



SIMULAÇÃO NUMÉRICA-EXPERIMENTAL DE MOVIMENTAÇÃO DE PESSOAS EM SITUAÇÕES DE INCÊNDIO

Nathália Aquino Alvim

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

Orientador: Alexandre Landesmann

Rio de Janeiro
Junho de 2017

SIMULAÇÃO NUMÉRICA-EXPERIMENTAL DE MOVIMENTAÇÃO DE
PESSOAS EM SITUAÇÕES DE INCÊNDIO

Nathália Aquino Alvim

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

Examinada por:

Prof. Alexandre Landesmann, D.Sc.

Prof. Fernando Luiz Bastos Ribeiro, Ph.D.

Prof. Murilo Augusto Vaz, Ph.D.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL
JUNHO DE 2017

Alvim, Nathália Aquino

Simulação numérica-experimental de Movimentação de Pessoas em Situações de Incêndio/Nathália Aquino Alvim.
– Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2017.

XIV, 87 p.: il.; 29, 7cm.

Orientador: Alexandre Landesmann

Dissertação (mestrado) – UFRJ/COPPE/Programa de Engenharia Civil, 2017.

Referências Bibliográficas: p. 77 – 81.

1. Movimentação de Pessoas. 2. Evacuação. 3. Incêndio. I. Landesmann, Alexandre. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Civil. III. Título.

*A Deus, à memória do meu avô
Cacau e ao marido Rafael
Sant'anna.*

Agradecimentos

Ao Professor Alexandre Landesmann, pelos ensinamentos, confiança, estímulo ao longo desta jornada e principalmente por me fornecer a oportunidade de trabalhar com este tema.

Ao Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE/UFRJ) por me permitir desenvolver este estudo.

Aos professores do Programa de Engenharia Civil (PEC) da COPPE/UFRJ, pelos ensinamentos transmitidos ao longo da pós-graduação.

A toda direção e alunos da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo (FAU) da UFRJ pela colaboração na realização do experimento de evacuação no Edifício Jorge Machado Moreira, parte primordial deste trabalho.

Ao capitão Bruno Polycarpo e toda equipe do do Corpo de Bombeiros Militar do Estado do Rio de Janeiro pela colaboração durante a etapa experimental.

Aos colegas pesquisadores do LABEST, por todo companheirismo nos momentos difíceis e ajuda ao longo desta trajetória.

Ao povo brasileiro, principal motivação para o desenvolvimento deste trabalho e sem o qual sua realização não seria possível.

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

SIMULAÇÃO NUMÉRICA-EXPERIMENTAL DE MOVIMENTAÇÃO DE PESSOAS EM SITUAÇÕES DE INCÊNDIO

Nathália Aquino Alvim

Junho/2017

Orientador: Alexandre Landesmann

Programa: Engenharia Civil

Este trabalho apresenta investigação numérico-computacional de movimentação de pedestres em situações de incêndio. A primeira etapa da análise consiste do estudo do modelo matemático de Força Social proposto por HELBING e sua aplicação em uma geometria de baixa complexidade. Na segunda etapa, são utilizadas ferramentas de simulação para verificação de resultados. Os dados de resposta do cálculo analítico de um problema exemplo são comparados com os resultados obtidos através da ferramenta computacional FDS+EVAC. Posteriormente, esta mesma ferramenta é utilizada para reprodução de um cenário sugerido pelo guia da Organização Marítima Internacional (IMO) para validação de softwares de movimentação de pessoas. Adicionalmente, é realizado um simulado de evacuação em escala real no Bloco A do Edifício Jorge Machado Moreira, recentemente atingido por um incêndio. Os resultados deste experimento são comparados com dados já existentes na literatura e posteriormente utilizados para calibrar um modelo desenvolvido para esta instalação visando posterior utilização de forma a contribuir com a segurança da instalação. Os cenários considerados no ensaio são reproduzidos através da ferramenta computacional de forma fidedigna. O trabalho inclui também uma análise de conformidade com os requisitos normativos vigentes no Rio de Janeiro das instalações do Bloco A da edificação.

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

NUMERICAL AND EXPERIMENTAL SIMULATION OF PEOPLE MOTION
DURING FIRE EVENTS

Nathália Aquino Alvim

June/2017

Advisor: Alexandre Landesmann

Department: Civil Engineering

This work presents a numerical-computational investigation aimed to assess the people motion under fire situations. The first step of the analysis consists of the study of the Force Social model proposed by HELBING and its application in a geometry of coarse complexity. The second step includes a result verification using computational simulation tools. The analytical solution for an example is compared with the data coming from simulations made through the FDS + EVAC software. Subsequently, the same tool is used to reproduce a scenario suggested by the International Maritime Organization (IMO) guide for validation of software for people motion. In addition, a full-scale evacuation simulation is performed for the building Ed. Jorge Machado Moreira which was recently hit by a fire. The results coming from this experiment are compared with the literature data and later used to calibrate a computational model developed for this installation. Later, this will be used in order to contribute to the safety of the installation. Those scenarios considered in the test are reproduced through FDS+EVAC in a reliable way. The work also includes an analysis of the building compliance with the current safety code requirements of Rio de Janeiro.

Sumário

Lista de Figuras	x
Lista de Tabelas	xiv
1 Introdução	1
1.1 Motivação	3
1.2 Objetivo	5
1.3 Metodologia	5
1.4 Organização do Texto	5
2 Revisão Bibliográfica	7
2.1 Dinâmica de Evacuação	7
2.1.1 Características Básicas do Movimento de Pedestres	7
2.1.2 Diagrama Fundamental	8
2.2 Comportamento Humano em Situações de Evacuação	9
2.2.1 Efeitos Coletivos	11
2.2.2 Tempo de Evacuação	12
2.2.3 Movimento na Fumaça	14
2.3 Modelos de Evacuação	16
2.3.1 Características dos Modelos	16
2.3.2 Modelo Fluidodinâmico	18
2.3.3 Método Analítico	19
2.3.4 Autômatos Celulares	19
2.3.5 Modelos de Baixa Fidelidade	20
2.3.6 Modelo Força Social	21
2.3.7 Software FDS+EVAC	24
3 Análise Experimental	26
3.1 Simulação de Evacuação em Escala Real no Edifício Jorge Machado Moreira	26
3.1.1 Do Local	26
3.1.2 Participantes	31

3.1.3	Fumaça Artificial	34
3.1.4	Procedimento	34
3.1.5	Resultados	38
3.1.6	Análise Estatística dos Dados de Velocidade Coletados	46
3.1.7	Discussão	50
4	Modelo Numérico Computacional	54
4.1	Análise do Modelo Força Social	54
4.2	Verificação de Resultados	58
4.2.1	Descrição do problema exemplo	58
4.2.2	Solução analítica	58
4.2.3	Solução numérica	60
4.2.4	Comparação de resultados	61
4.3	Validação IMO 1	62
4.3.1	Descrição do Teste	62
4.3.2	Parâmetros Utilizados	63
4.3.3	Resultados	63
4.4	Simulação Computacional	65
4.4.1	Cenário 1	66
4.4.2	Cenário 2	70
4.4.3	Análise de Sensibilidade - Cenário 1	71
5	Conclusões	75
5.1	Sugestões para Trabalhos Futuros	76
	Referências Bibliográficas	77
A	Análise de Conformidade Normativa aplicada ao Ed. JMM	82
A.1	Legislação Vigente e Normatização Técnica	82

Lista de Figuras

1.1	Fachada da boate Kiss após incêndio ocorrido em 2013.	1
1.2	Registro do incêndio ocorrido no bloco A do Ed. JMM.	4
1.3	Danos causados pelo acidente nas instalações do Ed. JMM: (a) sala de início do incêndio; (b) corredor do oitavo andar [1].	4
2.1	Diagrama fundamental para movimento de pedestres em instalações planas.	9
2.2	Exemplo de efeitos coletivos: (a) <i>Jamming</i> ; (b) <i>Lane Formation</i> . . .	12
2.3	Sequência de respostas dos evacuados ao incêndio.	13
2.4	Redução da velocidade em função da densidade e grau de irritabilidade da fumaça.	16
2.5	Uma partícula, suas possíveis direções de movimento e as correspondentes probabilidades p	20
2.6	Forças de interação entre os obstáculos - agente e agentes-agentes. . .	22
2.7	Campo de Fluxo utilizado para guiar os evacuados até uma porta de saída durante a evacuação.	25
3.1	Localização geográfica da instalação dentro do campus da universidade [1].	27
3.2	Vista frontal da fachada Noroeste.	27
3.3	Planta baixa: (a) andar térreo; (b) segundo andar; (c) terceiro andar.	28
3.4	Características da instalação: (a) porta principal do andar térreo; (b) elevadores do segundo andar; (c) porta de saída do segundo andar; (d) escada.	29
3.5	Identificação das salas utilizadas durante o experimento na planta baixa do terceiro andar.	29
3.6	Salas utilizadas durante o ensaio: (a) Sala 343; (b) ID 01; (c) Sala 330; (d) ID 02; (e) Sala 339; (f) ID 03; (g) Sala 328; (h) ID 04.	30
3.7	Identificação dos participantes- sufixo: numeração da sala e prefixo ID do aluno.	32

3.8	Cadetes do terceiro ano do curso de oficiais do CBMERJ que colaboraram com exercício.	33
3.9	Atuação dos grupos dos cadetes da academia do CMBERJ: (a), (b), (c) operacional; (d) apoio; (e) segurança.	34
3.10	Fumaça artificial utilizada na simulação: (a) <i>FOG machine</i> ; (b) Fumaça gerada através da <i>FOG</i> ; (c) fumígeno; (d) fumaça gerada pelo fumígeno.	35
3.11	Localização dos check points: (a) térreo; (b) segundo andar; (c) terceiro andar.	36
3.12	Ponto de lançamento da fumaça artificial (pontos vermelhos): (a) face Sudoeste do corredor; (b) face Sudeste do corredor; (C) segundo pavimento da escada.	38
3.13	Presença de objetos de largura de aproximadamente 80 cm obstruindo o corredor do terceiro andar.	40
3.14	Permanência junto a outro participante durante o ensaio: (a) no corredor do terceiro andar; (b) no corredor principal do térreo.	41
3.15	Efeito <i>jamming</i> : (a) ausência de obstruções durante o percurso no corredor do terceiro andar; (b) formação do efeito no segundo pavimento do da escada.	41
3.16	Efeito <i>herding</i> : (a) participante ID 408 atravessando a nuvem de fumaça no corredor do terceiro andar; (b) iniciativa dos participantes em atravessar a nuvem de fumaça.	42
3.17	Atitude de apoiar as mãos no corrimão observada no cenário 2.	42
3.18	Número cumulativo de evacuados para as duas etapas do simulado.	43
3.19	Distância entre as salas utilizadas no exercício e o CP 6.	44
3.20	Dimensões da escada: (a) caminho percorrido pelos participantes na escada; (b) angulação vertical da escada, 56 graus.	45
3.21	Dimensões da escada: (a) caminho percorrido pelos participantes na escada; (b) angulação vertical da escada, 56 graus.	46
3.22	Velocidades determinadas para os participantes no corredor e na escada, aplicando-se as incertezas descritas na Tabela 3.7.	48
3.23	Histogramas de velocidades calculados para: (a) corredor; (b) escada.	48
3.24	Ajuste de distribuição lognormal para o corredor: (a) histograma de distribuição de velocidades; (b) função densidade de probabilidade; (c) distribuição de probabilidade acumulada.	49
3.25	Ajuste de distribuição lognormal para a escada: (a) histograma de distribuição de velocidades; (b) função densidade de probabilidade; (c) distribuição de probabilidade acumulada.	50

3.26	Comparação entre as velocidades calculadas para o corredor no simulado e dados experimentais reportados na literatura:(a) ponto vermelho indica o valor encontrado no simulado; (b) dado encontrado no ensaio em confronto com as referências reportadas por OLDER [2].	52
3.27	Confronto entre os dados de velocidade em escada presentes na bibliografia e o valor medido durante o exercício.	52
4.1	Decaimento exponencial da força social com o aumento da distância efetiva ($d - R$), em relação ao comprimento de decaimento b	55
4.2	Anisotropia visual da força social	56
4.3	Campo de força social exercido por uma parede na posição (x, y) , no agente ocupando posição $(0, 0)$, com campo visual orientado na direção x	57
4.4	Gráfico de contorno da força social exercida por uma parede na posição (x, y) , no agente ocupando posição $(0, 0)$, com campo visual orientado na direção x	58
4.5	Modelo numérico para o problema exemplo.	60
4.6	Comparação de resultados. Curva da solução analítica em vermelho e resultados numéricos obtidos com o software FDS+EVAC para o modelo descrito em azul.	62
4.7	Modelo computacional utilizado na simulação do cenário IMO 1, extenso corredor.	63
4.8	Velocidade do pedestre no corredor para o tempo $t=21,5s$	64
4.9	Força total de interação entre o pedestre e a parede.	65
4.10	Modelo para simulação computacional de evacuação.	65
4.11	Comparação de resultados entre experimento e simulação para velocidades médias dos agentes.	67
4.12	Comparação de resultados entre experimento e simulação para tempos totais de evacuação.	68
4.13	Formação de dois grupos se deslocando com distanciamento no corredor: (a) durante o experimento; (b) comportamento retratado através da simulação computacional.	68
4.14	Efeito <i>jamming</i> nas escadas: (a) ensaio experimental; (b) reprodução do comportamento através da simulação computacional.	69
4.15	Fluxo ordenado dos participantes no corredor principal de acesso à porta principal do térreo; (a) experimental; (b) reprodução via simulação computacional.	69

4.16 Fluxo ordenado dos participantes no corredor principal de acesso à porta principal do térreo; (a) experimental; (b) reprodução via simulação computacional.	70
4.17 Simulação computacional para o cenário 2 do simulado.	71
4.18 Análise de sensibilidade: impacto da variação da velocidade desejada v_0 nos tempos totais.	72
4.19 Análise de sensibilidade: impacto da variação do diâmetro dos agentes nos tempos totais.	72
4.20 Análise de sensibilidade: impacto da variação do do tempo de relaxação dos agentes nos tempos totais.	73
4.21 Análise de sensibilidade: variação estocástica em torno de parâmetros padrão, calibrados para diversos tipos de populações.	73

Lista de Tabelas

3.1	Características dos participantes do simulado - idade e altura	32
3.2	Características dos cenários considerados no exercício em ambas as fases	36
3.3	Tempo de pré movimento dos participantes em ambas as etapas do ensaio.	39
3.4	Características dos cenários considerados no exercício em ambas as fases.	39
3.5	Tempo total de evacuação para as duas etapas do ensaio.	43
3.6	Cálculo das velocidades em diferentes trechos do trajeto percorrido pelos alunos durante o exercício.	45
3.7	Incerteza da velocidade média dos participantes para escada e corredor.	47
3.8	Tempo de pré movimento - diferente fontes de dados existentes na literatura.	51

Capítulo 1

Introdução

Acidentes de incêndio acontecem em diversos tipos de instalações e podem causar danos materiais e sofrimento humano. No Reino Unido estima-se que as perdas materiais devido a acidentes de incêndio ultrapassem 4 bilhões de libras por ano, enquanto o número de mortes chegue a 400 pessoas, segundo DRYSDALE [3].

Grandes incêndios marcaram a história da humanidade, tendo ocorrido no Brasil nos edifícios Andraus (1972) e Joelma (1974), ambos na cidade de São Paulo. Importantes proposições de modificações nas legislações vigentes a respeito de segurança contra incêndio (SCI) foram consequência destes eventos.

Em 2013, na boate Kiss, localizada na cidade de Santa Maria, no Rio Grande do Sul, houve um incêndio de grandes proporções, que vitimou cerca de 242 pessoas e feriu, ao menos, outras 680. A Figura 1.1 ¹ apresenta a fachada da boate após o incêndio ocorrido em 2013.



Figura 1.1: Fachada da boate Kiss após incêndio ocorrido em 2013.

¹<https://pt.wikipedia.org/wiki/IncendionaboateKiss>, acesso em: 07/02/2016

A recente promulgação da Lei Kiss (30 de março de 2017) trouxe à tona novamente o assunto SCI, frisando a necessidade de provisão de meios ativos para controle de incêndios, dentre eles, o escape seguro dos ocupantes.

Existem registros de diversos acidentes de incêndio com um número alto de fatalidades em vista da alta concentração de pessoas conforme relatado por GROSSHANDLER [4]. Uma lista de desastres, com elevado número de fatalidades, é referenciada por também por HELBING [5].

Em lugares onde existe grande concentração e circulação de pessoas tais como: hospitais, edifícios, estádios desportivos, teatros, centros comerciais, estações de trem e metrô e centros de ensino (escolas e universidades), faz se necessária a existência de uma estratégia de verificação de suficiência ao atendimento dos requisitos vigentes.

O crescente número de acidentes reportados e a necessidade de avaliações mais detalhadas durante o projeto dos meios de escape em instalações tem motivado a utilização de modelos de simulação computacional para análise de riscos de acidentes de incêndio e evacuação de pessoas.

Tendo em vista que a resposta dos indivíduos durante uma situação de incêndio dependerá de uma gama variada de fatores, o estudo psicológico do comportamento humano em situações de evacuação é um aspecto importante a ser considerado.

Embora exista uma parcela significativa de aleatoriedade no comportamento dos evacuados durante uma situação de incêndio, alguns destes aspectos sócio-psicológicos como a importância dos familiares (dinâmica de um grupo durante o escape), auto-organização e o conhecimento prévio de determinadas saídas da instalação são levados em conta durante a construção de um modelo de evacuação de pessoas, conforme relatado por PROULX [6], [7], PAN [8] e MARCHANT [9].

As técnicas de simulação computacional são ferramentas capazes de auxiliar no âmbito do projeto de meios de escape seguro de pessoas em incêndios acidentais ou criminosos. Via simulação, é possível elaborar um modelo que considere os aspectos psicológicos inerentes ao comportamento humano.

Além disso, a interação entre as pessoas, a instalação e o fogo também pode ser avaliada, outro fator relevante durante o projeto de meios de escape em edificações. O comportamento da nuvem de fumaça durante o incêndio, por exemplo, é crucial para determinar a decisão dos evacuados sobre qual rota de fuga utilizar. Já propagação do incêndio influencia no tempo que os evacuados levam para detectar o incêndio e como reagir a ele. Por outro lado, os evacuados podem influenciar na propagação do incêndio, através do ato de abrir e fechar portas.

HELIOVAARA [10], [11] desenvolveu, através de pesquisas destes aspectos sócio-psicológicos, um modelo de previsão do comportamento dos evacuados e, utilizando o modelo de movimento de pedestres proposto por HELBING [12], estabeleceu uma

metodologia de simulação computacional de escape.

Esta ferramenta considera a interação entre os evacuados e o fogo e está acoplada na plataforma do software *Fire Dynamics Simulator* (FDS), desenvolvido pelo *United States National Institute of Standards and Technology* (NIST). O FDS é capaz de simular computacionalmente a propagação do fogo.

Neste trabalho, o modelo de evacuação proposto por HELBING [12] é estudado, detalhado e utilizado para modelagem de cenários de evacuação de pessoas.

Por meio da ferramenta desenvolvida pelo NIST, um estudo de caso proposto pela norma internacional [13] é reproduzido.

Posteriormente, dados experimentais de uma simulação de evacuação em um edifício com grande circulação de pessoas recentemente atingido por um incêndio são comparados com os resultados obtidos por simulação computacional.

1.1 Motivação

Locais propensos à reunião de grande concentração de pessoas são comuns no cotidiano da sociedade atual. Universidades, edifícios, shoppings, estações de trem ou metrô, escolas e estádios desportivos são ambientes de alta densidade demográfica. Nestes estabelecimentos, a movimentação dos indivíduos pode ser limitada pela alta densidade de pessoas, ou ainda pela limitação do número de acessos e pontos de escape.

Estes tipos de lugares com formação de multidões estão muito propensos a acidentes de grande escala com vítimas fatais.

Na história recente existem diversos registros destes tipos de acidente. Na boate Station Night Club, em Rhode Island, nos EUA, no ano de 2001, 100 pessoas morreram e 230 ficaram feridas em um incêndio onde o fogo se propagou rapidamente GROSSHANDLER [4].

Grande parte das vítimas do incêndio ocorrido na Boate Kiss em Santa Maria, no Rio Grande do Sul, não tinham conhecimento da localização das saídas de emergência do local [14].

Uma parcela relevante destes desastres poderiam ter suas consequências minimizadas através da otimização da concepção do espaço destes locais e da gestão destes eventos.

A dificuldade de realização de testes de evacuação em escala real tem motivado a utilização de uma ferramenta útil para esta aplicação: a simulação computacional. Esta ferramenta permite testar a segurança destes locais, verificando o atendimento das normas vigentes, e também, caso necessário, propondo soluções de arquitetura.

A efetiva evacuação de pessoas destes locais, em caso de ocorrência de incêndios, caracteriza-se um problema de modelagem física complexa. Entretanto, a potencial

redução do risco de fatalidades vêm justificando o incremento gradativo de pesquisa nesta área nas últimas décadas [10].

Considerando o conteúdo apresentado, o presente trabalho visa contribuir para o estabelecimento da metodologia de simulação computacional como uma ferramenta preventiva para redução do risco de fatalidades em eventuais acidentes de incêndio.

Na noite de 03/10/2016, o oitavo andar do Bloco A do Edifício Jorge Machado Moreira (JMM) foi atingido por um incêndio. O prédio abriga a Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), bem como a Reitoria da instituição. Felizmente, por ter ocorrido em horário não comercial, não houve vítimas, porém colocou em foco o assunto SCI na instalação.

A Figura 1.2 demonstra o incêndio ocorrido nas instalações da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Enquanto a Figura 1.3 ilustra os danos causados pelo acidente na edificação reportados por LANDESMANN [1].



Figura 1.2: Registro do incêndio ocorrido no bloco A do Ed. JMM.



Figura 1.3: Danos causados pelo acidente nas instalações do Ed. JMM: (a) sala de início do incêndio; (b) corredor do oitavo andar [1].

O contexto exposto acima e o acontecimento do acidente no Ed. JMM motivaram

a utilização desta instalação como objeto de estudo para uma das análises propostas nesta dissertação, através da realização de um simulado de evacuação em escala real.

Os resultados experimentais deste simulado foram utilizados para calibração e validação de um dos modelos computacionais propostos no presente trabalho.

1.2 Objetivo

Este trabalho tem, portanto, como objetivo a aplicação de metodologias de avaliação de movimentação de pessoas para diferentes modelos propostos. Em particular estuda-se (i) o modelo de movimento proposto por HELBING [12] (Força Social) e posteriormente a sua aplicação em casos de geometrias simplificadas; (ii) a ferramenta de simulação computacional construída a partir deste conceito por HELIOVAARA [10].

