forma a encontrar aquela que se mostre mais viável e eficiente.

Neste contexto, entende-se que a simulação deve se tornar uma etapa fundamental na concepção e operação de qualquer tipo de estrutura que tenha a característica de abrigar grandes volumes de pessoas ou que haja grande movimentação de pedestres.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBERTO, J. A. **Concepção do manual de projeto e dimensionamento de terminais de ônibus urbanos**. São Paulo: Empresa Metropolitana de Transportes Urbanos de São Paulo (EMTU), s.d.

ALEXANDERSSON, S.; Johansson, E. **Pedestrians in microscopic traffic simulation**. Master of Science Thesis in the Master's Programme Infrastructure and Environmental Engineering - Chalmers University of Technology. Gothenburg, Sweden, 2013

ALVES, C. J.P. **Uma metodologia para avaliação e dimensionamento de terminais de passageiros em aeroportos brasileiros**. Dissertação – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1981.

ASHFORD, N.; Wright, P. H. **Airport engineering** 3 ed. Nova York: John Wiley & Sons, 1992

DAAMEN, W; Bovy, PHL, & Hoogendoorn, SP. **Modelling pedestrians in transfer stations**. In M Schreckenberg & SD Sharma (Eds.), Pedestrian and evacuation dynamics (pp. 59-74). Duisburg, Germany, 2001.

DIJKSTRA, J.; Timmermans, H. J. P. and Jessurun, A. J. **A Multi-Agent Cellular Automata System for Visualizing Simulated Pedestrian Activity**. In. Proc. Theoretical and Practical Issues on Cellular Automata. Cellular Automata for research and Industry, Springer-Verlag. Berlin, 2000

EXAME. **Com crise, metrô de SP perde 86 mil passageiros por dia**. Site: <http://exame.abril.com.br/negocios/crise-tira-86-mil-usuarios-do-metro-por-dia-e-empresa-preve-impacto-de-r-60-mi/>, acessado em 12/02/2017.

FEITOSA, M. V. M. **Um modelo de simulação para terminais de passageiros em aeroportos regionais brasileiros**. Dissertação – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2000.

FOLHA DE SÃO PAULO, **Estação Pinheiros da CPTM vê fluxo dobrar**. Site: <http://www1.folha.uol.com.br/fsp/cotidiano/76798-estacao-pinheiros-da-cptm-ve-fluxo-dobrar.shtml>, acessado em 12/02/2017.

FRUIN, J. J. **Pedestrian, Plannin and Design** Nova York: Metropolitan Association of Urban Designers and Environmental Planners, 1971.

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

FUNDAÇÃO SISTEMA ESTADUAL DE ANÁLISE DE DADOS. **Projeções populacionais**. Site:<http://produtos.seade.gov.br/produtos/projpop/index.php>, acessado em 12/02/2017.

GONDIM, M.F.; Azevedo Filho M.A.N.; Porto Filho W. **O Transporte Não Motorizado Na Legislação Urbana No Brasil**. 2001, 201f. Dissertação (Mestrado em Transportes). Universidade Federal do Rio de Janeiro – COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, Abril, 2001.

GUALDA, N. D. F. **Terminais de transporte: contribuição ao planejamento e ao dimensionamento operacional**. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1995.

GUAZZELLI, C. S. **Contribuição ao dimensionamento operacional e à avaliação de terminais urbanos de passageiros metroviários e ferroviários** / C.S. Guazzelli – ed.rev. – São Paulo, 2011.

HELBING, D. & Molnár, P., **Social force model for pedestrian dynamics**. Physical Review E: Institute of Theoretical Physics, University of Stuttgart, 1995.

HELBING, D.; Buzna, L.; Johansson A.; Werner, T., **Self-Organized Pedestrian Crowd Dynamics: Experiments, Simulation and Design Solutions**, 2005

HENDERSON, L. F. **The Statistics of Crowd Fluids**. Nature, 1971.

HOOGENDOORN, S. P. **Pedestrian Travel Behavior Modeling**. Proc. Travel Behavior Research, 2003.

KELTON, D.; Sadowski, D. A.; Sadowski, R. P. **Simulation with Arena**. 1 st ed New York: McGraw, 1998.

LAW, A., **Simulation Modeling and Analysis**. 4 th ed. New York, McGraw-Hill, 2010.

LOSCOS, C; Marchal, D; and Meyer; **An Intuitive Crowd Behaviour in Dense Urban Environments using Local Laws**. IEEE Theory and Practice of Computer Graphics, 2003.

LOVAS, G. **Modeling and Simulation of Pedestrian Traffic Flow**. Transportation Research, 1994.

COMPANHIA DO METROPOLITANO DE SÃO PAULO, **Pesquisa de mobilidade da região metropolitana de São Paulo**. Site:

<http://www.metro.sp.gov.br/metro/arquivos/mobilidade-2012/relatorio-sintese-pesquisa-mobilidade-2012.pdf>

MILAZZO, J. S.; Roupail, N. M.; Hummer, J. E. and Allen, D. P. **The Effect of Pedestrians on the Capacity of Signalized Intersections**. Transportation Research Record, 1998.

PELECHANO, N.; Albeck, J.; Badler, N. I. **Virtual Crowds: Methods, Simulation and Control** – 2008

SCHREIBER, T. J. **Simulation Using GPSS**, New York: John Wiley and Sons, 1974

TERRA, U. D. S. T323a **Arquitetura em espaços de fluxo: modelagem e simulação em estações metroferroviárias e espaços de multidão** / Ulisses Demarchi Silva Terra – São Paulo, 2014.

UETA, P. S.; Ferreira, F. A. P. **Simulação macroscópica e simulação microscópica da Copa do Mundo de 2014**. 19º Congresso Brasileiro de Transporte e Trânsito. Brasília, 2013.

WOLFRAM, S. **Statistical Mechanics of Cellular Automata**. California Institute of Technology, 1983.