Além disso, este trabalho visa a criação de uma metodologia para avaliar a movimentação de pessoas em instalação predial e a comparação com dados já reportados na literatura.

Para tal, um modelo de simulação computacional é criado, calibrado e validado através de dados experimentais obtidos em um exercício real de evacuação.

1.3 Metodologia

Para modelagem da evacuação de pessoas é utilizado o modelo proposto por HELIOVAARA [10], [11]. Este modelo inclui parâmetros capazes de considerar características individuais como sexo, idade, mobilidade e estratégias de escape para determinação da dinâmica de movimentação das pessoas.

Na metodologia proposta, cada pessoa é representada por uma equação vetorial de dinâmica de corpos rígidos. Os parâmetros individuais de comportamento (forças sociais) são incluídos no termo de forçamento da equação vetorial, assim como possíveis flutuações de comportamento.

Para calibração e validação experimental do modelo proposto, foi executado um simulado de emergência em uma instalação predial recentemente submetida a um evento de incêndio. Os resultados experimentais são ainda comparados com resultados de ensaios similares presentes na literatura, visando estabelecer o range de validade da calibração efetuada.

1.4 Organização do Texto

Este trabalho é dividido em cinco capítulos principais. O primeiro (presente), apresenta uma visão geral do trabalho a ser desenvolvido. O segundo, capítulo de Re-

visão Bibliográfica, apresenta os resultados da pesquisa bibliográfica de referências existentes na literatura realizada durante a pesquisa.

O terceiro capítulo detalha a análise experimental do simulado de emergência realizado no Ed. JMM. São apresentados os materiais, os métodos e os resultados encontrados no ensaio.

O quarto dedica-se à metodologia empregada para simulação computacional, incluindo estudos de caso simplificados para melhor compreensão do funcionamento do modelo e da influência dos parâmetros envolvidos. Além disso, este item dedica-se a apresentação de resultados obtidos para o cenário do Ed. JMM, aplicando-se a metodologia de simulação computacional, a estratégia utilizada para calibração do modelo e a comparação com os resultados obtidos experimentalmente.

Por fim, o quinto capítulo apresenta as conclusões do presente trabalho, bem como a discussão dos resultados e ainda as propostas de trabalhos futuros.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

2.1 Dinâmica de Evacuação

A descrição da dinâmica de movimento de pedestres é de natureza complexa. Um dos fatores de complexidade está relacionado ao fato de se tratarem de corpos tridimensionais. Uma simplificação usual, em modelos de evacuação, é o tratamento bidimensional. Assim, considera-se como representativa a descrição da projeção vertical dos pedestres no plano de movimentação. Este tratamento justifica-se pela baixa liberdade de movimentação na direção vertical em relação às direções contidas no plano horizontal.

Neste capítulo serão abordadas as características básicas da dinâmica de evacuação de pedestres sob condições normais e sob condições de emergência (como um evento de incêndio, por exemplo).

2.1.1 Características Básicas do Movimento de Pedestres

PROULX [7] descreveu as características básicas do movimento de pedestres, apresentadas abaixo. Estas são representadas por três variáveis fundamentais, expressas em razões: densidade (ρ), velocidade (v) e fluxo (J). A densidade representa o número de pessoas em uma área de passagem. Muitas vezes esta característica é referida como o inverso da densidade, ou seja, a área por pessoa ou módulo de pedestres.

A velocidade é uma grandeza vetorial que contém a informação de direção e da distância percorrida por unidade de tempo.

O fluxo expressa a quantidade de pessoas que passam por uma região de referência por unidade de tempo. O fluxo é associado à uma direção e sentido de passagem, e possui intensidade descrita pela razão de uma variável discreta (número de pessoas) por uma variável contínua (tempo). Naturalmente, o fluxo possui unidade de frequência temporal (por exemplo, $2,0$ *pessoas/segundo*).

Estas três variáveis, juntamente com a largura do caminho percorrido (b), formam a equação fundamental do tráfego de pedestres:

$$J = v \rho b \quad (2.1)$$

O fluxo específico (J_s) é calculado através da densidade (ρ) e da velocidade (v), conforme a Equação 2.2, que é também conhecida como relação hidrodinâmica [15]:

$$J_s = v \rho \quad (2.2)$$

O fluxo apresentado na Equação 2.1 é considerado como um valor médio ao longo do tempo em uma posição definida. O fluxo específico, representado pela Equação 2.2 é o valor médio instantâneo ao longo do espaço.

Uma observação importante é que a velocidade é diretamente dependente da densidade. As pessoas podem se mover rapidamente com uma marcha normal se existir um bom espaço entre elas. Quanto mais próximos eles estiverem, mais lento será o movimento. Expressando quantitativamente, quando a densidade dos pedestres é inferior à $0,5 \text{ pessoas}/m^2$, as pessoas estão hábeis para se movimentar a uma velocidade de aproximadamente $1,25 \text{ m/s}$, que representa uma velocidade média de caminhada irrestrita [7].

Em baixas densidades, não são, necessariamente, observadas altas velocidades. Os fatores determinantes da velocidade nesta condição são as características dos pedestres, como idade, limitações e agrupamentos. Um grupo de familiares, por exemplo, tende a se mover na velocidade do membro mais lento do grupo, como um idoso ou uma criança.

Em escadas, as velocidades de movimento são menores, em baixas densidades, pessoas em boa forma podem alcançar uma velocidade de média de $1,1 \text{ m/s}$, segundo PAUL [16] (movimento descendente).

2.1.2 Diagrama Fundamental

O diagrama fundamental descreve as relações empíricas entre a densidade ρ e o fluxo J . Devido a relação hidrodinâmica, apresentada na Equação 2.2, o diagrama possui três formas equivalentes: $J_s(\rho)$, $v(\rho)$ e $v(J_s)$.

Em aplicações práticas, esta relação é um dado de entrada principal em projetos para dimensionamento de instalações de pedestres [17]. Adicionalmente, o diagrama é utilizado também como uma referência quantitativa para os modelos de dinâmica de pedestres [18].

A Figura 2.1 apresenta os vários diagramas fundamentais de instalações planas existentes na literatura, construídos a partir dados históricos de estudos

empíricos [15].

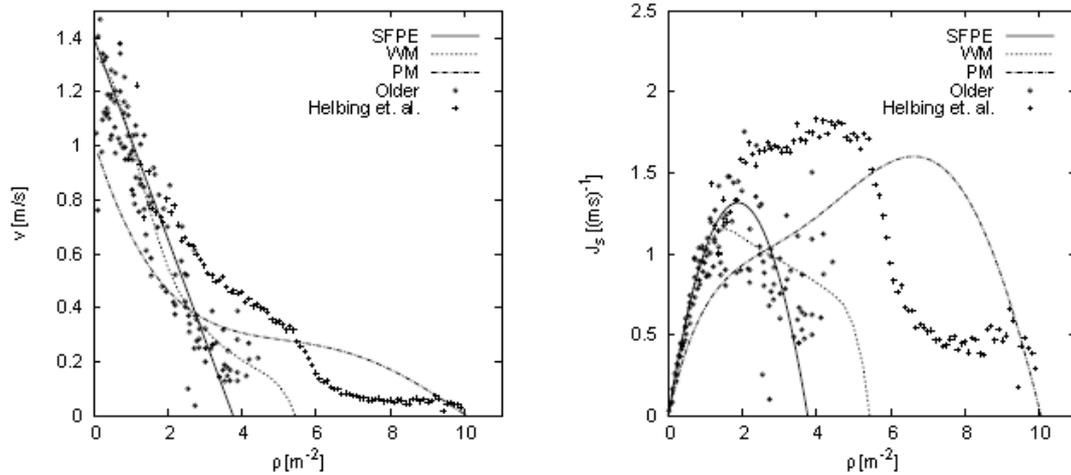


Figura 2.1: Diagrama fundamental para movimento de pedestres em instalações planas.

Na Figura 2.1, a linha sólida representa os dados conforme *SPFE Handbook* [7]. As linhas tracejadas, apresentam, respectivamente, os dados coletados por PRED-TECHENSKII [19] e WEIDMANN [20]. Os dados representados por pontos representam a série de medidas experimentais realizadas por OLDER [21] e HELBING [22], respectivamente.

Observa-se, através de uma comparação entre os dados apresentados na Figura 2.1, que as especificações e medições de cada curva apresentada divergem consideravelmente. Tais desvios se justificam pelas diferenças culturais e populacionais, fatores psicológicos que incentivam o movimento, diferenças entre os fluxos uni e multi direcional, flutuações de curto alcance e também pelo tipo de tráfego.

2.2 Comportamento Humano em Situações de Evacuação

Para avaliação dos modelos de simulação de evacuação é importante, em primeiro lugar, compreender o comportamento das pessoas durante uma situação normal de evacuação, bem como no caso de uma de emergência, como um incêndio, por exemplo.

Em situações normais, HELBING [5] observou que normalmente os pedestres optam pela rota mais rápida até os seus destinos e não a mais curta. A rota de saída escolhida pelos ocupantes é um dos fatores que mais influenciam no resultado de evacuações. Em evacuações reais, grande parte das saídas podem nem estar em uso ativo. Além disso, o mesmo autor observou que os evacuados se movem com uma

velocidade confortável, ou seja, aquela que desenvolve mínimo consumo de energia (uma vez que não é necessário se mover tão rapidamente).

A velocidade de cada indivíduo irá depender de suas características pessoais, como idade, sexo, objetivo, hora do dia. Os pedestres normalmente buscam se manter a uma certa distância uns dos outros e de paredes ou ruas.

Em situações de evacuação de emergência, o comportamento dos evacuados se altera de forma significativa. Estes tentam se mover mais rápido que o usual, ficam nervosos e tendem a se mover irracionalmente.

Os efeitos psicológicos e sociais em situações de evacuação de emergência começaram a ser estudados no início dos anos 80 por CANTER [23]. De acordo com PROULX [6], as pessoas tendem a evacuar um local pela mesma forma que entraram, ainda que exista uma saída mais rápida. Ainda segundo o mesmo autor, as pessoas apresentam este comportamento pois sentem que alternativas desconhecidas podem aumentar a ameaça.

Segundo MARCHANT [9], uma pessoa menos familiarizada com um local tem uma chance maior de vir a óbito ou não conseguir escapar em um evento de emergência do que uma pessoa bem familiarizada com as entradas e saídas do local.

Uma observação muito relevante feita por PAN [8] é que as pessoas tendem a escolher a saída para o qual a maior parte das pessoas está se direcionando. Este tipo de comportamento é denominado "*herding*" e significa "ir com a multidão", popularmente conhecido como efeito manada ou pastoreio. PAN [8] afirma que as seguintes consequências práticas surgem deste tipo de comportamento:

- A evacuação é mais suave em locais onde seu layout facilita a movimentação do grupo como um todo;
- Um grupo provavelmente irá se reunir antes de iniciar a saída;
- Grupos que possuem parentesco, como pais e filhos, por exemplo, tendem a se comportar de maneira diferente com relação aqueles que não possuem. Parentes não possuem comportamentos independentes. Ao invés de imediatamente correrem para uma saída de emergência, pessoas deste tipo de grupo tendem a permanecer juntos e procurar uma saída em conjunto.

Uma crença comum sobre o comportamento humano em evacuações é que as pessoas irão entrar em pânico. Segundo SCHADSCHNEIDER [15], o fenômeno é caracterizado como um comportamento egoísta e anti-social, que por contágio afeta grandes grupos e leva a ações completamente irracionais.

Muitas vezes é presumido, principalmente pelos meios de comunicação, que estas situações de pânico ocorrem em cenários onde as pessoas competem por recursos

escassos. Durante um evento de evacuação de emergência, a disputa pode ser por um local seguro ou o acesso a uma saída.

Todavia, com base em observação e análise de acidentes reais, cientistas sociais chegaram ao consenso de que esta situação raramente ocorre, conforme relatado por KEATING [24].

PROULX [6] afirma que, durante a evacuação, as pessoas tendem a ter comportamentos racionais. Ainda segundo o autor, o que as pessoas vivenciam durante eventos de evacuação são situações de estresse, iniciadas a partir de informações contraditórias repassadas. O estresse não desaparece até que o evacuado se sinta seguro por um momento.

Um evacuado sob situação de estresse tem capacidade limitada de analisar as informações de uma forma versátil. Durante um evento de incêndio, um evacuado pode não notar a rota de saída ideal ou pode ignorar algumas informações adicionais, como um sinal de saída. Isto contribui ainda mais para a utilização, por parte dos evacuados, de rotas de saída conhecidas previamente.

2.2.1 Efeitos Coletivos

Na dinâmica de evacuação de pedestres podem ser observados diversos efeitos coletivos e de auto-organização. Estes efeitos macroscópicos refletem as interações microscópicas dos indivíduos e fornecem informações importantes para a modelagem da evacuação.

Segundo SCHADSCHNEIDER [15], os efeitos coletivos mais comuns são:

- ***Jamming/clogging***: este tipo de efeito acontece em locais com alta densidade de pessoas, onde o fluxo excede a capacidade do local, formando uma espécie de "obstrução". Exemplos típicos são saídas ou estreitamentos. Este tipo de efeito não depende das interações microscópicas dos pedestres.
- ***Density Waves***: são definidas como variações quase periódicas de espaço e tempo de densidade em multidões. Um exemplo clássico é um corredor densamente povoado onde um efeito similar ao para-e-vai observado no tráfego de veículos ocorre. Cita-se o exemplo de uma estação de metrô no qual a alta densidade provoca uma parada completa no movimento.
- ***Lane Formation***: caracteriza-se por um efeito contra-fluxo, onde dois grupos de pessoas se movem em direções opostas. As faixas são formadas nas interseções onde as pessoas se movem em uma direção só. Desta forma, grandes interações entre os pedestres são reduzidas, o que permite maior conforto e também velocidade de caminhada maior.

- **Oscillations:** são representadas por mudanças oscilatórias na direção de movimento em locais estreitos, como portas, por exemplo. Uma vez que um pedestre é capaz de passar pelo ponto estreito, se torna mais fácil para os demais seguirem na mesma direção, até que outro (através de uma flutuação), é capaz de passar na direção oposta, mudando o sentido do movimento.
- **Patterns at intersections:** diversos padrões de movimento formados em cruzamentos. Rotatórias transitórias, são um exemplo típico de padrão de movimento que o torna mais eficiente. Mesmo que estes padrões de movimento estejam conectados com pequenos desvios, suas formações podem ser favoráveis, pois tornam o movimento mais suave.

A Figura 2.2 mostra dois exemplos de efeitos coletivos descritos acima: (a) efeito *Jamming* em uma saída estreita; (b) *Lane Formation*, onde a linha amarela representa a interseção entre as duas direções de movimento dos pedestres.



Figura 2.2: Exemplo de efeitos coletivos: (a) *Jamming*; (b) *Lane Formation*

2.2.2 Tempo de Evacuação

O tempo total necessário para evacuação é denominado Tempo Disponível para Saída Segura. Este tempo é composto pelo tempo de pré evacuação e o tempo de movimento e deve ser distinguido do tempo de fluxo, pois possui maior complexidade e menor previsibilidade, resultado em maior dificuldade para controle.

O tempo de fluxo T_J é uma função da população P e da capacidade de fluxo J de determinado local, conforme equação 3.2:

$$P = T_J J \quad (2.3)$$

O tempo de pré evacuação é o transcorrido desde o momento em que os evacuados são submetidos ao primeiro aviso, alarme ou qualquer outro indicador de que a evacuação deverá ser iniciada (sinal de presença de fumaça, por exemplo) até o início do movimento para um local seguro. O tempo de movimento é contabilizado a partir do início do movimento dos evacuados até a sua chegada a um local seguro.

No caso de uma situação de incêndio, o tempo disponível para uma evacuação segura está limitado ao tempo quando uma situação insustentável atinge as rotas de saída, denominado tempo limite.

A Figura 2.3 apresenta as diferentes componentes do tempo disponível para evacuação durante uma situação de incêndio.

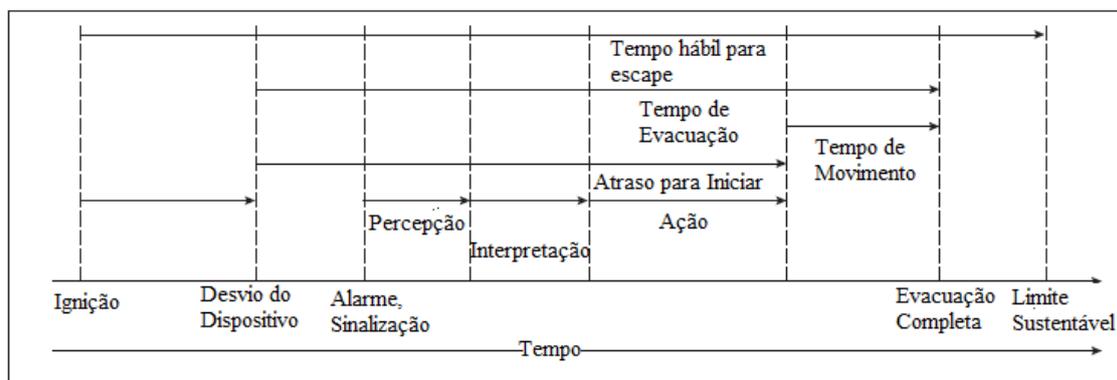


Figura 2.3: Sequência de respostas dos evacuados ao incêndio.

Na Figura 2.3, o tempo de ignição representa o tempo em que foi iniciado o incêndio. A partir dele, o tempo de detecção é calculado. O tempo de detecção é dependente do tipo de incêndio e do tipo de dispositivos de segurança existentes no local, podendo este variar de segundos até algumas horas.

Entre o tempo de detecção pelo dispositivo (etapa dois mostrada na Figura 2.3) e a ativação do alarme, deve ser considerado um tempo transcorrido. Na maioria dos casos estes eventos são praticamente simultâneos, porém, existem exceções, como em locais onde os evacuados devem acionar o alarme manualmente.

Por outro lado, em algumas situações o alarme pode não funcionar e a detecção, por parte dos evacuados, só é feita depois que alguma sinalização de fogo e/ou outro risco se torna perceptível.

Desde modo, após a detecção da situação de perigo, um tempo para iniciar o movimento deve ser considerado, sendo este subdividido em três etapas: percepção, interpretação e ação.

A percepção é o tempo que os evacuados levam até perceberem a situação de perigo. A etapa de interpretação corresponde ao tempo necessário para que a informação seja processada pelos evacuados e alguma decisão de iniciar a evacuação possa ser tomada.

Uma vez que a decisão de evacuar o local é tomada, os evacuados irão se ocupar com outras atividades antes de sair, tais como: pegar um casaco, reunir crianças ou procurar objetos de valor.

Após a etapa percepção-interpretação-ação, os evacuados iniciam a movimentação. Sendo assim, o tempo de movimento é calculado a partir do tempo de fluxo através de vários elementos do sistema de saída e do tempo necessário para que os evacuados se movam através da rota de saída.

O tempo transcorrido entre o tempo de ativação do alarme e o tempo até que o último evacuado encontre um local seguro caracteriza-se pelo tempo de evacuação. Este tempo deve, necessariamente, ser inferior ao tempo limite (instante de tempo no qual as condições das rotas de saída tornam-se inseguras).

É difícil estimar com precisão o tempo que os evacuados irão levar para iniciar o movimento de evacuação, assim que eles tenham percebido algum sinal de perigo ou tenham ouvido o alarme.

Tradicionalmente, considerava-se que assim que a situação de perigo fosse notada a evacuação era iniciada. Porém, relatos de vítimas de acidentes (como incêndios) contestam esta afirmação de que a resposta seja imediata. Portanto, atualmente, é uma prática comum adicionar algum tempo de atraso no início do movimento durante o cálculo do tempo de evacuação.

2.2.3 Movimento na Fumaça

Durante muito tempo acreditou-se que ao se depararem com uma nuvem de fumaça durante um evento de evacuação, os evacuados iriam parar, voltar e encontrar outro meio de saída.

Porém, é reconhecido atualmente que muitas pessoas estão preparadas para se mover na fumaça. Estima-se que mais de 60 % dos evacuados de prédios residenciais pequenos se movem dentro da fumaça durante um evento de evacuação.

Um estudo do comportamento dos ocupantes que evacuaram o World Trade Center, em 1993, após a explosão de uma bomba, mostrou que 94 % dos ocupantes da torre 1 se movimentaram através da fumaça [25].

Utilizando como exemplo a evacuação de dois prédios residenciais altos durante um evento de incêndio, um estudo detalhado mostrou que 96 % dos ocupantes do prédio que se encontravam localizados acima do piso onde o incêndio começou se moveram através da fumaça, durante a evacuação.

Os únicos ocupantes que conseguiram escapar sem encontrar qualquer sinal de fumaça foram aqueles que se encontravam em pisos inferiores àquele onde o incêndio foi iniciado ou aqueles que iniciaram a sua evacuação prematuramente durante o evento de incêndio.

Portanto, conclui-se que, de fato, o movimento dentro da fumaça é recorrente em casos de incêndios reais [26], [27]. Embora pareça de conhecimento do público em geral que a fumaça é capaz de causar mortes durante um acidente de incêndio, os evacuados possuem tendência a se mover através da fumaça em busca de encontrar um local seguro [28].

O conhecimento público de que a fumaça é capaz de matar não significa que este é um julgamento correto do potencial letal dos efeitos da fumaça. As vítimas dos acidentes reportados acima relatam que conseguiram se movimentar através da fumaça pois estavam se movimentando rápido ou prendendo a respiração para se proteger.

Na verdade, estas pessoas submeteram-se a elevado grau de risco, pois estas ações não são suficientes para garantir um escape seguro, em geral. Os efeitos dos gases tóxicos da fumaça são muito letais para o organismo humano. Poucas respirações destes gases podem levar um humano a perder consciência.

Alguns estudos de caráter sustentável apontam que o movimento das pessoas através da fumaça, antes da incapacitação, varia muito de acordo com fatores como: peso, aptidão da atividade da pessoa e mistura e concentração dos gases desenvolvidos durante o incêndio.

De um modo geral, os evacuados possuem apenas alguns minutos disponíveis para se movimentar através da fumaça, antes que a incapacitação ocorra. Todos os procedimentos de educação e treinamento para evacuação recomendam que seja evitado se mover através da fumaça, porém, os evacuados continuam se movendo em inúmeros acidentes de incêndio.

Outro problema típico do movimento através da fumaça é o rápido escurecimento das luminárias do teto, que simulam um apagão total (falta de energia). Entrevistas das vítimas de incêndio que se moveram através da fumaça relatam que estas afirmam que não existia energia durante sua evacuação, ainda que nenhuma falha elétrica pode ser encontrada após o fogo. As luminárias escurecidas eram, portanto, consequência da densidade da nuvem de fumaça [7].

A densidade da nuvem de fumaça acarreta a redução de visibilidade e a consequente diminuição na velocidade na maioria dos eventos de evacuação.

Não obstante, esta redução tem também relação direta com o grau de irritabilidade da nuvem de fumaça, conforme apresenta a Figura 2.4 em dados experimentais reportados por Jin [29].

Conforme pode se observar na Figura 2.4, o fator de redução da velocidade é maior para os casos onde a fumaça é irritante e inversamente proporcional a densidade da fumaça (expressa em termos do coeficiente de extinção da fumaça em $1/m$).

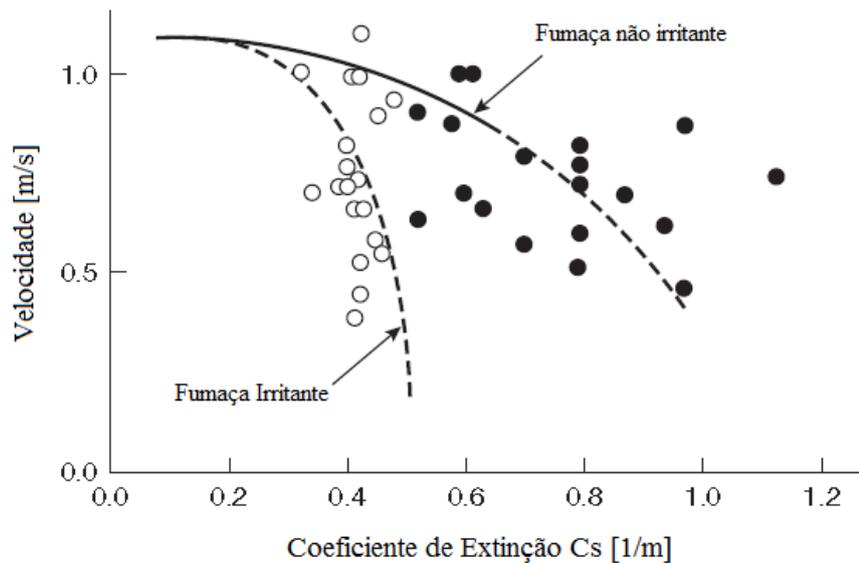


Figura 2.4: Redução da velocidade em função da densidade e grau de irritabilidade da fumaça.

2.3 Modelos de Evacuação

2.3.1 Características dos Modelos

Segundo Schadschneider, [15] uma teoria abrangente da dinâmica de evacuação de pedestres contempla três níveis de comportamento: o estratégico, o tático e o operacional.

No nível estratégico, os evacuados decidem quais atividades eles irão executar e em qual ordem. O nível tático diz respeito as decisões de curta duração tomadas a partir das decisões tomadas nas etapas do nível estratégico. Tais decisões são, por exemplo, escolher precisamente qual rota de fuga será utilizada de acordo com os obstáculos existentes, densidade dos pedestres em cada uma delas etc. O nível operacional descreve o comportamento real dos evacuados durante a caminhada, suas decisões imediatas para evitar colisões, etc.

Os níveis estratégico e tático são normalmente considerados exógenos à simulação do pedestres, pois nestes níveis, informações de outras disciplinas como sociologia e psicologia são necessárias. A modelagem do nível operacional é usualmente baseada em variações de modelos físicos existentes. De fato, o movimento de multidões de pedestres possui similaridades com a dinâmica dos fluidos ou com o fluxo de materiais granulares.

O objetivo principal da construção de modelos de evacuação é reproduzir o comportamento dos evacuados, através de modelos simplificados, porém da forma mais realística possível, concordando com os resultados de observações empíricas. .

As características principais que podem classificar os modelos de evacuação são:

- **Macroscópicos e microscópicos:** em modelos microscópicos cada indivíduo é representado separadamente. Esta abordagem permite introduzir diferentes tipos de pedestres com propriedades individuais, bem como questões de escolha, como as rotas de saída. Por outro lado, em modelos macroscópicos, indivíduos diferentes não podem ser distinguidos. Ou seja, o estado do sistema é descrito por densidades, normalmente, uma densidade de massa, derivada das posições das pessoas e uma correspondente velocidade média local.
- **Discretos e contínuos:** cada uma das três variáveis utilizadas para descrever a dinâmica de movimento de pedestres: espaço, tempo de variável de estado (por exemplo velocidades) podem ser discretas ou contínuas.
- **Determinístico e aleatórios:** outro tipo de classificação da dinâmica dos pedestres é entre determinístico e aleatórios. Para o caso de modelos determinísticos, o comportamento num dado tempo é completamente determinado pelo estado presente. Em modelos aleatórios, o comportamento é controlado por certa probabilidade, como por exemplo, a de que os agentes podem reagir de formas diferentes à mesma situação. O uso de modelos aleatórios reflete a lacuna de conhecimento dos processos psicológicos que determinam as decisões tomadas pelos evacuados.
- **Base-domínio e base-força:** a diferença entre estes dois modelos se dá na forma de considerar a interação entre os evacuados. Em modelos do tipo base-domínio os evacuados tomam as suas decisões considerando sua situação e de sua vizinhança naquele dado momento, bem como nos seus objetivos. Estes tipos de modelos se concentram nas propriedades intrínsecas dos evacuados e, portanto as regras são muitas vezes justificadas através da psicologia. Em modelos base-força, os evacuados sentem uma “força” exercida pelos outros. Sendo assim, este tipo de modelo enfatiza as propriedades extrínsecas e sua relevância para o movimento dos evacuados. Este modelo se baseia em uma abordagem física da observação que a presença de outras pessoas leva a desvios de movimentos em linha reta. Através de uma analogia com a mecânica newtoniana, uma força é feita responsável por acelerações. O modelo de autômatos celulares é do tipo base-domínio enquanto que o modelo força-social pertence às abordagens baseadas na força.
- **Alta e baixa fidelidade:** o termo fidelidade refere-se ao aparente realismo da abordagem utilizada na modelagem. Modelos com alta fidelidade tentam refletir a complexidade da tomada de decisão por parte dos evacuados e de suas ações de forma mais realística possível. Em modelos de baixa fidelidade, os evacuados são representados como partículas sem nenhuma inteligência. Nor-

malmente, o comportamento destas partículas é determinado pelas “forças”. Esta abordagem pode ser expandida através da atribuição de estados internos diferentes para cada evacuado, de forma que estes passam a ter reações distintas, dependendo do seu estado interno. Isto pode ser interpretado como um tipo de “inteligência”.

Os itens a seguir descrevem as características básicas dos modelos de evacuação mais conhecidos. Uma referência mais extensa dos tipos de modelos de evacuação existentes foi elaborada por Schadschneider em [15].

2.3.2 Modelo Fluidodinâmico

Podem ser observadas diversas semelhanças entre a dinâmica de evacuação de pedestres e a dinâmica dos fluidos. Um exemplo clássico é a velocidade dos evacuados ao redor de obstáculos, que se assemelha fortemente com as linhas de corrente existentes na dinâmica de fluidos [30], [31], [32].

HENDERSON [33] estabeleceu uma analogia entre grandes multidões e o comportamento clássico do gás. Foi encontrada uma boa concordância entre as funções de distribuição de velocidade dos pedestres e a distribuição de Maxwell-Boltzmann através de medições de movimento em diferentes multidões em fase de baixa densidade [31], [33].

Motivado por estas observações, HENDERSON [33] desenvolveu uma teoria de mecânica dos fluidos para o fluxo de pedestres, denominado “Modelo Fluidodinâmico”. Descrevendo-se as interações entre os pedestres como um processo de colisão onde as partículas trocam momento e energia, uma multidão homogênea pode ser descrita através da conhecida teoria de cinética dos gases.

Todavia, esta interpretação não é clara, por exemplo, não se sabe ao certo qual a analogia entre a pressão e temperatura no contexto do movimento de pedestres. A temperatura pode ser identificada, por exemplo, como a variância da velocidade e a pressão como o desejo de mover-se contra uma força em um determinado sentido durante a evacuação. A aplicação deste modelo é baseada em diversas leis de conservação. A principal delas, a conservação de massa, é mostrada na Equação 2.4. Nesta equação, é ilustrada a correspondente conservação do número total de pedestres, onde a densidade local é representada em função do local onde se encontra o pedestre e o tempo t : $\rho(r,t)$ e se conecta com o fluxo $J(r,t)$.

$$\frac{\partial \rho(r,t)}{\partial t} + \nabla \cdot J(r,t) = 0 \quad (2.4)$$

É importante ressaltar que a premissa de conservação de massa e momento não é válida para interações entre pedestres, comportamento que em geral nem sequer

atende a 3^o Lei de Newton - Ação e Reação. Para mais detalhes deste modelo, referencia-se a [30], onde HELBING descreve maiores detalhes da base para esta teoria e lista outras diferenças entre o comportamento de fluidos normais e o movimento de pedestres.

2.3.3 Método Analítico

Para aplicações práticas, ferramentas de engenharia foram desenvolvidas através da relação hidrodinâmica (Equação 2.2). Esta ferramenta é conhecida como "Método do Cálculo Manual". O intuito deste modelo é descrever a dinâmica de pedestres como um fluxo numa rede de ligações com a capacidade reduzida.

Estes métodos permitem calcular os tempos de evacuação de uma maneira simples e rápida, e não requer nenhum tipo de simulação computacional. Os dados de entrada para os cálculos podem ser adaptados dependendo do caso a ser estudado, e eles são, normalmente, baseados em observações empíricas.

2.3.4 Autômatos Celulares

Os modelos de Autômatos Celulares são modelos base-força discretizados no espaço, tempo e de estado variável (no caso da dinâmica de pedestres, representado pela velocidade). Através da discretização no tempo, a posição dos evacuados é atualizada em passos de tempo definidos.

O método é implementado através de uma malha de células em um número finito de dimensões. Cada célula está em um dos vários estados de um conjunto finito. O tempo é discreto e o estado da célula em um dado tempo t é uma função do seu estado e do estado das células vizinhas no tempo $t - 1$. A vizinhança das células pode consistir em qualquer número finito de células, onde o estado de cada célula é atualizado, em tempos discretos, de acordo com a mesma regra.

Este modelo foi originalmente elaborado em 1940 por John von Neuman, enquanto trabalhava em problemas de auto-replicação [34]. Desde seu desenvolvimento, este modelo já foi utilizado para diversos tipos de aplicações, incluindo teoria computacional, biologia e simulações de tráfego veicular. Os modelos de tráfego mais comuns são unidimensionais, o que os torna simples do ponto de vista computacional. Em aplicações de dinâmica de evacuação de pessoas, o modelo é bidimensional, o que o torna mais complexo quando comparado com os modelos de tráfego de veículos.

A ideia básica do modelo de Autômatos Celulares para evacuação de pessoas é dividir a área do piso em células discretas, onde cada célula representa a área do piso ou obstáculos e estão ou não ocupadas por pessoas. Durante as simulações, as pessoas se movem de uma célula à outra de acordo com as regras do modelo.

No modelo proposto por SCHADSCHNEIDER [15] [35], a dinâmica dos pedestres é definida por regras que especificam as probabilidades de transição para o movimento para uma das células vizinhas, conforme ilustrado na Figura 2.5

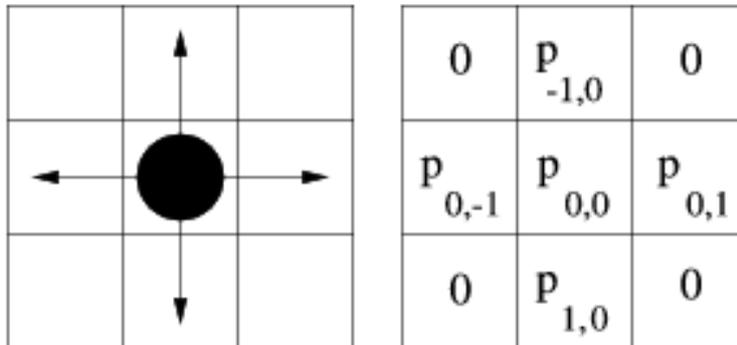


Figura 2.5: Uma partícula, suas possíveis direções de movimento e as correspondentes probabilidades p .

Os modelos Autômatos Celulares, em geral, diferem um do outro na caracterização de sua vizinhança (quantidade de células vizinhas que podem interagir entre si) e na especificação de suas probabilidades. Existem também modelos Autômatos Celulares determinísticos, onde as probabilidades são nulas.

Habitualmente, as probabilidades de transição das células são baseadas nos seguintes critérios:

- A direção de movimento desejada, com relação à saída mais próxima;
- Observação do movimento de outros pedestres;
- Interação com o layout do local (portas, piso, etc.).

A maior vantagem deste método é o seu menor custo computacional quando comparado aos modelos de espaço-tempo contínuos. Todavia, uma desvantagem expressiva deste tipo de modelo é sua incapacidade de modelar as forças físicas que atuam causando efeitos do tipo "Jamming" (formação de obstruções perigosas em estreitamentos, por exemplo).

2.3.5 Modelos de Baixa Fidelidade

Estes modelos simulam a evacuação com baixa precisão. Nestes modelos as instalações são divididas em nós para representar seus obstáculos: cômodos, escadas, corredores, etc. Os nós se conectam através de arcos que representam as ligações reais na estrutura. Uma vez que a localização dos evacuados não é conhecida de forma precisa, as interações físicas e sociopsicológicas entre os evacuados são difíceis

de serem representadas. Um exemplo de modelo de baixa fidelidade é o EVAC-NET [36].

2.3.6 Modelo Força Social

Embora o comportamento humano seja de difícil modelagem, para situações relativamente menos complexas, modelos estocásticos podem ser desenvolvidos se forem restritos às probabilidades comportamentais encontradas em um grupo populacional grande. Para uma modelagem confiável do comportamento de pedestres, é essencial ter uma boa estimativa do comportamento do grupo como um todo e não de cada indivíduo. Não é necessário, por exemplo, saber qual indivíduo tem certa atitude e sim uma boa estimativa da percentagem dos indivíduos que tem dada atitude [12].

Adicionalmente, para uma boa modelagem, faz-se necessário que as forças físicas reais de contato entre pedestres e paredes e de pedestres entre si e sejam consideradas. Estas forças, incluem as "forças de corpo", que aparecem em situação de "Jamming/Clogging", por exemplo. Um modelo que considera estas interações é o modelo Força Social, desenvolvido por HELBING [12], [37]. A ideia central do modelo é descrever os pedestres como partículas, se a aceleração é nula, a partícula mantém sua velocidade. O modelo é descrito em detalhes a seguir.

A mudança temporal na localização de um pedestre i , $r_i(t)$ obedece a Equação 2.5 de movimento descrita abaixo.

$$\frac{dr_i}{dt} = v_i(t) \quad (2.5)$$

O somatório de todas as forças sociais que influenciam o agente i , de massa m_i é representado pelo termo $f_i(t)$ e as pequenas flutuações individuais que refletem variações comportamentais não sistemáticas são dadas por $\xi_i(t)$. Desse modo, as mudanças de velocidade são representadas pela equação de aceleração (Equação 2.6), que representa uma aproximação da Equação de Movimento de Newton.

$$\frac{dv_i}{dt} m_i = f_i(t) + \xi_i(t) \quad (2.6)$$

Uma vantagem particular desta abordagem é a possibilidade do uso flexível do espaço ocupado pelos agentes, o que requer um tratamento contínuo do movimento. Este ponto é crucial para que as observações empíricas do comportamento dos agentes possa ser reproduzida de uma maneira robusta (ou seja, sem ser necessário ajustar o modelo para cada situação e medida em particular).

No modelo de Força Social para agentes, é pressuposto que cada indivíduo i está tentando se mover numa desejada direção e_i^0 , com uma velocidade pretendida v_i^0 , que adapta a velocidade atual v_i para a pretendida, dentro de um certo tempo de

relaxação τ_i (tempo de aceleração no qual um evacuado acelera para a velocidade desejada, pequenos valores de τ_i geram grandes acelerações e vice-versa). Desse modo, o somatório das forças sociais $f_i a(t)$ é dado por:

$$f_i(t) = \frac{1}{\tau_i}(v_i^0 e_i^0 - v_i) + \sum_{j(\neq i)} f_{ij}(t) + \sum_W f_{iW}(t) + \xi_i(t) \quad (2.7)$$

Onde os termos $f_{ij}(t)$ e $f_{iW}(t)$ denotam as forças repulsivas que descrevem a tentativa dos agentes de manter uma certa distância de segurança dos outros agentes e obstáculos, respectivamente como ilustra a Figura 2.6.

Em situações de grandes multidões, forças de contato adicionais aparecem (Equações 2.13 e 2.14 apresentadas mais adiante). Tais forças, refletem efeitos atrativos entre membros de um mesmo grupo ou outras influências (conforme descrito no item 2.2).

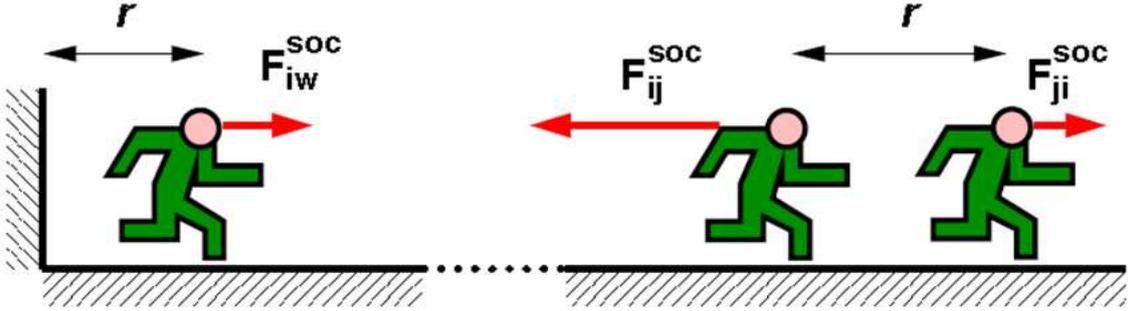


Figura 2.6: Forças de interação entre os obstáculos - agente e agentes-agentes.

As forças de interação entre os agentes têm a seguinte forma:

$$f_{ij}(t) = f(d_{ij}(t)) \quad (2.8)$$

No qual $d_{ij} = r_i - r_j$ é o vetor que aponta a distância entre o centro de massa dos agentes i e j . A dependência das forças de interação para uma especificação circular é dada conforme a Equação 2.9:

$$f(d_{ij}) = A_i \exp\left(\frac{-d_{ij}}{B_i}\right) \frac{d_{ij}}{\|d_{ij}\|} \quad (2.9)$$

O parâmetro A_i reflete a força da interação e B_i a gama de interações. No modelo, é considerado que a população é homogênea, ou seja, estes parâmetros são constantes, calibrados a partir de dados de monitoramento por vídeo.

A tendência psicológica de dois agentes se manterem afastados um do outro quando a distância é pequena é descrita por uma força de interação repulsiva, chamada força social, (f_{ij}) conforme apresentado na Equação 2.10 abaixo.

$$f_{ij} = A_i \exp\left(\frac{(R_{ij} - d_{ij})}{B_i}\right) n_{ij} \left[\lambda + (1 - \lambda_i) \frac{1 + \cos(\varphi_{ij})}{2} \right] \quad (2.10)$$

Tal que $R_{ij} = R_i + R_j$ representa a soma dos raios dos pedestres i e j . O vetor $n_{ij} = (r_i - r_j)/d_{ij}$ representa o vetor da distância entre os agentes i e j normalizado. O último termo da Equação 2.10 escala a quantidade da força de acordo com a direção do agente repulsivo. Um valor de $\lambda < 1$ significa que o agente repulsivo a frente do pedestre em questão tem mais impacto (força maior) do que aqueles que se encontram atrás. O ângulo $\varphi_{ij}(t)$ denota o ângulo entre a direção na qual o pedestre está se movendo $v_i(t)/\|v_i(t)\|$ e a direção $-n_{ij}$ do agente que está exercendo a força de repulsão.

Se um agente toca o outro, a distância d_{ij} entre eles é menor do que a soma de seus raios, R_{ij} . Sendo assim, duas forças são adicionadas ao modelo, a força de corpo, Equação 2.11, e a força de atrito, Equação 2.12, na qual controla o movimento tangencial.

$$k(R_{ij} - d_{ij}) n_{ij} \quad (2.11)$$

$$K(R_{ij} - d_{ij}) \Delta v_{ij}^t t_{ij} \quad (2.12)$$

O termo t_{ij} representa a direção tangencial entre os pedestres, na qual é perpendicular à n_{ij} e $\Delta v_{ij}^t t_{ij} = (v_j - v_i)$ é a diferença entre as velocidades dos pedestres. k e K são constantes do modelo.

Então, as forças de interação entre os pedestres são dadas por:

$$f_{ij} = Kg(R_{ij} - d_{ij}) \Delta v_{ij}^t t_{ij} + [A_i \exp((R_{ij} - d_{ij})/B_i) (\lambda_i + (1 - \lambda_i) \frac{1 + \cos(\varphi_{ij})}{2}) + kg(R_{ij} - d_{ij})] \quad (2.13)$$

Se não existir interações entre os agentes, a função g é nula. A interação entre os agentes e as paredes dos objetos é similar à interação entre os agentes, e é conhecida pela formulação apresentada na Equação 2.14:

$$f_{iW} = [A_i \exp((R_i - d_{iW})/B_i) + Kg(R_i - d_{iW})] n_{iW} - kg(R_i - d_{iW}) (v_i t_{iW}) t_{iW} \quad (2.14)$$

A distância entre o agente i e a parede W é dada por d_{iW} enquanto que o vetor n_{iW} denota a direção unitária perpendicular à parede em questão. O vetor t_{iW} é a direção tangencial entre a parede e o agente.

O fato das equações deste modelo serem baseadas nas forças físicas reais, que surgem quando há formação de multidão, é sua principal vantagem. Isso permite

incluir durante a modelagem os efeitos coletivos (item 2.1.4) típicos devido ao comportamento humano observados na dinâmica de evacuação.

2.3.7 Software FDS+EVAC

Para a modelagem da fumaça, é utilizada a ferramenta de Dinâmica dos Fluidos Computacional FDS (desenvolvida pelo *The National Institute of Standards and Technology*, o NIST). O FDS é uma ferramenta capaz de computar a temperatura, a densidade, a pressão, a velocidade e a composição química dos gases em intervalos de tempo discretos [38].

Para a simulação do fenômeno de movimentação de pessoas é utilizado o programa EVAC, que funciona acoplado à plataforma do FDS e utiliza o Modelo Força social.

Esta ferramenta dispõe de alguns benefícios durante a construção de um modelo de evacuação de emergência. É possível, por exemplo, utilizar diversos tipos de geometria (com graus de confinamento/congestionamento diversificados), visualizar o movimento das pessoas bem como a dispersão da nuvem de fumaça e ainda, considerar a interação entre os evacuados e o fogo.

O código do programa é capaz de reduzir a velocidade de caminhada por conta da densidade da fumaça dos evacuados conforme a equação 2.15.

$$V_i^0(K_s) = Max[v_i^0 min, \frac{v_1^0}{\alpha}(\alpha + \beta K_s)] \quad (2.15)$$

Onde v_i^0 é a velocidade desejada pelo agente, K_s é o coeficiente de extinção da fumaça ($1/m$) e os valores de α e β são $0,706 m/s$ e $-0,057 m^2/s$, respectivamente. Os valores de α e β foram determinados experimentalmente por FRANTZICH e NILSSON em [39]. O valor mínimo de v_0 é obtido através da equação 2.16:

$$V_i^0, min = 0,1(v_i^0) \quad (2.16)$$

É possível ainda calcular as doses letais dos produtos oriundos do fogo e utilizar o comportamento da propagação do incêndio como base para tomada de decisão dos evacuados, considerar as ações dos evacuados como intervenção no comportamento da dispersão da fumaça (através do ato de abrir e fechar portas, por exemplo).

Explorando os algoritmos da plataforma do FDS+EVAC, é possível ainda criar rota de saída para os evacuados. O software é capaz de calcular uma rota a partir de qualquer ponto do modelo até uma saída.

Esta geração de rotas é feita através de um exaustor "virtual" localizado nas portas de saída que sugam o "fluido virtual" para fora do domínio. Estas direções de fluido criam um campo direcional, que sempre leva à saída, guiando, deste modo, os

evacuados até a saída. A Figura 2.7 ilustra um exemplo deste campo.

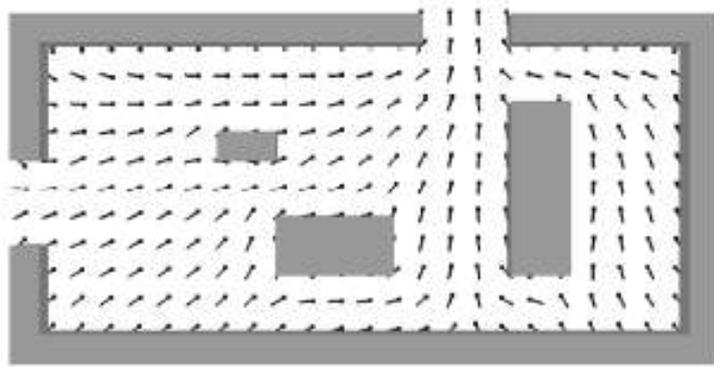


Figura 2.7: Campo de Fluxo utilizado para guiar os evacuados até uma porta de saída durante a evacuação.

Capítulo 3

Análise Experimental

3.1 Simulação de Evacuação em Escala Real no Edifício Jorge Machado Moreira

No dia 7 de abril de 2017, foi realizada uma simulação de evacuação no bloco A do Edifício Jorge Machado Moreira (JMM), prédio no qual abriga além da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, a Reitoria da Universidade Federal do Rio de Janeiro.

O experimento teve por objetivo reunir dados a serem utilizados neste trabalho e, por conseguinte, contribuir com a segurança da instalação. Participaram do ensaio alunos e funcionários da FAU, cadetes do CBMERJ e pesquisadores da COPPE, tendo este ocorrido no térreo, segundo e terceiro andares do Bloco A da edificação.

O simulado foi dividido em duas etapas: com e sem presença de fumaça artificial. Durante as duas fases foram coletadas informações a respeito do comportamento e características do movimento de pessoas, efeitos coletivos, dados de velocidade, tempo total de escape, densidade e fluxo de pedestres.

Serão descritos em detalhes a seguir, respectivamente, os materiais e métodos utilizados no exercício.

3.1.1 Do Local

O bloco A do edifício JMM está localizado à Avenida Pedro Calmon, 550 - Cidade Universitária, Rio de Janeiro. A Figura 3.1 apresenta a sua localização com relação às coordenadas geográficas dentro do campus da universidade [1].

Esta parte da instalação possui 9 pavimentos, mais o subsolo e aproximadamente 41 metros de altura e 175 metros de comprimento. A área útil total por andar totaliza cerca de 4000 m^2 . A Figura 3.2 traz a vista frontal da sua face Noroeste.

Na Figura 3.3 são apontadas as plantas baixas do térreo (a), segundo (b) e terceiro andar (C) do prédio, nesta ordem. As marcações em vermelho indicam a

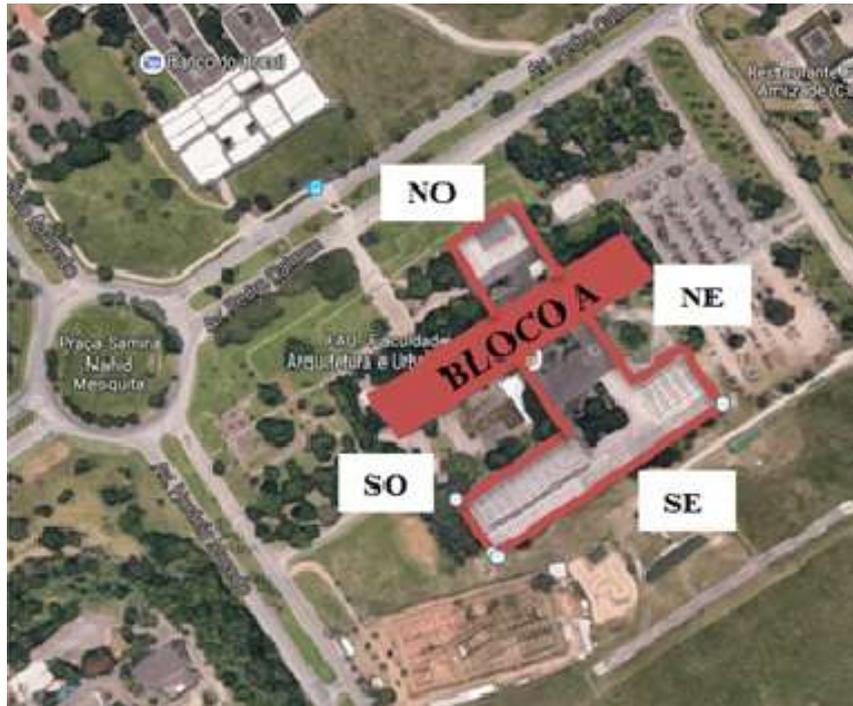


Figura 3.1: Localização geográfica da instalação dentro do campus da universidade [1].

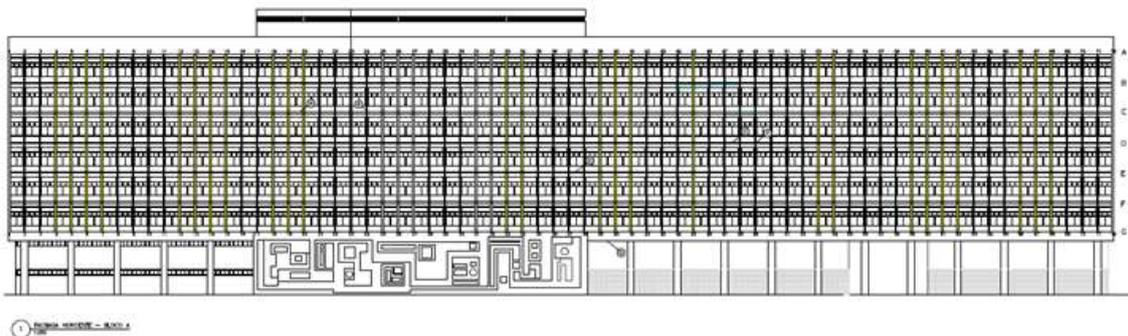


Figura 3.2: Vista frontal da fachada Noroeste.

localização das portas de saída em cada andar e suas respectivas dimensões.

A porta principal do andar térreo é do tipo corredição e possui largura aberta de aproximadamente 2,20 metros. O arranjo deste pavimento é composto por salas em sua face Nordeste e uma área aberta em sua face Sudoeste. A disposição do segundo andar é semelhante ao do térreo, sendo a dimensão da sua porta de saída igual a 1,9 metros. Com relação ao terceiro pavimento, a distância entre o final do lado Sudoeste do corredor principal e a porta de saída do prédio (que dá acesso às escadas) é de 117,1 metros. A distância entre o final do lado Nordeste do corredor e esta mesma porta é de 55,4 metros. Este corredor possui largura de 2,97 metros.

A Figura 3.4 ilustra outras características relevantes da edificação: (i) o Bloco A do prédio dispõe de apenas uma saída, localizada na face Noroeste do andar

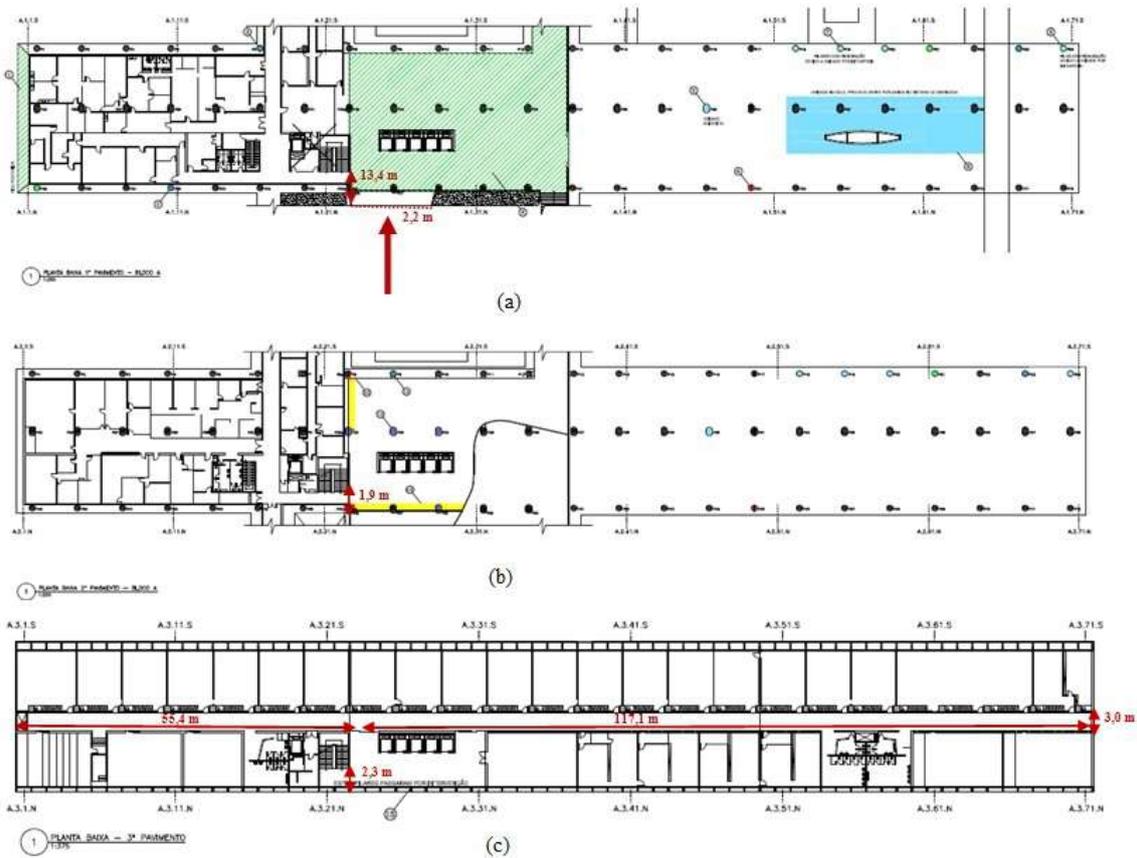


Figura 3.3: Planta baixa: (a) andar térreo; (b) segundo andar; (c) terceiro andar.

térreo, na qual é acessada por meio dos elevadores ou através das escadas (a); (ii) existe, em cada pavimento do edifício, um hall de acesso aos elevadores em toda extensão vertical do prédio (b); (iii) O acesso ao hall é feito por meio de duas portas que possuem, quando completamente abertas, uma passagem com dimensão de aproximadamente 2,92 metros cada uma, sendo a distância entre a porta e o acesso as escadas é de 9,4 metros (c); (iv) escada é simétrica ao longo de toda extensão vertical do prédio e possui largura do degrau igual a 0,3 metros e espelho igual a 0,2 metros, sendo sua largura de 2,0 metros e seu patamar de extensão de 4,55 metros (d).

O terceiro andar possui, entre espaços para lecionar, auditórios e áreas administrativas, um total de 30 salas. As posições iniciais dos participantes foram alocadas no terceiro andar do edifício tendo em vista que se trata do único pavimento onde há salas de aula e se encontra liberado para uso. A distância até ao hall dos elevadores (por onde se acessa as escadas) é maior quando se caminha a partir da face Sudoeste do edifício (117,1 m).

À vista disso, com intuito de retratar o pior cenário (aquele no qual os participantes se deslocam por uma distância maior), optou-se por alocar a posição inicial dos participantes nas salas localizadas nesta face do edifício.

A Figura 3.5 mostra a disposição das salas selecionadas para utilização no experimento dentro do arranjo geral do terceiro andar. Na sequência, na Figura 3.6 é apresentada a identificação destas sala durante o ensaio: (a) Sala 343; (b) Numerada 01; (c) Sala 330; (d) Numerada 02; (e) Sala 339; (f) Numerada 03; (g) Sala 328; (h) Numerada 04.



Figura 3.4: Características da instalação: (a) porta principal do andar térreo; (b) elevadores do segundo andar; (c) porta de saída do segundo andar; (d) escada.

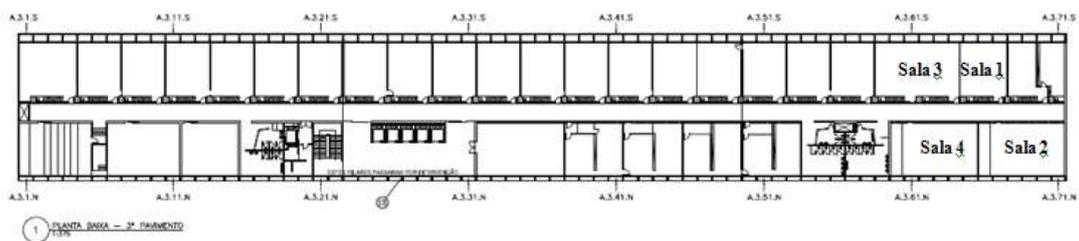


Figura 3.5: Identificação das salas utilizadas durante o experimento na planta baixa do terceiro andar.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)



(g)



(h)

Figura 3.6: Salas utilizadas durante o ensaio: (a) Sala 343; (b) ID 01; (c) Sala 330; (d) ID 02; (e) Sala 339; (f) ID 03; (g) Sala 328; (h) ID 04.

3.1.2 Participantes

Foram recrutados a participarem do simulado: (i) alunos; (ii) professores; (iii) demais funcionários da FAU. A seguir são descritas as características dos voluntários e o processo de recrutamento.

Foi endereçado um convite formal para participação no simulado através do portal de comunicação da UFRJ, o SIGA, aos potenciais interessados (alunos, professores e demais funcionários da FAU). Juntamente com o convite, foi enviado um link que direcionava a uma página onde deveria ser preenchido um formulário de inscrição no simulado (pré-requisito para participação). Neste formulário foram solicitadas as seguintes informações: nome, idade, sexo, matrícula e altura.

Além disso, foram coletadas informações a respeito de possíveis problemas respiratórios e transtornos psiquiátricos dos voluntários, com o intuito de preservar as condições de segurança e minimizar o risco de acidentes durante o teste.

Adicionalmente, no formulário de inscrição foram requeridas informações a respeito da experiência dos participantes no campo de Segurança Contra Incêndio (SCI).

Visando não alterar o resultado do experimento, voluntários com experiência prévia em SCI não foram selecionados.

Também no e-mail com convite formal, foi explicado que o simulado iria ocorrer em duas etapas: com e sem presença de fumaça artificial e contaria com a presença dos cadetes do CBMERJ para auxiliar na organização e garantir a segurança do evento.

Colaboraram com o simulado apenas alunos, dos quais 36 eram mulheres e 14 homens, totalizando 50 voluntários. Grande parte dos voluntários era do sexo feminino 72 %, o que caracteriza de forma bem realística a população da FAU, que é, em sua maioria, do sexo feminino.

Professores e demais funcionários da FAU não se prontificaram a participar do simulado (alguns atuaram apenas como observadores ou fornecendo apoio na organização).

Desse modo, o simulado contou com a participação apenas de alunos, que constituem um público bem jovem, com idade variando de 17 a 26 anos, com média de 20,1 anos. A altura dos participantes variou de 1,52 m a 1,82 m, sendo a média igual a 1,67 m e o desvio padrão de 0,078. A Tabela 3.1 sumariza as características dos participantes.

Tabela 3.1: Características dos participantes do simulado - idade e altura

Participante	Mínima	Máxima	Média	Desvio Padrão
Idade (anos)	17	26	20,1	1,76
Altura (metros)	1,52	1,82	1,67	0,078

Com objetivo de facilitar a coleta de dados, os participantes foram identificados através de etiquetas numeradas por meio de uma sequência de números, como mostra a Figura 3.7.



Figura 3.7: Identificação dos participantes- sufixo: numeração da sala e prefixo ID do aluno.

O simulado contou com o apoio de 47 cadetes do terceiro ano do curso de formação de oficiais da academia do CBMERJ. Estes foram divididos em 3 equipes: operacional, apoio e segurança.

A equipe operacional foi responsável por instruir os participantes a respeito do seu comportamento durante o simulado e manter a ordem no seu transcorrer.

O papel da equipe de apoio foi realizar a coleta de dados durante o simulado. Aproximadamente 15 dias antes do evento, todos os cadetes participaram de uma palestra na academia a respeito da pesquisa no âmbito de Movimentação de Pessoas em Situações de Incêndio que vem sendo realizada pela equipe de pesquisadores COPPE.

Nesta palestra foram abordados assuntos relevantes inerentes ao tema, como comportamento de pessoas em situações de evacuação, efeitos coletivos observados e movimentação na fumaça. O foco do evento foi fornecer subsídios técnicos para melhoria da coleta de dados durante o simulado e, além disso, contribuir com a formação acadêmica da equipe de cadetes, uma vez que o tópico é parte importante

do conteúdo abordado durante o curso de formação de oficiais.

A equipe de segurança ficou de prontidão visando garantir a segurança (realizar algum atendimento em caso de acidente). Os participantes foram instruídos a levantar o braço esquerdo em situação de desconforto, sinalizando a necessidade de ajuda. A Figura 3.8 apresenta todos os cadetes que participaram do ensaio.

Na Figura 3.9 encontra-se ilustrada a atuação das três equipes: equipe operacional, cooperando na organização em três momentos: (a) instruindo os participantes no início do evento; (b) demarcando os pontos importantes no edifício; (c) acionando o lançamento do fumígeno; (d) equipe de apoio, colaborando com a coleta de dados dos participantes nas salas de aula; (e) equipe de segurança, realizando atendimento à uma aluna que não se sentiu bem durante a etapa do simulado com presença de fumaça.



Figura 3.8: Cadetes do terceiro ano do curso de oficiais do CBMERJ que colaboraram com exercício.

Contribuíram também com a atividade uma equipe de pesquisadores da COPPE. Este grupo atuou bem como os cadetes da equipe de apoio, na coleta de dados durante o simulado. Composto por duas alunas de doutorado e três de mestrado do PEC e um aluno de doutorado do Programa de Engenharia Mecânica (PEM), estes foram divididos e atuaram das seguintes formas: (i) realizando vídeo-gravação; (ii) fazendo observações; (iii) efetuando anotações relevantes; (iv) cronometrando os tempos.



Figura 3.9: Atuação dos grupos dos cadetes da academia do CMBERJ: (a), (b), (c) operacional; (d) apoio; (e) segurança.

3.1.3 Fumaça Artificial

Durante a etapa do simulado com presença de fumaça foram utilizados diferentes mecanismos para sua geração. Foi manipulada uma máquina do tipo “*FOG machine*”, na qual emprega um líquido não tóxico (propileno-glicol) que é elevado até seu ponto de ebulição através de um trocador de calor. Por conseguinte, é produzida uma nuvem de fumaça com alcance de aproximadamente 30 m.

Além da máquina de fumaça, foram aplicados fumígenos, que utilizam a queima de combustível-oxidante e aglutinante (pó prensado) para geração de fumaça. A nuvem de gás produzida através desses artefatos é colorida, não tóxica, porém irritante e provoca grande redução de visibilidade.

A Figura 3.10 expõe os meios utilizados para geração de fumaça artificial durante o exercício: (a) e (b) *FOG machine* ; (c) e (d) fumígeno.

3.1.4 Procedimento

Durante as duas fases do simulado, participaram simultaneamente os 50 alunos inscritos. Em ambos os casos, o caminho percorrido pelos participantes para evacuar o prédio foi o mesmo: a partir das salas ilustradas na Figura 3.6, caminharam pelo corredor principal até a porta de acesso ao hall dos elevadores do lado Nordeste, em



Figura 3.10: Fumaça artificial utilizada na simulação: (a) *FOG machine*; (b) Fumaça gerada através da *FOG*; (c) fumígeno; (d) fumaça gerada pelo fumígeno.

seguida desceram as escadas e acessaram a saída do prédio pela porta principal do Bloco A (Figura 3.5).

A Tabela 3.2 quantifica os alunos presentes nas salas selecionadas em cada um dos cenários considerados no ensaio.

Tabela 3.2: Características dos cenários considerados no exercício em ambas as fases

Cenário	Sala 1	Sala 2	Sala 3	Sala 4
Com fumaça (alunos)	18	11	11	10
Sem fumaça (alunos)	18	11	11	10

Os cadetes do grupo de apoio e os pesquisadores da COPPE, responsáveis pela coleta de dados durante o ensaio foram alocados em pontos estratégicos denominados “check points” (CP). Ao total, foram 10 CP’s, distribuídos da seguinte forma: um em cada sala de aula, um ao final do corredor (face Sudoeste), um na altura da porta de acesso ao hall de elevadores do terceiro andar (mais próxima à face Nordeste), um próximo às escadas do térreo e do segundo e terceiro andares e um na porta de saída como mostra a Figura 3.11.

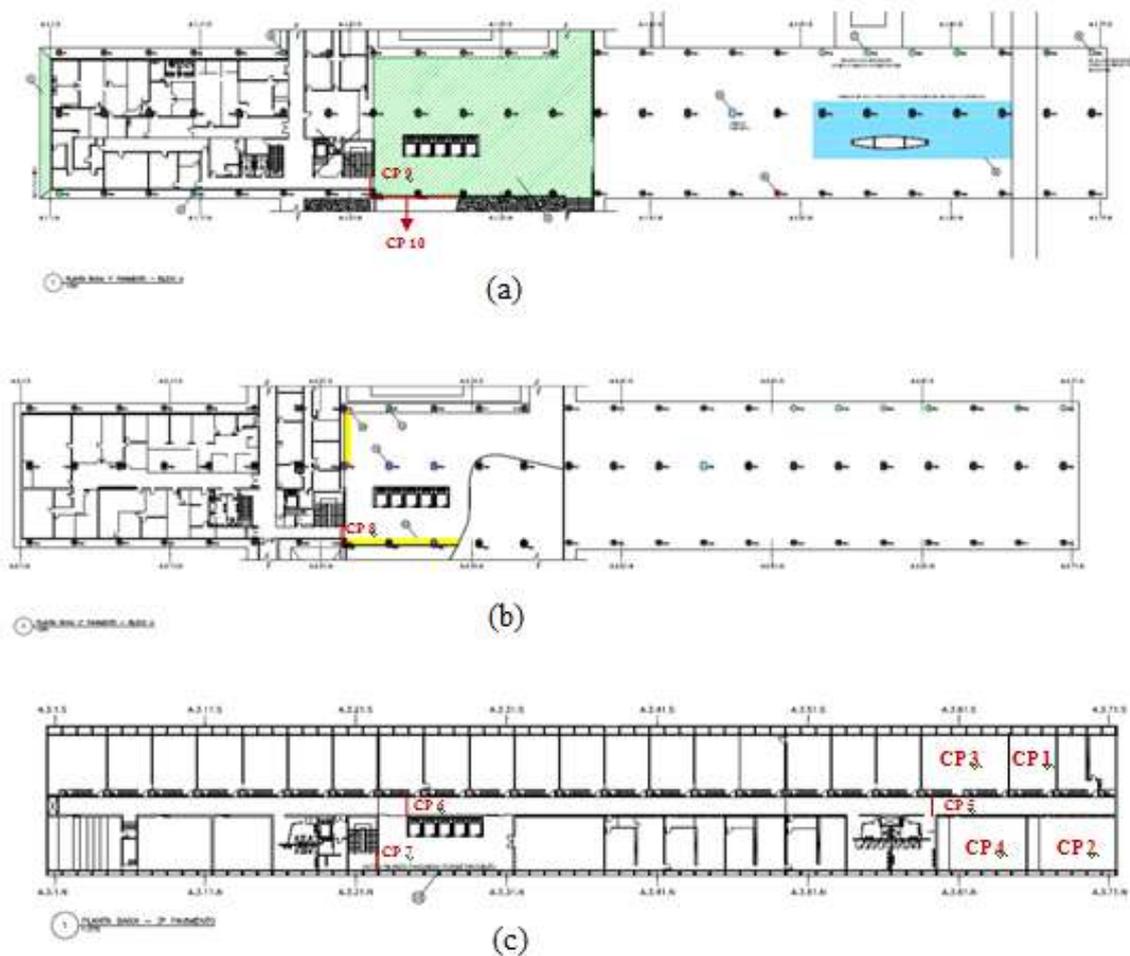


Figura 3.11: Localização dos check points: (a) térreo; (b) segundo andar; (c) terceiro andar.

No início do simulado, os cadetes encaminharam e distribuíram (de forma não

uniforme) os participantes nas salas selecionadas. Nas salas de aula, os participantes foram identificados conforme a Figura 3.7.

Após a identificação, estes receberam as seguintes instruções dos cadetes: i) trata-se de um simulado; ii) quando soar o apito começará o simulado iii) não utilizem as janelas ou elevadores; iv) caso se sintam mal, dirija-se a um cadete com o braço esquerdo levantado; v) mantenham a calma, não corram, não gritem, não empurrem os demais participantes.

Em seguida, os alunos permaneceram nas salas por um tempo até que o apito soasse para início da primeira etapa do simulado, sem fumaça. Após realização da primeira etapa do simulado, os participantes se reuniram na área externa da entrada do bloco A do edifício, onde os cadetes puderam contar os participantes e verificar se todos, de fato, deixaram o prédio.

Logo após a contagem, os participantes foram direcionados de volta as salas de origem, onde preencheram uma ficha de avaliação do simulado sem fumaça.

Transcorreu um tempo após o preenchimento das fichas por parte dos participantes até que o alarme soou novamente para início da segunda etapa do simulado, com presença de fumaça. Durante este tempo, os dispositivos de geração de fumaça mostrados na Figura 3.10 foram acionados de modo que o corredor e escada pudessem ficar cobertos pela fumaça.

A Figura 3.12 ilustra a localização destes dispositivos (pontos vermelhos): (a) *FOG machine* fixada próxima a face Sudoeste do corredor; (b) fumígeno posicionada no corredor, próximo da face Sudeste; (C) fumígeno alocado no segundo pavimento da escada.

Após o lançamento da fumaça, a sequência de eventos da primeira etapa do simulado se repetiu para a segunda. Devido à presença de fumaça no prédio, não foi possível que os participantes retornassem as salas para preencher as fichas de avaliação. Estas foram preenchidas on-line, foi enviado um link através do canal de comunicação SIGA.

Os dados de vídeo gravação foram analisados em detalhes com intuito de reconstruir as ações e os caminhos percorridos por cada participante. A partir da coleta destes dados, foram calculadas as velocidades de cada participante bem como a densidade e o fluxo de pessoas.

O recurso de vídeo gravação foi também utilizado para avaliar o comportamento dos participantes durante o exercício. O tempo de pré-movimento foi cronometrado pelos cadetes em cada sala de aula.

As respostas dos formulários, fornecidas pelos cadetes, participantes e pesquisadores da COPPE, foram processadas e àquelas consideradas relevantes serão apresentadas de forma estatística neste documento.

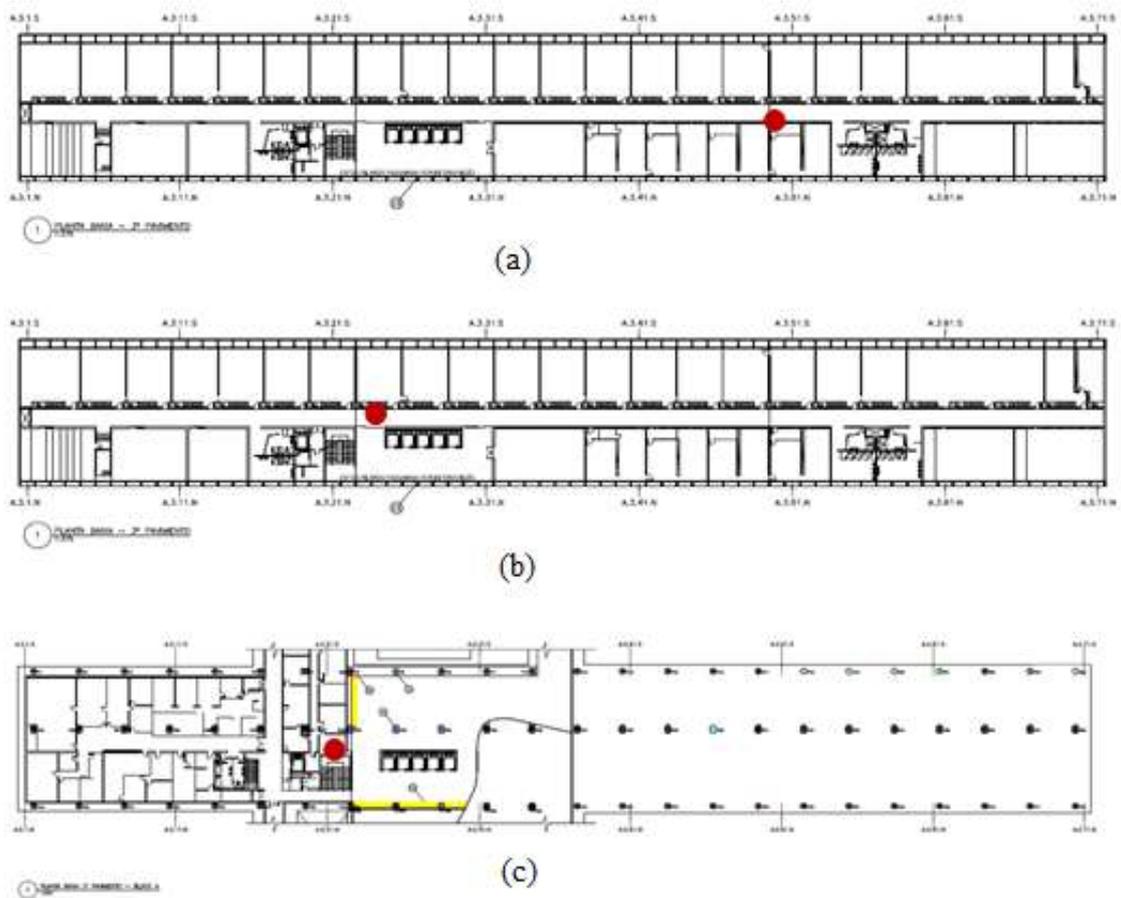


Figura 3.12: Ponto de lançamento da fumaça artificial (pontos vermelhos): (a) face Sudoeste do corredor; (b) face Sudeste do corredor; (C) segundo pavimento da escada.

3.1.5 Resultados

Esta seção apresenta os dados coletados durante o experimento: i) tempo de reação; ii) densidade e fluxo de pessoas; iii) padrões de movimento e efeitos coletivos; iv) tempo total de evacuação; v) velocidade dos participantes em diferentes partes do caminho percorrido por eles durante o simulado (escada e corredor) .

Como só existe uma via de escape no prédio, não foi possível avaliar a possibilidade de escolha entre diferentes saídas por partes do participante ou a própria efetividade de uma saída de emergência.

Os tempos de pré-movimento foram coletados em cada sala de aula para o primeiro e o último participante a reagir (este tempo é composto pelo tempo de percepção, interpretação e ação). A Tabela 3.3 apresenta os resultados para cada sala de aula para os dois cenários considerados no simulado.

Observa-se que não houve variação significativa entre os tempos coletados para a primeira e segunda etapa do simulado (com e sem presença de fumaça, respectivamente), em cada sala.

Tabela 3.3: Tempo de pré movimento dos participantes em ambas as etapas do ensaio.

Cenário	Tempo (s)	Sala 1	Sala 2	Sala 3	Sala 4
Sem fumaça	Primeiro	5	4	4	3
Sem fumaça	Último	18	9	5	5
Sem fumaça	Média	11,5	6,5	4,5	4
Com fumaça	Primeiro	3	4	3	2
Com fumaça	Último	20	9	5	5
Com fumaça	Média	11,5	6,5	4	3,5

Desse modo, os valores médios para os dois cenários permaneceram bem próximos. A notável diferença entre o tempo médio calculado para a sala 1 com relação às demais se justifica pelo número maior de participantes que ali se encontravam alocados no início do simulado.

O fluxo específico e a densidade de pessoas foram obtidos para o corredor do terceiro andar e para escada. Dada a baixa visibilidade durante a segunda etapa do exercício por conta da fumaça artificial, estes valores foram calculados apenas para a primeira etapa do simulado.

Estes parâmetros são proporcionais à largura do caminho, ao número de pessoas e a velocidade. A Tabela 3.4 sumariza os valores calculados, onde a notável diferença entre os valores para o corredor e a escada se deve a discrepância entre as medidas de largura do caminho.

Para fins de cálculo da largura efetiva dos caminhos, foram considerados os critérios propostos em [2]. No caso da escada, foram subtraídos 15 centímetros do total (2 metros) da largura, referente ao corrimão existente, resultando desta forma em uma medida efetiva de 1,85 metros.

Para o corredor do terceiro andar, foi observada a presença de objetos de largura de aproximadamente 80 centímetros obstruindo o caminho dos participantes, conforme apresentado na Figura 3.13. Por consequência, conservativamente, a largura efetiva do corredor considerado foi de 2,20 metros.

Tabela 3.4: Características dos cenários considerados no exercício em ambas as fases.

Local	Largura do caminho (m)	$J_s(m/s^{-1})$	$\rho(m^{-2})$
Corredor - Terceiro andar	2,20	0,33	0,22
Escada	1,85	0,80	0,80

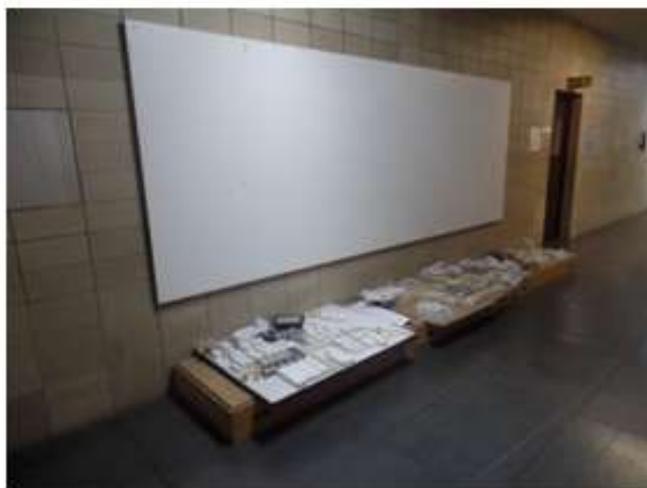


Figura 3.13: Presença de objetos de largura de aproximadamente 80 cm obstruindo o corredor do terceiro andar.

Os dados referentes aos padrões de movimento, características do comportamento dos participante e efeitos coletivos foram coletados a partir dos vídeos, fotos e fichas de participação.

Com relação ao cenário 1, durante o ensaio os participantes não apresentaram receio em iniciar a evacuação. Nenhum participante relatou dificuldade em encontrar a saída do prédio. Pressupõe-se que o prévio conhecimento da única saída de emergência existente no edifício e a instrução passada pelos cadetes do CBMERJ contribuíram para que todos os participantes chegassem até a saída com facilidade.

Do total de participantes, 100 % relatou que ouviu o sinal sonoro (apito) emitido nas salas para iniciar a evacuação. Acerca da atitude ao ouvir o sinal sonoro, apenas 8 participantes do total de 50 (16 %) relatou que começou a caminhar imediatamente. O restante dos alunos respondeu na ficha de avaliação que juntou seus pertences antes de iniciar o movimento.

Com relação à permanência junto a outro participante durante o simulado, 70 % dos participantes responderam que tiveram esta atitude. Este tipo de comportamento também foi observado nas fotos e vídeos gravações. Este efeito foi relatado na literatura por PAN [8].

A Figura 3.14 expõe este tipo de efeito para duas alunas durante dois momentos no ensaio: (a) no corredor do terceiro andar; (b) no corredor que dá acesso à porta principal do térreo.

Dada à baixa densidade de pessoas, conforme apresentado na Tabela 3.4, não foi observada nenhum tipo de obstrução no percurso do corredor do terceiro andar. Contudo, devido ao estreitamento da largura efetiva e conseqüente aumento do fluxo, este tipo de efeito *jammimg* foi notado na escada.

A Figura 3.15 retrata em (a) a ausência deste efeito no corredor do terceiro

andar e em (b) sua presença no segundo pavimento da escada dado o estreitamento da largura do caminho.



Figura 3.14: Permanência junto a outro participante durante o ensaio: (a) no corredor do terceiro andar; (b) no corredor principal do térreo.



Figura 3.15: Efeito *jamming*: (a) ausência de obstruções durante o percurso no corredor do terceiro andar; (b) formação do efeito no segundo pavimento da escada.

Na simulação do cenário 2, com presença de fumaça, foi observado um grande receio por parte dos participantes em atravessar a fumaça que se encontrava no corredor por conta da baixa visibilidade.

Os cadetes relataram que os participantes decidiram iniciar o movimento através da fumaça após terem visto a primeira participante (ID 408) atravessar a nuvem. Este tipo de efeito coletivo é relatado na literatura como “*herding*” e significa observar e seguir o comportamento dos demais evacuados, ou “ir com a multidão”. A Figura 3.16 apresenta: (a) a primeira participante a atravessar a nuvem de fumaça e em (b) os demais participantes seguindo o comportamento da participante ID 408.



Figura 3.16: Efeito *herding*: (a) participante ID 408 atravessando a nuvem de fumaça no corredor do terceiro andar; (b) iniciativa dos participantes em atravessar a nuvem de fumaça.

Bem como foi relatado no primeiro cenário, 100 por cento dos participantes afirmaram que ouviram o sinal do apito para dar início à evacuação do edifício. A maioria dos participantes (80 por cento) expôs que sua atitude após ouvir o sinal sonoro foi pegar seus pertences antes de começar a caminhar em direção à saída de emergência.

Ocorreu uma diminuição neste número quando comparado ao cenário 1. Houve ainda dois relatos de pessoas que saíram e deixaram seus pertences nas salas.

Aproximadamente 25 por cento dos participantes relatou que não permaneceu junto a outro participante durante a evacuação. Houve uma diminuição nesta porcentagem quando comparado ao cenário 1.

No cenário 2, diversos participantes tiveram a atitude de colocar a mão nas paredes e no corrimão das escadas ao atravessar a nuvem de fumaça. A Figura 3.17 mostra os participantes com esse padrão de comportamento ao descer as escadas. É possível observar também a redução na visibilidade gerada pela fumaça.



Figura 3.17: Atitude de apoiar as mãos no corrimão observada no cenário 2.

Foram calculados os tempos totais de evacuação para as duas etapas do simulado. O CP 10 (porta de entrada principal do Bloco A) foi o final do percurso (que teve início nas salas de aula), considerado como ponto seguro em caso de evacuação de emergência. A Tabela 3.5 apresenta o tempo mínimo, o máximo e a média calculados para cada etapa. A Figura 3.18 ilustra os gráficos com o número cumulativo de pessoas evacuadas em função do tempo para as etapas sem e com presença de fumaça, respectivamente.

Tabela 3.5: Tempo total de evacuação para as duas etapas do ensaio.

Tempo (s)	Mínimo	Máximo
Cenário 1	95	154
Cenário 2	83	173

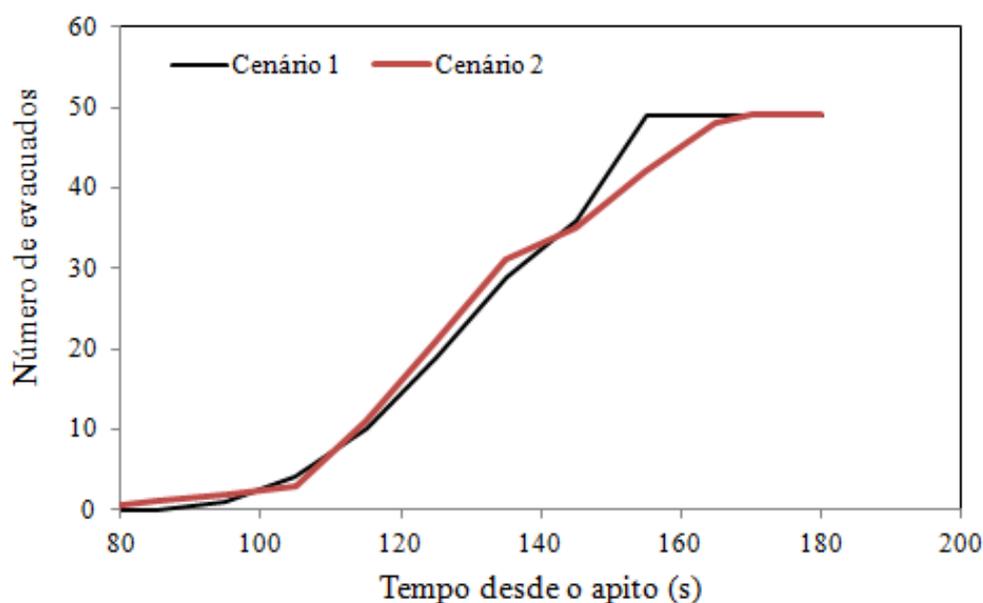


Figura 3.18: Número cumulativo de evacuados para as duas etapas do simulado.

Embora o tempo da primeira participante a evacuar o prédio seja menor na segunda etapa do simulado, o tempo total requerido para evacuação do prédio é maior para este cenário.

Na segunda etapa do simulado, uma participante (ID 106) não se sentiu bem com a presença da fumaça e não completou a evacuação do prédio. O dados de tempo desta participante referente ao cenário 2 do experimento foram descartados.

As velocidades de movimento foram calculadas para duas diferentes partes do trajeto percorrido pelos participantes durante o simulado: o corredor principal do terceiro andar e as escadas de acesso à porta principal de saída, localizada no térreo.

Não foi possível calcular a velocidade dos participantes durante a segunda etapa do simulado, uma vez que a redução na visibilidade por conta da fumaça no corredor e na escada não permitiu a correta identificação dos participantes.

Os modelos de evacuação existentes não explicitam a possibilidade de se considerar comportamentos complexos inerentes à dinâmica de movimentação de pessoas, e.g., zig-zag e “para-e-vai”. Por conseguinte, optou-se por desprezá-los durante o cálculo das velocidades, ou seja, as paradas realizadas pelos participantes durante o movimento foram desconsideradas e assumiu-se o trajeto percorrido por eles como uma linha retilínea.

Para cada participante foi calculada uma velocidade a partir da razão entre sua distância percorrida até determinado CP e o tempo gasto para realização do percurso.

O cálculo da velocidade no corredor do terceiro andar para cada participante considerou a distância por eles percorrida desde a saída das salas (ponto inicial do simulado) até o final do CP 6 e o tempo gasto neste trajeto. Na Figura 3.19 é possível observar o caminho percorrido por cada participante desde a saída das salas até o CP 6, onde a distância da sala 1 até esse ponto é igual a 104,5 metros, da sala 2 é de 104,0, desde a sala 3 tem o valor de 96,0 e da sala 4 é de 89,0 metros.

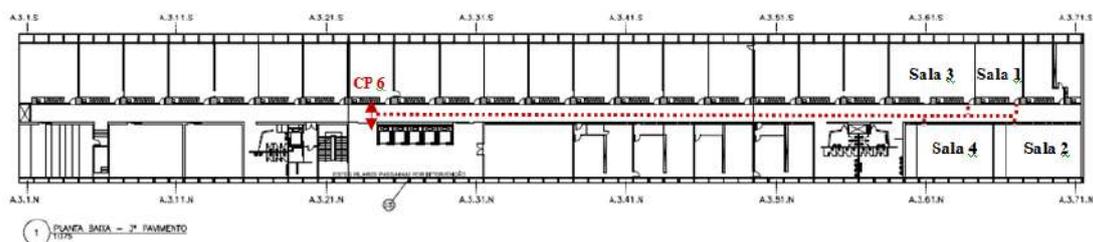


Figura 3.19: Distância entre as salas utilizadas no exercício e o CP 6.

Esta mesma metodologia foi empregada durante o cálculo das velocidades dos participantes na escada. Foi considerado o trecho desde quando eles acessaram a escada no terceiro andar até a saída dela no térreo. O cálculo das distâncias dos degraus (4,68 metros), foi feito com base na angulação vertical dos degraus da escada. O valor da hipotenusa de 0,36 metros foi multiplicado pela quantidade de degraus (13).

A Figura 3.20 exhibe: (a) o trajeto horizontal percorrido pelos participantes na escada; (b) dimensões e angulação dos degraus.

Na Tabela 3.6 são sintetizadas as velocidades mínima, máxima e média e o desvio padrão calculados para dois percursos do ensaio: (i) corredor do terceiro andar e (ii) escada, desde o terceiro pavimento até o térreo, onde observa-se uma redução significativa na velocidade dos participantes na escada com relação àquelas calculadas no corredor.

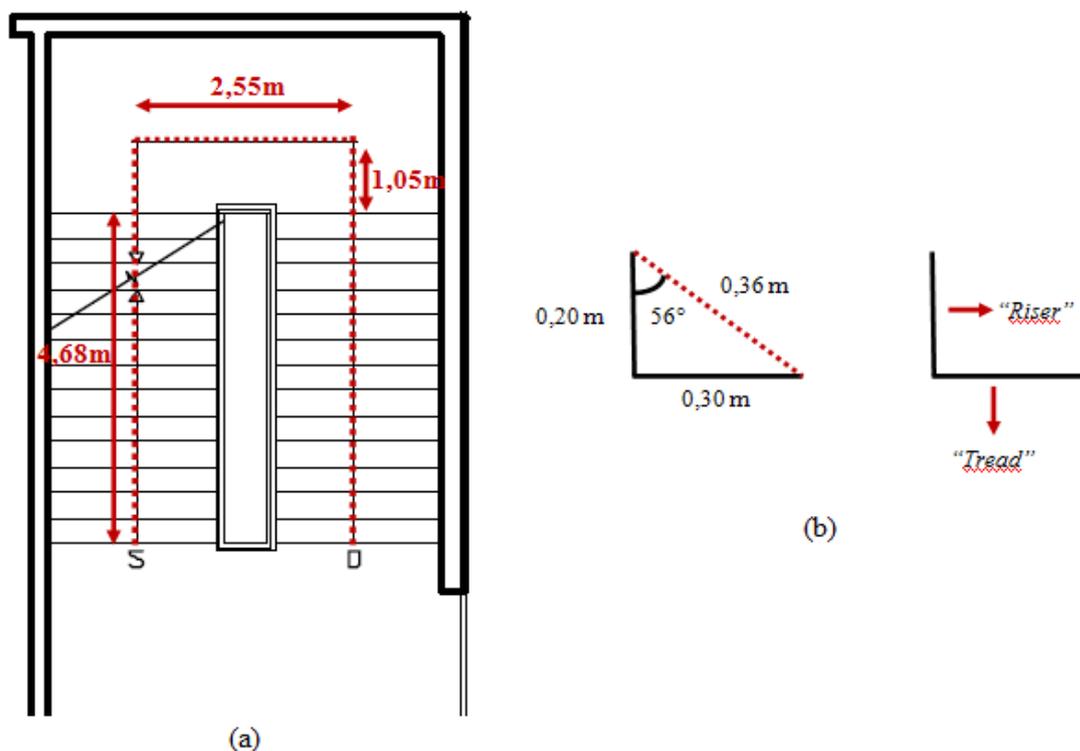


Figura 3.20: Dimensões da escada: (a) caminho percorrido pelos participantes na escada; (b) angulação vertical da escada, 56 graus.

A Figura 3.21 ilustra a curva acumulada do número de participantes em função do tempo gasto nos percursos do corredor e da escada.

O menor tempo gasto no trecho desde a saída das salas até o ponto final de medição do corredor (CP 6) foi de 53 segundos, referente ao participante ID 408. O maior tempo medido (77,7 segundos) para realização deste percurso foi da participante ID 109.

A respeito do tempo gasto pelos participantes na extensão da escada, nota-se, a partir da Figura 3.21, que o menor tempo gasto foi de 18 segundos e o máximo de 36 segundos.

Tabela 3.6: Cálculo das velocidades em diferentes trechos do trajeto percorrido pelos alunos durante o exercício.

Dados	Corredor	Escada
Distância (m)	89,0 - 104,5	28,02
V _{mín} (m/s)	1,34	0,78
V _{máx} (m/s)	1,70	1,54
V _{média} (m/s)	1,49	1,0
Desvio padrão (m/s)	0,09	0,14

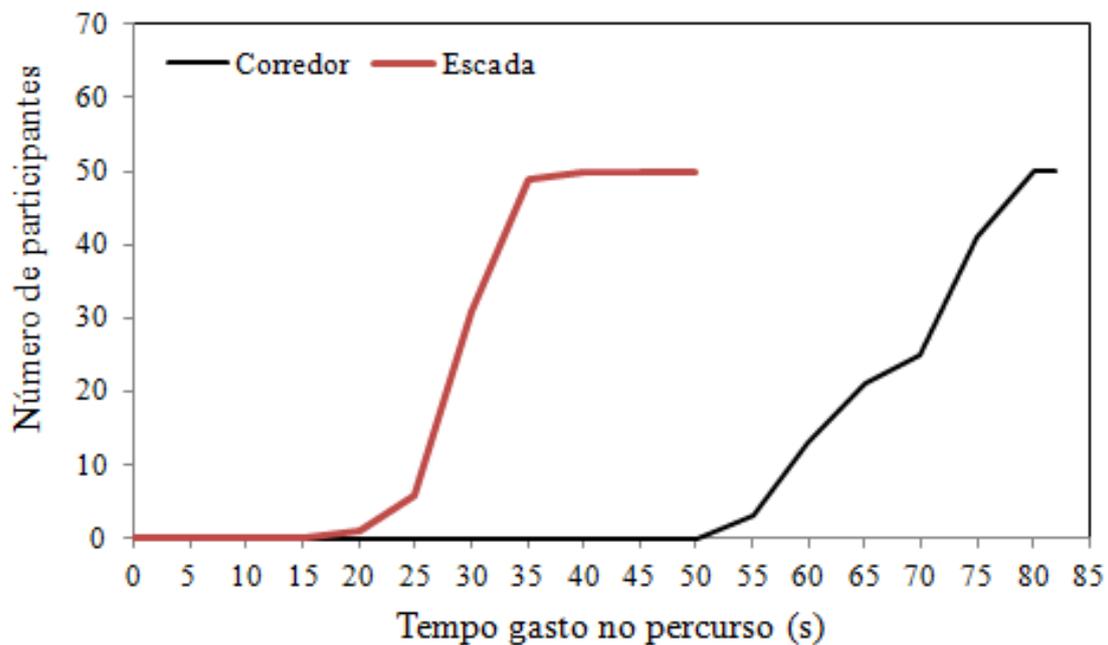


Figura 3.21: Dimensões da escada: (a) caminho percorrido pelos participantes na escada; (b) angulação vertical da escada, 56 graus.

3.1.6 Análise Estatística dos Dados de Velocidade Coletados

Neste capítulo, os resultados colhidos para o teste são avaliados utilizando ferramentas estatísticas, de forma a extrair o máximo de informação contida nos resultados obtidos no experimento.

Durante a simulação de escape, é natural que os distintos participantes desenvolvam velocidades diferentes entre si, devido às suas características pessoais (e.g.: idade, sexo, peso). Além disso, também ocorrem diferenças de velocidades médias causadas pela geometria da região de escape. É notório que as velocidades médias em escadas são, em geral, menores que velocidades em corredores, mesmo que mantidas as dimensões laterais ou número de pessoas.

Para quantificar ambos os efeitos, escolheu-se avaliar estatisticamente dois conjuntos de velocidades. Primeiro, avalia-se a velocidade média dos participantes no corredor do terceiro andar (trecho entre as saídas das salas e o CP6).

Posteriormente, avalia-se a velocidade média dos participantes ao descer os três andares de escadas (trecho apresentado na Figura 3.20).

Os tempos de escape dos participantes foram obtidos através dos vídeos de registro do simulado. A incerteza do registro do tempo t foi fixada em 1 segundo, avaliando o procedimento para registro dos tempos de forma crítica. Embora os vídeos de registro possuam escalas menores que 1 segundo, a definição desta incerteza é consequência direta da necessidade de identificação do momento de passagem

dos participantes pelos checkpoints.

A incerteza da distância percorrida s foi fixada em 20 centímetros, analisando de forma crítica a tolerância dimensional dos desenhos de arranjo e também a incerteza do instrumento de medição utilizado para verificação das medidas dos desenhos no edifício (fita de medição).

Ambas as incertezas citadas, são consideradas incertezas básicas utilizadas para cálculo da propagação de incerteza na determinação de velocidade. A propagação de incertezas para o cálculo de velocidade média v é realizada aplicando-se a equação [40]:

$$\sigma_v = \sqrt{\left(\sigma_s \frac{\partial v(s,t)}{\partial s}\right)^2 + \left(\sigma_t \frac{\partial v(s,t)}{\partial t}\right)^2} \quad (3.1)$$

Considerando que a velocidade média no percurso v é determinada pela razão entre o espaço percorrido s e o tempo registrado t , simplifica-se a equação de propagação de incertezas para:

$$\sigma_v(s,t) = \sqrt{\left(\frac{\sigma_s}{t}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_t s}{t^2}\right)^2} \quad (3.2)$$

Avaliando-se de forma crítica a equação descrita, considerando-se fixas a incerteza no tempo registrado, a incerteza do espaço percorrido e o espaço percorrido por cada participante, verifica-se que quanto maior o tempo registrado para o participante, menor será a incerteza propagada para a velocidade.

Visando facilitar o procedimento de análise dos dados, a incerteza de velocidade será fixada como a maior incerteza possível dentre os participantes, ou seja, considerando-se o menor tempo de escape registrado dentre os participantes (participante de maior velocidade média).

A Tabela 3.7 sumariza os resultados de incertezas obtidas, aplicando-se o procedimento descrito. Verifica-se que a incerteza de velocidade calculada nas escadas é significativamente superior que a incerteza de velocidade calculada no corredor, mesmo mantendo-se os mesmos valores de incertezas básicas.

Tabela 3.7: Incerteza da velocidade média dos participantes para escada e corredor.

Incerteza v(m/s)	Escada	Corredor
σ_v	0,08	0,03

O gráfico da Figura 3.22 mostra as velocidades médias dos participantes por ordem de chegada ao fim do corredor e da escada. Neste gráfico é possível verificar a sensível redução de velocidade do grupo de participantes na escada, em relação ao fluxo no corredor.

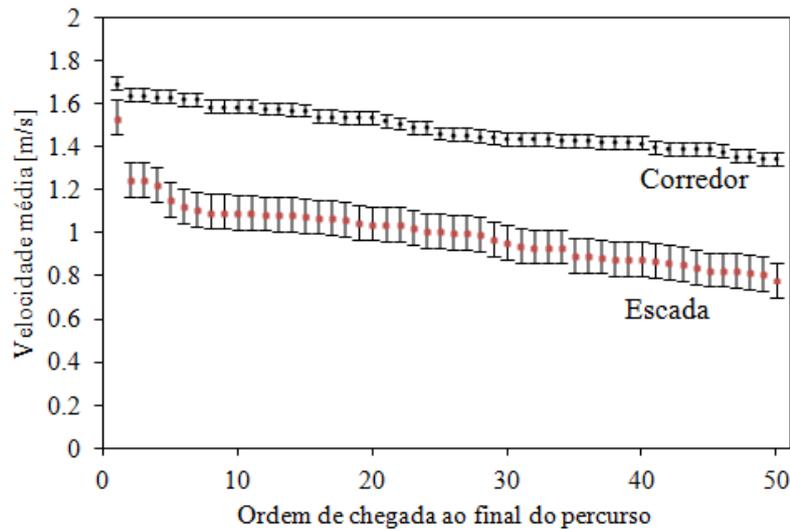


Figura 3.22: Velocidades determinadas para os participantes no corredor e na escada, aplicando-se as incertezas descritas na Tabela 3.7.

Adicionalmente, nota-se que o primeiro participante a chegar ao fim da escada desenvolveu velocidade média significativamente superior ao restante do grupo. Por se tratar de um caso singular, a velocidade deste participante será desprezada na análise estatística posterior.

A Figura 3.23 apresenta os histogramas de velocidades desenvolvidas pelo grupo nas escadas e corredor. Ambos os histogramas foram gerados classificando os grupos em faixas de velocidades de 0,08 m/s (incerteza da velocidade nas escadas).

A observação dos histogramas permite concluir que ambas as distribuições não são simétricas, em relação ao centro, indicando a necessidade de um tratamento estatístico de maior complexidade que a avaliação de média e desvio padrão, ou o ajuste de uma distribuição normal.

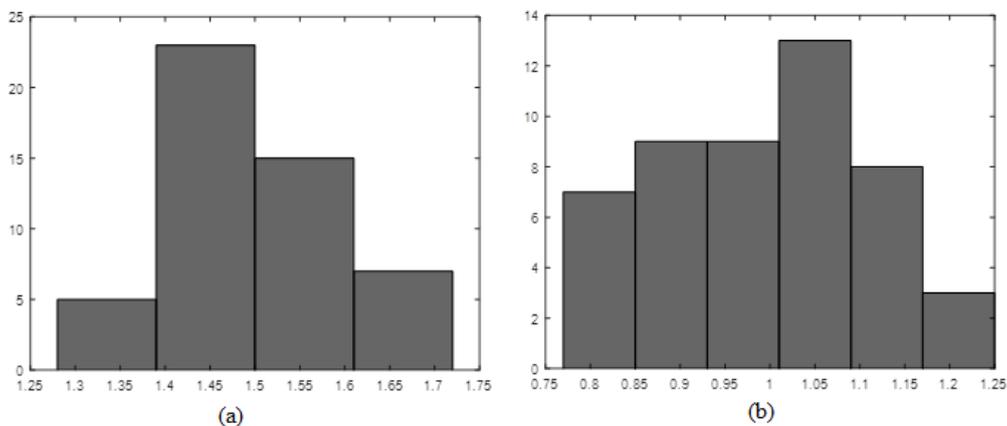


Figura 3.23: Histogramas de velocidades calculados para: (a) corredor; (b) escada.

Especificamente para o escape durante emergências, a referência [41] sugere a utilização de distribuição do tipo lognormal para as velocidades registradas. Dentre

as características interessantes desta distribuição, está a exigência de variável de interesse (velocidade) estritamente positiva e a ausência de simetria em relação ao trecho de maior densidade de probabilidade. Para maior detalhamento teórico e exemplos de aplicação da função densidade de probabilidade lognormal indica-se a referência [42].

Na Figura 3.24 é apresentada a distribuição lognormal para o corredor e na Figura 3.25 para as escadas. Em (a) é mostrado o histograma de distribuição de velocidades; (b) a função densidade de probabilidade; (c) distribuição de probabilidade acumulada.

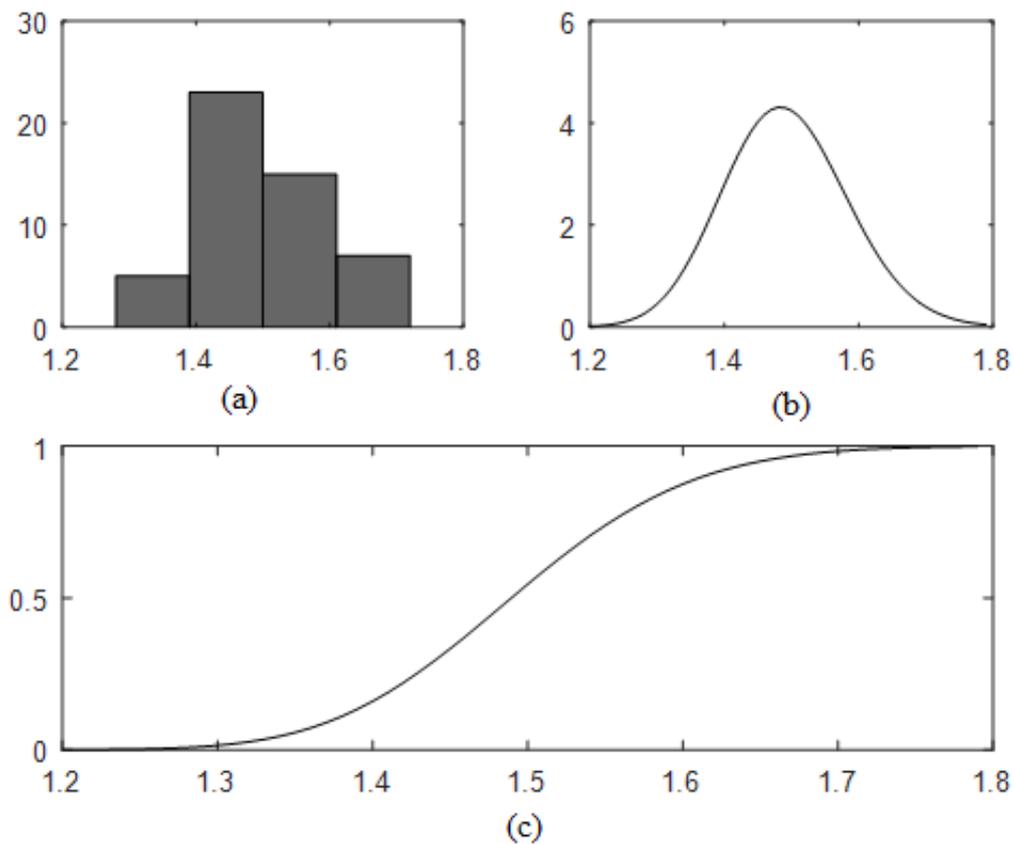


Figura 3.24: Ajuste de distribuição lognormal para o corredor: (a) histograma de distribuição de velocidades; (b) função densidade de probabilidade; (c) distribuição de probabilidade acumulada.

A análise das distribuições lognormais ajustadas aos dados medidos, demonstra máxima densidade de probabilidade em 1,49 e 0,98 m/s para o corredor e para a escada, respectivamente. Por constituírem as velocidades com maior densidade de probabilidade, estas velocidades serão utilizadas para comparação com os valores característicos registrados na literatura no capítulo a seguir.

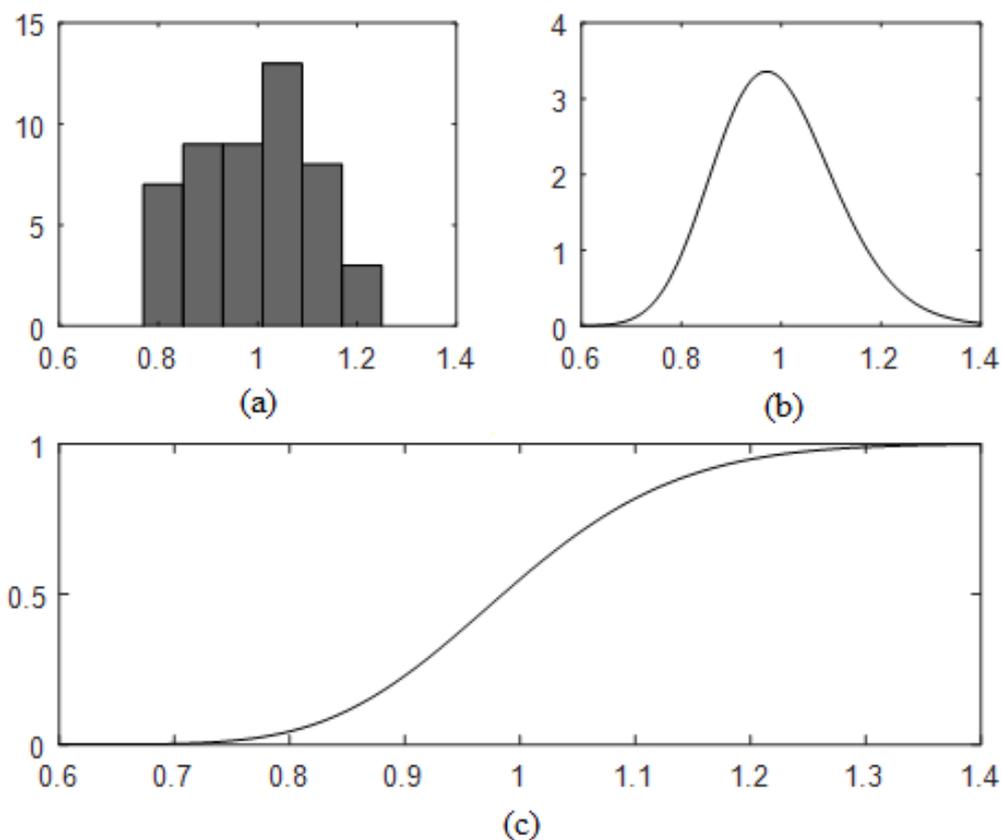


Figura 3.25: Ajuste de distribuição lognormal para a escada: (a) histograma de distribuição de velocidades; (b) função densidade de probabilidade; (c) distribuição de probabilidade acumulada.

3.1.7 Discussão

Os registros de tempo de pré-movimento indicaram valores na faixa de 5 a 18 segundos (média igual a 6,7 s) para o cenário 1 do simulado, sem a presença de fumaça, e de 2 a 20 segundos (média igual a 6,4 s) no caso do cenário 2, com a presença de fumaça.

Observa-se que a média dos valores coletados encontra-se muito abaixo dos valores de dados reportados na literatura: [43], [44] e [45], onde a média dos valores é de 83 segundos, conforme apresentado na Tabela 3.8.

Este fato se justifica pelo conhecimento prévio dos participantes da realização do simulado e pela efetividade do sinal sonoro utilizado pelos cadetes (100 por cento dos participantes retratou que ouviu o alarme para iniciar a evacuação da edificação). Autores constataram em [26], [46] e [47] que a eficácia dos avisos de emergência tem influência direta na atitude dos evacuados durante eventos de emergência.

Com relação às velocidades calculadas, comparando os valores representativos (maior densidade de probabilidade) obtidos a partir da análise estatística, 1,49 e 0,98 m/s para o corredor e para a escada, respectivamente, conclui-se que:

Tabela 3.8: Tempo de pré movimento - diferente fontes de dados existentes na literatura.

Média	Mínimo	Máximo	Descrição	Referência
00:19	00:00	03:12	Diferentes tipos de construção	Purser e Bensilum
01:10	00:00	04:06	Universidades - funcionários	Gwynne et al.
01:13	00:08	03:20	Universidade – estudantes	Gwynne et al.
00:44	00:16	01:31	Hospital - funcionários	Gwynne et al.
00:51	00:30	01:06	Hospital - pacientes	Gwynne et al.
00:30	00:19	00:54	Loja - produtos (Örebro)	Frantzich
00:50	00:35	01:13	Loja - restaurante (Örebro)	Frantzich
00:50	00:51	00:57	Loja - caixa (Örebro)	Frantzich
00:27	00:09	00:46	Loja - produtos (Västerås)	Frantzich
00:51	00:40	01:07	Loja - restaurante (Västerås)	Frantzich
00:31	00:27	00:38	Loja - caixa (Västerås)	Frantzich
00:26	00:15	00:50	Loja - produtos (Älmhult)	Frantzich
01:02	00:45	01:40	Loja - restaurante (Älmhult)	Frantzich
01:23	00:35	02:10	Loja - caixa (Älmhult)	Frantzich

i) a velocidade calculada para o corredor, no presente ensaio, se localiza na região superior das velocidades experimentais relatadas na literatura de referência, significando que o conjunto de participantes desenvolveu um fluxo bem ordenado durante o escape no corredor. A Figura 3.26 ilustra: (a) dados experimentais de velocidades versus a densidade média de pessoas, considerando escape em regiões planas. A velocidade de referência registrada no corredor encontra-se sobreposta em vermelho; (b) detalhamento das velocidades determinadas experimentalmente por OLDER [15] versus a densidade de pessoas, velocidade característica para o corredor determinada no experimento (em vermelho) e range de valores de velocidades determinadas para o fluxo no corredor durante o experimento (barra de intervalo negro).

ii) considerando a densidade encontrada para a escada ($0,8 \text{ pessoas}/m^2$), os valores calculados de velocidade estão coerentes com valores registrados na literatura de referência [2], [48] e [16], principalmente quando considerada a significativa dispersão dos dados experimentais relatados. A Figura 3.27 apresenta o valor de velocidade obtido no experimento (ponto vermelho) em comparação com os reportados em [2].

Foram observados durante o cenário 2, os seguintes padrões de movimento por parte dos evacuados: (i) permanecer próximo a parede; (ii) utilizar o corrimão das escadas; (iii) curvar o corpo diante da nuvem de fumaça. Comportamentos semelhantes a estes já foram evidenciados por NILSSON em outro experimento com presença de fumaça [49].

Efeitos coletivos explicitados na literatura foram evidenciados durante a rea-

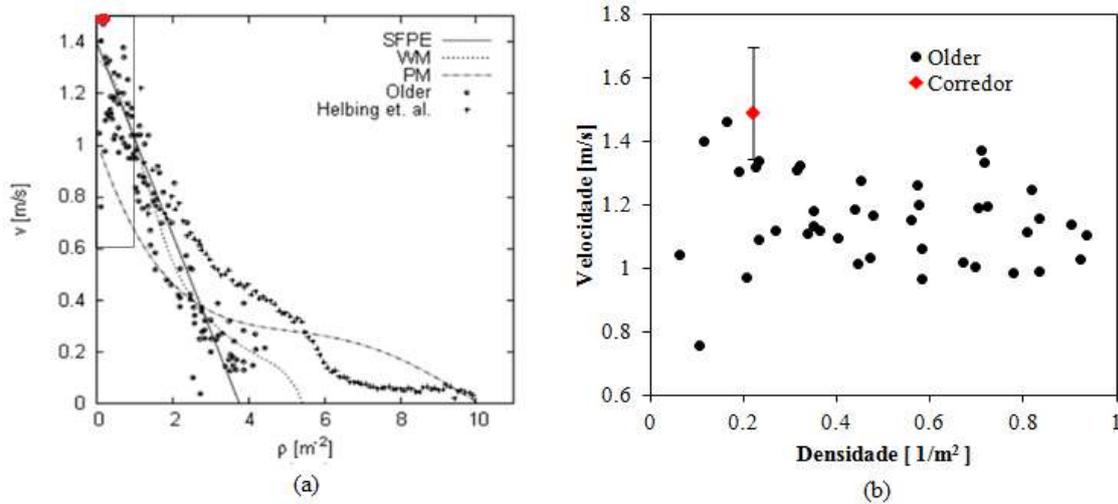


Figura 3.26: Comparação entre as velocidades calculadas para o corredor no simulado e dados experimentais reportados na literatura: (a) ponto vermelho indica o valor encontrado no simulado; (b) dado encontrado no ensaio em confronto com as referências reportadas por OLDER [2].

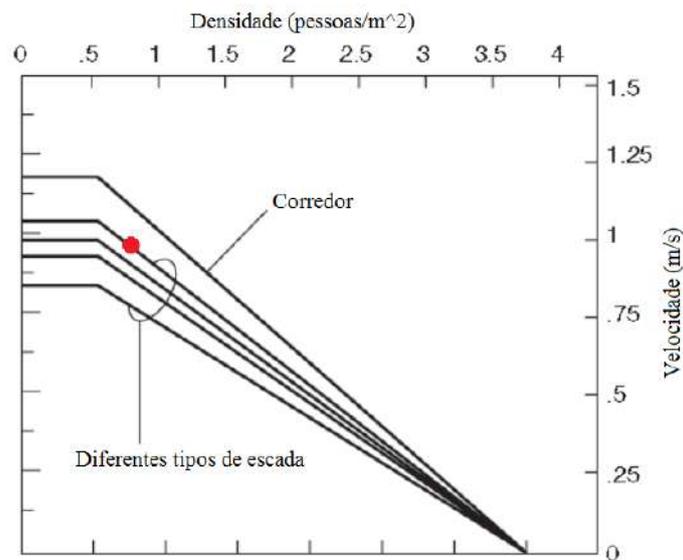


Figura 3.27: Confronto entre os dados de velocidade em escada presentes na bibliografia e o valor medido durante o exercício.

lização do ensaio: (i) a permanência de um participante junto a outro conhecido durante o transcórre do exercício (atitude que foi observada em vários alunos durante diversos trechos do percurso); (ii) efeito *jamming*, onde foi possível notar uma leve obstrução nas escadas (Figura 3.15); (iii) efeito *herding* durante o cenário 2, no qual os alunos hesitaram em atravessar a nuvem de fumaça existente no corredor do terceiro andar e só o fizeram após a participante ID 408 tomar a iniciativa.

Tendo em vista que: (i) os alunos já sabiam que se tratava de um simulado; (ii) estes receberam orientações por parte dos cadetes da academia do CMBERJ a respeito de como proceder no decorrer do experimento; (iii) só existe um meio

de escape da edificação; não foi possível avaliar o processo de tomada de decisão e escolha de rotas de saída dos participantes como realizado em [50], [51] e [52].

Durante o cenário 2, a participante ID.106 não se sentiu confortável e não abandonou o prédio. Este fato retrata o quanto fatores psicológicos afetam as pessoas durante eventos de evacuação e reforça a importância de serem considerados durante o projeto de meios de escape de uma instalação.

A presença de fumaça reduz a visibilidade e conseqüentemente dificulta a evacuação. Desta forma, o tempo total requerido para que todos os participantes deixassem a edificação foi maior no cenário 2.

Capítulo 4

Modelo Numérico Computacional

Neste capítulo são expostos os modelos computacionais desenvolvidos através do software FDS+EVAC.

A fim de facilitar a compreensão do programa, o método utilizado para seu desenvolvimento, proposto por HELBING [5] foi previamente estudado. Desse modo, a primeira análise apresentada trata-se de uma interpretação deste modelo matemático.

Em seguida, é mostrado o segundo exemplo, onde é proposta uma verificação de resultados. Os dados de resposta do cálculo analítico de problema exemplo são comparados às soluções encontradas a partir de simulações feitas utilizando a ferramenta FDS+EVAC.

No terceiro caso, é ilustrado um caso onde um cenário utilizado para validação do EVAC, recomendado pelo guia da Organização Marítima Internacional (IMO) MSC/Circ. 1033 [13] foi reproduzido.

O quarto e último se refere ao estudo de caso do prédio da FAU, onde foram simulados os cenários referentes ao experimento apresentado no item anterior.

4.1 Análise do Modelo Força Social

$$F_{soc} = A \exp\left(\frac{R-d}{B}\right) \left(\lambda + (1-\lambda)\frac{1+\cos(\phi)}{2}\right) \quad (4.1)$$

Analisando-se a equação 4.1, identifica-se que a exponencial possui imagem entre $[0, 1]$, pois o termo $(R-d)/b$ é negativo ou nulo. Isto é consequência de b ser uma constante positiva e da restrição $d \geq R$ (distância entre agentes, superior ao raio médio destes).

O termo multiplicativo, à direita da exponencial, possui imagem entre $[\lambda, 1]$. Esta imagem pode ser verificada assumindo-se os valores máximo e mínimo para a imagem de $\cos(\phi)$, 1 e -1, respectivamente.

Por decorrência, o produto da exponencial pelo termo multiplicativo à direita possuirá imagem entre $[0, 1]$. Considerando-se a constante A , a imagem da função força social F_{soc} estará entre $[0, A]$.

Esta análise de imagem de função, permite concluir que A é o valor máximo da força social entre dois agentes, que ocorre quando os agentes estão na iminência de contato.

Para analisar o comportamento da força social com a distância, assume-se inicialmente o caso particular de ângulo $\phi = 0$, portanto $\cos(\phi) = 1$. Neste caso particular, a força social será expressa por:

$$F_{soc} = A \exp\left(\frac{R-d}{B}\right) \quad (4.2)$$

A Figura 4.1 demonstra o decaimento exponencial da força social ao aumentar a distância entre os agentes. Embora tenha sido assumido um ângulo ϕ particular, este decaimento ocorrerá independentemente do ângulo entre os agentes.

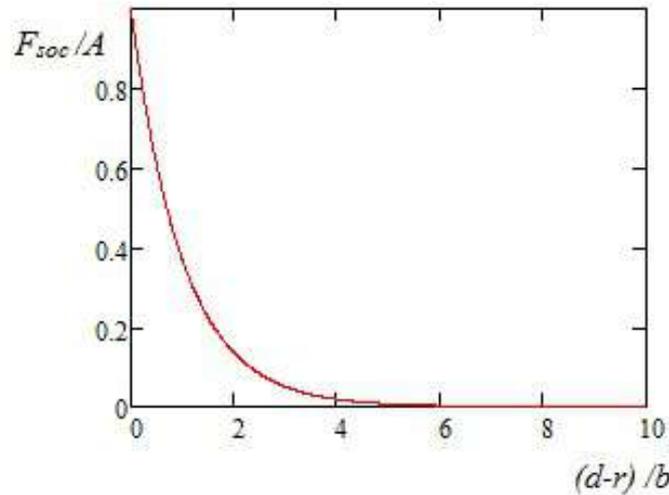


Figura 4.1: Decaimento exponencial da força social com o aumento da distância efetiva $(d - R)$, em relação ao comprimento de decaimento b .

A análise da equação 4.2 e da Figura 4.1, permite identificar que a constante b quantifica a dimensão do comprimento de decaimento. Notando-se que a variável $(d - r)$ quantifica a distância efetiva entre os agentes, a razão $(d - R)/B$ definirá univocamente o percentual de decaimento da força social em relação ao seu valor máximo A .

Analisando-se de forma alternativa e mais direta, a constante B é responsável por aumentar ou diminuir o raio de ação efetivo da força social. Quanto maior o valor da constante B , maior será o alcance efetivo da força social.

Este efeito pode ser quantificado percebendo-se que ao aumentar o valor de B ,

para uma distância efetiva $(d - R)$ fixa, menor será o valor da razão $(d - R)/B$. Verificando-se o gráfico da figura 4.1, para menores valores da razão $(d - R)/B$, maiores intensidades de força ocorrem.

Por fim, analisa-se o efeito da constante λ . Para facilitar a análise, assume-se inicialmente o caso particular de distância efetiva mínima possível entre agentes, ou seja, $D = r$. Neste caso o resultado da exponencial é a unidade e a força social é descrita por:

$$F_{soc} = A \left(\lambda + (1 - \lambda) \frac{1 + \cos(\phi)}{2} \right) \quad (4.3)$$

A Figura 4.2 demonstra a influência da constante λ , ao variar o ângulo entre os agentes. Com ângulo nulo, ou seja, contato visual, ocorre a máxima intensidade de força social. Caso o ângulo seja 180° , ou seja, ausência de contato visual, a força social mínima ocorre, possuindo valor numérico (λA) . Desta forma, ao variar o ângulo ϕ de 0° a 180° a força social varia de seu valor máximo A ao valor mínimo (λA) .

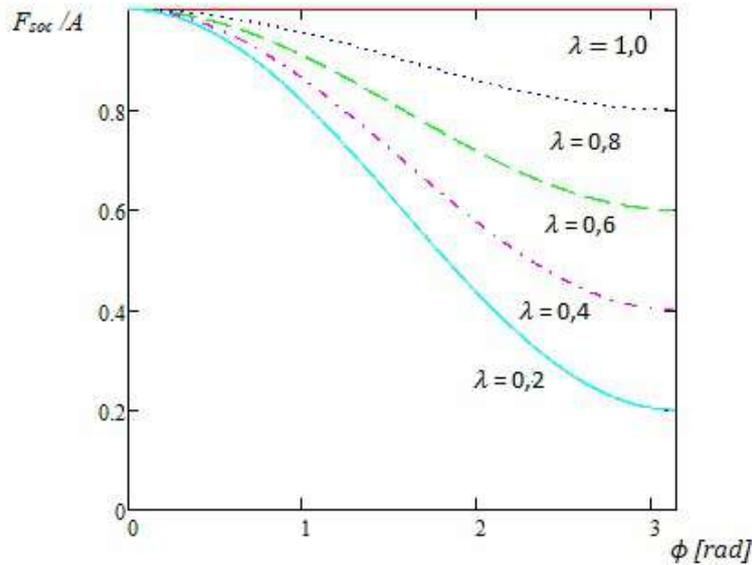


Figura 4.2: Anisotropia visual da força social .

Analisando-se de forma mais direta, a constante λ quantifica o grau de anisotropia da força social, em relação ao campo visual do agente. Embora, tenha-se assumido o caso particular de distância mínima para a análise $d = R$, o efeito ocorre para qualquer distância previamente definida. Assim, para uma dada distância fixa, variando-se o ângulo ϕ , varia-se a intensidade da força social, ocorrendo maior influência de agentes ou obstáculos presentes no campo visual do agente.

As Figuras 4.3 e 4.4, demonstram o efeito combinado das constantes λ e B no modelo de força social analisado. Em ambas as figuras foram utilizados as constantes

$\lambda = 0,2$ e $B = 0,04$. Estes valores são os valores padrão utilizados para forças sociais exercidas por paredes no software FDS+EVAC.

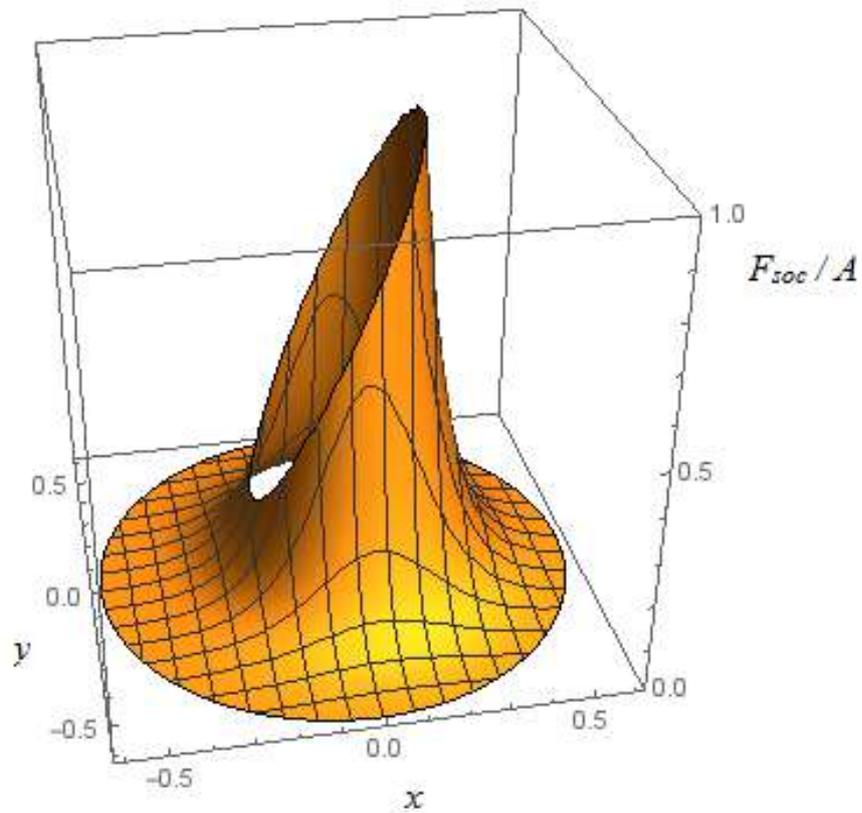


Figura 4.3: Campo de força social exercido por uma parede na posição (x, y) , no agente ocupando posição $(0, 0)$, com campo visual orientado na direção x .

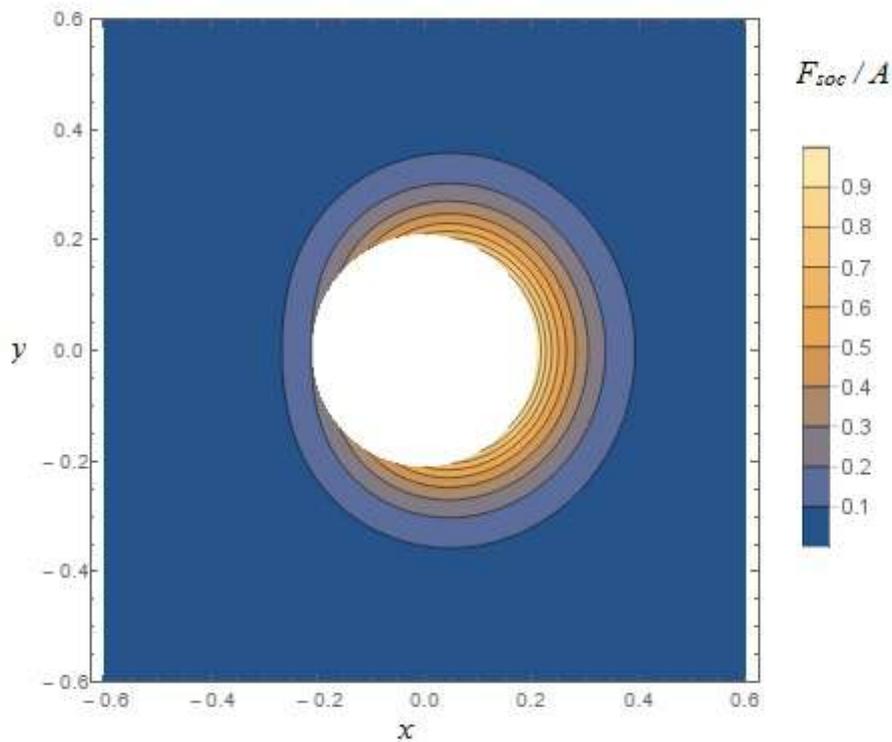


Figura 4.4: Gráfico de contorno da força social exercida por uma parede na posição (x, y) , no agente ocupando posição $(0, 0)$, com campo visual orientado na direção x .

4.2 Verificação de Resultados

Nesta seção os resultados obtidos pelo modelo numérico com a utilização do software FDS+EVAC são comparados com resultados analíticos para um problema exemplo proposto.

4.2.1 Descrição do problema exemplo

Um agente único posicionado na extremidade inicial de um corredor com 20 metros de extensão, na direção x . Na extremidade inicial do corredor $x = 0 \text{ m}$ há uma parede, enquanto na extremidade final do corredor $x = 20 \text{ m}$ há uma porta de saída. Desta forma, atua no agente apenas a força social oriunda da parede inicial do corredor.

4.2.2 Solução analítica

Pelo modelo de força social proposto por HELBING [5], a força social F_{soc} devido à presença da parede inicial será dada pela equação:

$$F_{soc} = A_w \exp\left(\frac{R-d}{B_w}\right) \left(\lambda + (1-\lambda)\frac{1+\cos(\phi)}{2}\right) \quad (4.4)$$

Nesta equação, A_w é a máxima força social exercida pela parede, B_w quantifica a dimensão de decaimento da força social, R é o raio do agente, d é a distância entre o centro de massa do agente e a parede, λ é o coeficiente de anisotropia da força social devido ao campo visual do agente e ϕ é o ângulo entre o campo visual do agente e a parede. No problema exemplo, o agente encontra-se de costas para a parede, portanto $\phi = 180^\circ$ e a intensidade da força social F_{soc} pode ser simplificada:

$$\frac{F_{soc}}{A_w \lambda} = \exp\left(\frac{R-d}{B_w}\right) \quad (4.5)$$

Executando-se a mudança de variáveis $d = d_0 + d_n$, sem perda de generalidade, onde d_0 é a distância entre a posição inicial do agente e a parede, obtém-se:

$$\frac{F_{soc}}{A_w \lambda} = \exp\left(\frac{R-d_0-d_n}{B_w}\right) \quad (4.6)$$

Objetivando-se a geração de variáveis adimensionais, arruma-se a equação de forma coerente:

$$\frac{F_{soc}}{A_w \lambda \exp\left(\frac{R-d_0}{B_w}\right)} = \exp\left(\frac{-d_n}{B_w}\right) \quad (4.7)$$

Definindo F_0 , que representa a força social exercida em um agente de raio R , posicionado à uma distância d_0 da referida parede.

$$F_0 := A_w \lambda \exp\left(\frac{R-d_0}{B_w}\right) \quad (4.8)$$

Chega-se a uma relação adimensionalizada entre força social F_{soc} e distância do agente em relação à sua posição inicial d_n .

$$\frac{F_{soc}}{F_0} = \exp\left(\frac{-d_n}{B_w}\right) \quad (4.9)$$

Definindo-se a força adimensional \bar{F} e a distância relativa à posição inicial adimensional \bar{d}_n .

$$\bar{F} := \frac{F_{soc}}{F_0} \quad (4.10)$$

$$\bar{d}_n := \frac{d_n}{B_w} \quad (4.11)$$

Chega-se à relação entre força social adimensional \bar{F} e distância relativa à posição inicial adimensional \bar{d}_n .

$$\bar{F} = \exp(-\bar{d}_n) \quad (4.12)$$

4.2.3 Solução numérica

Um corredor de 40 m de extensão por 4 m de largura, subdividido em dois corredores iguais de 20 m de extensão, foi criado no software FDS+EVAC. A subdivisão central dos dois corredores é feita por uma parede ilustrada na Figura 4.5.

O agente de interesse é posicionado imediatamente após a parede divisória. Não existem paredes laterais no corredor, portanto a única influência efetiva de força social que ocorre no agente de interesse é dada pela parede divisória.

Apenas para permitir o monitoramento dos resultados da simulação, um segundo agente é posicionado na extremidade inicial do primeiro corredor, sendo aprisionado por uma parede logo após sua posição. O posicionamento deste segundo agente e da parede de bloqueio estão suficientemente distantes do agente de interesse, para que não influenciem nos resultados obtidos.



Figura 4.5: Modelo numérico para o problema exemplo.

A subrotina Fortran `read_ptr5.f90`, desenvolvida por CHRAIBI [53], foi modificada para permitir extração dos valores numéricos das forças sociais que agem nos agentes ao longo de toda a trajetória.

Por padrão, o software FDS+EVAC escreve um arquivo em formato codificado (binário), com extensão `.ptr5`, contendo as trajetórias dos agentes, que apenas pode ser interpretado pela interface de visualização de resultados gráficos do software SMV, sem permitir acesso direto aos valores numéricos.

A rotina `read_ptr5.f90` permite que os resultados numéricos das trajetórias sejam escritas em um arquivo de texto formatado, compreensível ao usuário.

A modificação executada na citada subrotina permitiu a inclusão das velocidades instantâneas, forças de contato e forças sociais agindo ao longo de toda a trajetória, para todos os agentes, no mesmo arquivo de saída formatado, de forma a permitir a comparação numérica com a solução analítica.

O posicionamento do segundo agente fez-se necessário para o efetivo funcionamento do procedimento de extração dos resultados numéricos do software FDS+EVAC.

Por padrão, o software FDS+EVAC utiliza distribuições probabilísticas para definição de propriedades do modelo que possuem influência nos resultados. Dentre as propriedades afetadas por estes parâmetros de aleatoriedade citam-se: (i) diâmetro dos agentes; (ii) posicionamento inicial dos agentes; (iii) direção inicial dos agentes; (iv) tempo de reação; (v) tempo de relaxação.

Um extensivo controle de parâmetros no arquivo de entrada foi executado, com objetivo de restringir ao máximo a aleatoriedade destes parâmetros e visando permitir a extração posterior de valores numéricos das forças sociais ao longo da trajetória do agente de interesse.

Após realizar as intervenções descritas no programa e no arquivo de entrada, os valores numéricos das forças sociais ao longo da trajetória do agente de interesse foram obtidos e estão descritos em conjunto com a solução analítica para permitir a comparação.

4.2.4 Comparação de resultados

A equação obtida pela solução analítica é plotada, em vermelho na Figura 4.6, em conjunto com os resultados numéricos obtidos utilizando-se o software FDS+EVAC para o problema exemplo descrito, em azul (a), em (b) os mesmos resultados são apresentados, entretanto utilizando-se escala logarítmica no eixo y , de forma a explicitar o elevado grau de concordância entre os resultados fornecidos pelo modelo analítico e pelo modelo numérico.

A precisão destes resultados apenas foi obtida após calibração dos parâmetros do modelo e restrição da aleatoriedade das variáveis de entrada.

A dimensão de decaimento $B_w = 0,1 m$ e o coeficiente de anisotropia devido ao campo visual $\lambda_w = 0,3$ foram fixados de forma a restringir atuação efetiva exclusiva da força social gerada pela presença da parede divisória central no agente de interesse. Adicionalmente, as forças de contato foram tornadas nulas, anulando-se os parâmetros relacionados as mesmas. A intensidade de força social máxima exercida pela parede A_w foi mantida com o valor padrão do software.

Além disso, os parâmetros temporais e geométricos do modelo foram estabelecidos e tiveram aleatoriedade probabilística suprimida. Os valores de parâmetros utilizados foram velocidade desejada $v_0 = 1 m/s$, tempo de reação $\tau = 0 s$, tempo de relaxação $\tau_0 = 0,1 s$ diâmetros do tronco $D_t = 0 m$, diâmetro dos ombros $D_s = 0 m$ e diâmetro total do agente de interesse $D = 1 m$.

A possibilidade de ajuste destes parâmetros demonstra que há um conjunto de

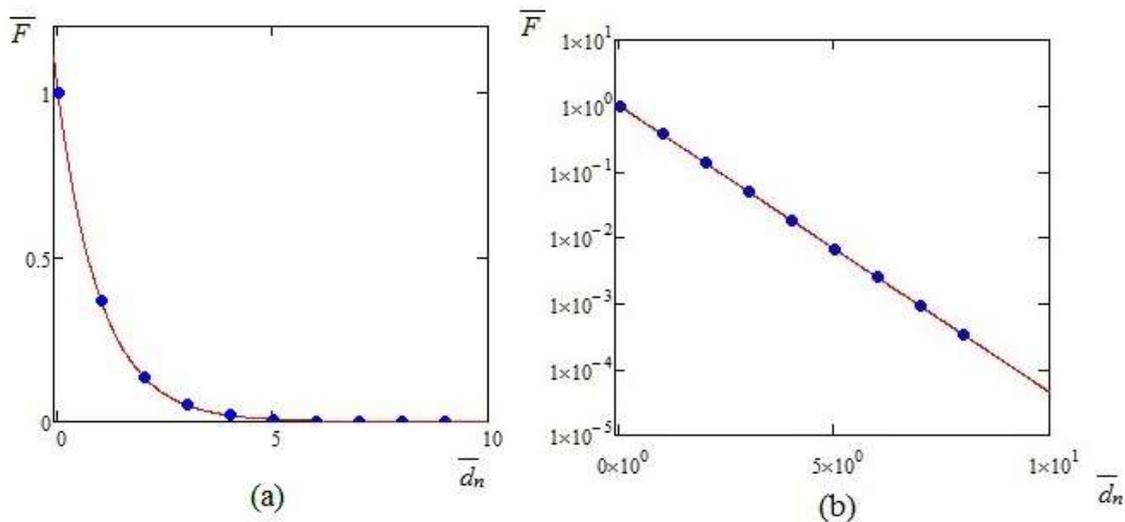


Figura 4.6: Comparação de resultados. Curva da solução analítica em vermelho e resultados numéricos obtidos com o software FDS+EVAC para o modelo descrito em azul.

parâmetros com capacidade de influência nos resultados numéricos que podem ser devidamente calibrados para obtenção de simulações coerentes com resultados experimentais.

A análise do modelo de forças sociais registrados na seção 4.1 e a comparação de resultados entre a solução analítica e numérica descrita na seção 4.2 constituem etapas fundamentais para posterior calibração do modelo computacional em um caso de maior complexidade.

4.3 Validação IMO 1

O guia internacional da IMO [13], apresenta os requisitos necessários para aprovação de ferramentas de simulação computacional de evacuação. A validação é composta de quatro etapas: teste de componentes do programa, verificação funcional, qualitativa e quantitativa, divididos em onze testes propostos. A ferramenta utilizada para desenvolvimento dos modelos no presente trabalho, EVAC, foi validado em todas as etapas.

Um destes onze testes, o IMO 1, foi reproduzido com intuito de estreitar os conhecimentos da ferramenta e garantir sua correta aplicação nos demais casos considerados nesta dissertação.

4.3.1 Descrição do Teste

O teste IMO 1 faz parte da primeira fase, verificação funcional, e objetiva testar se os componentes essenciais necessários para o correto desempenho do programa

estão bem desenvolvidos.

Neste cenário, a correta velocidade do agente deve ser mantida. Em um corredor com 2 metros de largura e 40 metros de comprimento, caminhando a 1m/s, o trajeto deverá ser completado em 40 segundos.

A Figura 4.7 mostra o modelo computacional construído para simulação do cenário IMO 1, conforme descrito acima, é constituído de um extenso corredor. O final da porta preta simboliza a distância de 40 metros.

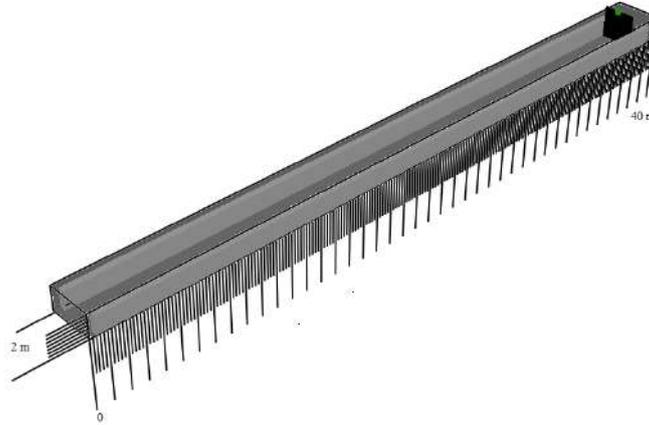


Figura 4.7: Modelo computacional utilizado na simulação do cenário IMO 1, extenso corredor.

4.3.2 Parâmetros Utilizados

No presente caso, como é avaliado apenas um pedestre, as forças repulsivas de interação entre eles, representadas pelo termo $\sum_{j(\neq i)} f_{ij}(t)$, da equação 2.7 são nulas. As forças de repulsão entre o pedestre e os obstáculos (parede), $\sum_W f_{iW}(t)$ são pequenas, não tendo influência significativa nos resultados. O fator $\xi_i(t)$ também não tem interferência relevante.

Em vista disso, os parâmetros mais significativos nesta situação, são: o fator de relaxação τ_i (valor usado igual à 0,1) e a velocidade desejada v_i^0 , previamente conhecida, 1,0 m/s.

Uma vez que o objetivo é apenas mensurar a manutenção da velocidade, o tempo de pré movimento e o tempo de detecção foram considerados iguais a zero, ou seja, não há *delay* no início da caminhada do pedestre.

4.3.3 Resultados

Este item trata dos resultados encontrados nas simulações realizadas no EVAC para o caso IMO 1.

No que se refere à velocidade do pedestre durante a execução do trajeto, não houve variação, permanecendo a sua velocidade constante e igual à 1 m/s. Consequentemente, o tempo necessário para completar o trajeto foi de 39,99 segundos, bem próximo do requerido pela IMO, de 40 segundos. A Figura 4.8 ilustra os resultados no tempo $t=0s$ e $t= 39,5s$. A cor do pedestre varia de acordo com sua velocidade, em uma escala que vai de 0,0 m/s (azul) até 1,0 m/s (vermelho). Para o tempo inicial, sua velocidade é nula e no tempo próximo do final (39,99s) é a máxima.

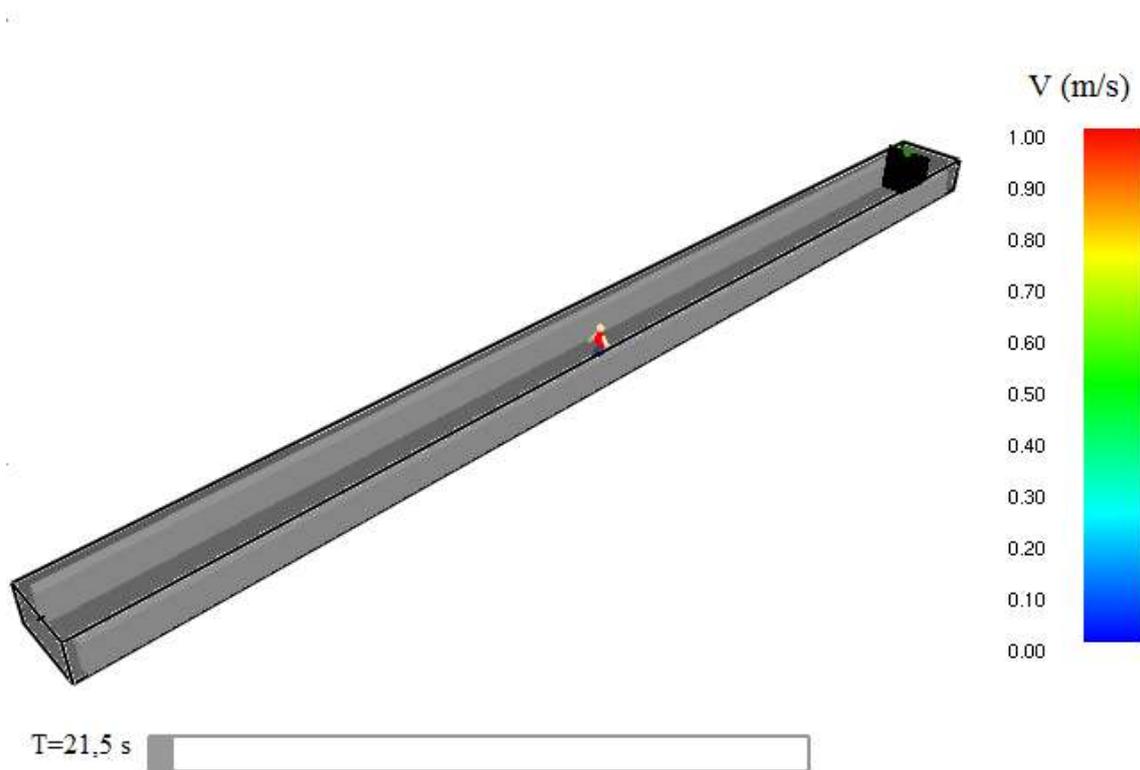


Figura 4.8: Velocidade do pedestre no corredor para o tempo $t=21,5s$.

A força total de interação entre o pedestre e a parede é exibida na Figura 4.9, sendo uniforme ao longo de todo o percurso do corredor. Conforme citado anteriormente, para este caso, a força de interação entre o pedestre e as paredes do corredor é baixa, não tendo grande influência, estando na ordem de 0,0034 N/m.

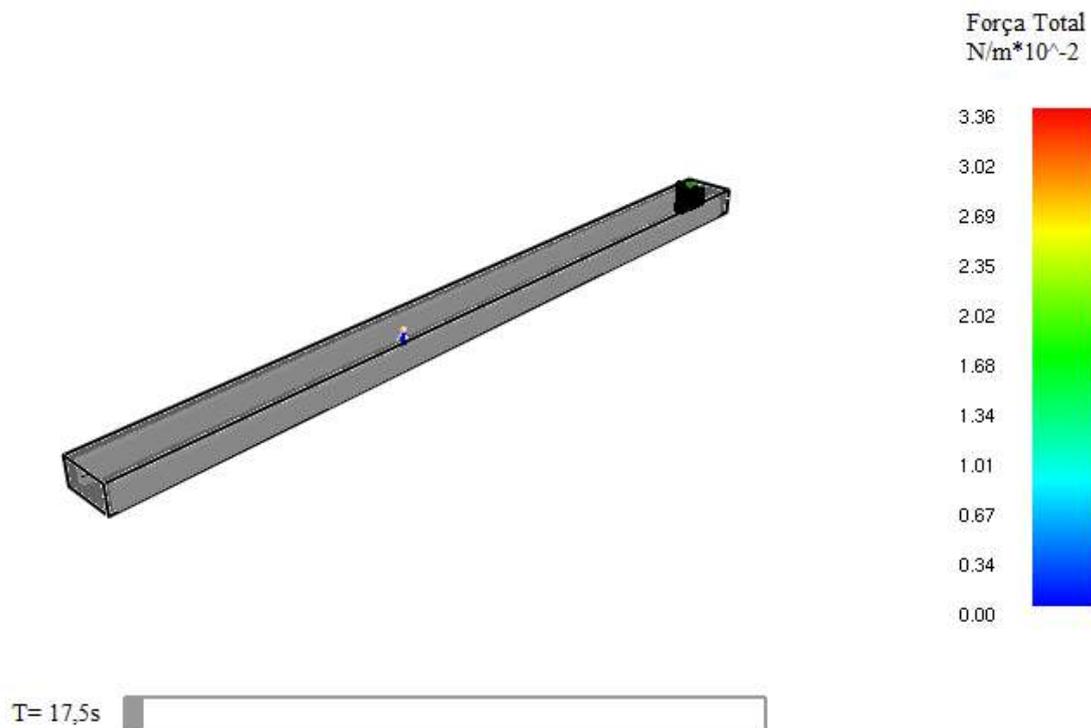


Figura 4.9: Força total de interação entre o pedestre e a parede.

4.4 Simulação Computacional

Visando reproduzir os resultados experimentais obtidos na simulação de evacuação do Ed. JMM, foi gerado um modelo de simulação computacional para representar o ensaio realizado. O modelo é representado na Figura 4.10.

A geometria modelada compreende a região percorrida durante o simulado experimental. Esta geometria está subdividida em quatro salas no terceiro andar, corredor principal do mesmo pavimento, hall de acesso às escadas, escadas e hall de saída localizado no primeiro andar.

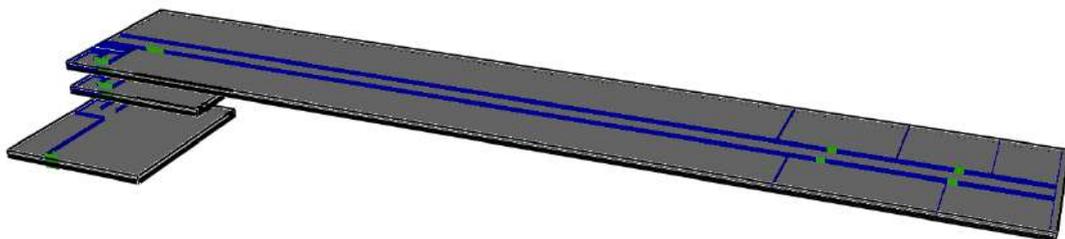


Figura 4.10: Modelo para simulação computacional de evacuação.

No modelo, apenas a região percorrida e os obstáculos com efetiva influência na evacuação foram modelados. Esta estratégia objetiva maximizar o desempenho

computacional, de forma a permitir que a calibração do modelo seja efetuada com maior precisão.

4.4.1 Cenário 1

A calibração dos resultados foi executada em múltiplos estágios. Primeiro a aleatoriedade probabilística das variáveis foi suprimida e os parâmetros registrados no exercício de evacuação foram adotados para descrição do comportamento médio e posicionamento dos agentes.

Nesta primeira etapa, os parâmetros foram ajustados de forma a obter resultados coerentes aos obtidos para velocidades médias no corredor, durante o cenário 1 do experimento descrito no capítulo 3. Os parâmetros ajustados nesta etapa foram a velocidade média dos agentes e o tempo médio de detecção (ambos calculados no experimento) bem como o tempo de relaxação τ_i , que teve valor utilizado igual à 0,1.

Os agentes foram subdivididos em quatro grupos. O critério para a subdivisão em grupos foi pelo posicionamento inicial nas quatro salas distintas. Assim, a velocidade desejada de cada grupo foi definida como a média das velocidades médias dos agentes pertencentes ao grupo, registradas no experimento.

Ressalta-se que no experimento foi possível determinar as velocidades médias dos agentes individualmente, permitindo o cálculo da média de cada grupo.

Além da velocidade média do grupo, também foi ajustado o tempo de detecção registrado em cada sala durante o experimento.

Embora a calibração tenha sido executada por grupos, os resultados de velocidades médias individuais no corredor obtidas com a simulação computacional ajustaram bem os valores experimentais medidos no corredor (CP6), conforme disposto na Figura 4.11. No gráfico, os pontos negros dotados de barras de erro correspondem aos dados experimentais, enquanto os pontos azuis quadrados são os resultados obtidos após a primeira etapa do ajuste.

Após obtenção de resultados coerentes para o corredor, ajustou-se o fator de redução de velocidade nas escadas (CP9). Este ajuste permitiu compatibilizar os resultados medidos no experimento com os resultados da simulação computacional, conforme também demonstrado na Figura 4.11. No gráfico, os pontos redondos vermelhos, com barras de erro, representam os dados obtidos no experimento, enquanto os pontos quadrados verdes representam os resultados da simulação computacional.

Tanto na escada quanto no corredor, grande parte dos valores da simulação computacional calibrada se estabelecem dentro dos intervalos de confiança registrados no experimento. Ressalta-se que a calibração foi executada por subdivisão em quatro grupos, e resultados ainda mais próximos seriam possíveis subdividindo-se o número

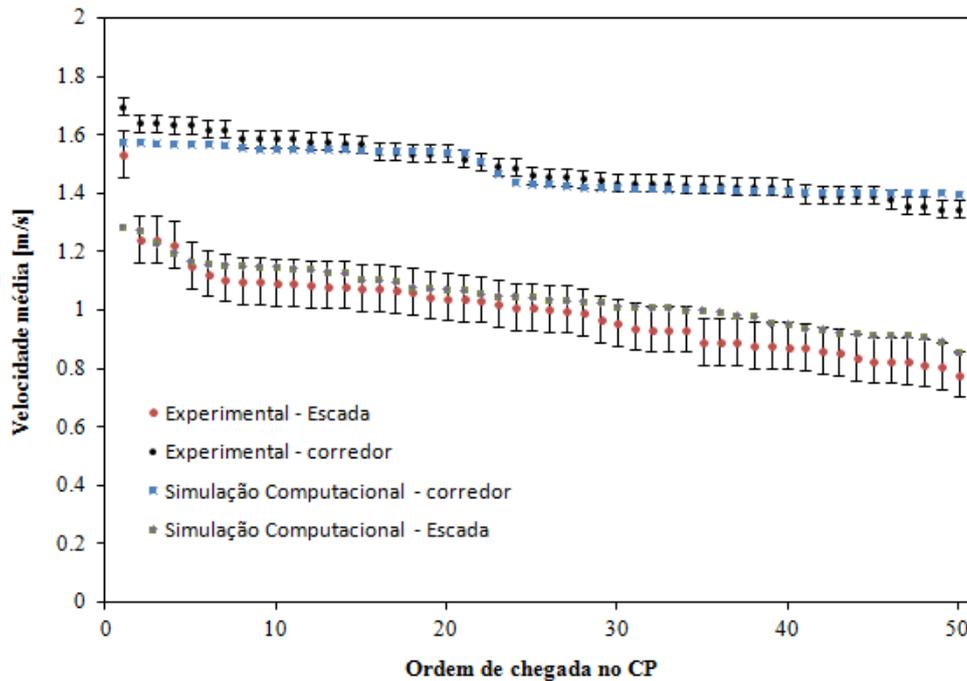


Figura 4.11: Comparação de resultados entre experimento e simulação para velocidades médias dos agentes.

de agentes em mais grupos, ou ainda, calibrando-se os parâmetros individualmente por agente.

Para o objetivo da presente dissertação, a calibração usando-se dados médios dos quatro grupos se mostrou um processo eficiente e adequado, pois se busca representar comportamentos médios de populações e não o comportamento individual de agentes.

Por se tratarem das regiões mais extensas da geometria modelada, o ajuste dos parâmetros de simulação nas escadas e corredor permitiu obter coerência entre os resultados de forma global para o modelo. Esta coerência global pode ser evidenciada na Figura 4.12. No gráfico, os tempos totais de evacuação registrados no ensaio, mostrados em azul, são comparados com os tempos totais obtidos via simulação, apresentados em vermelho.

Efetuando-se a média dos valores absolutos de erro para os tempos de evacuação individuais dos agentes, chega-se ao valor de 3,5%. Efetuando-se a média dos tempos de escape para experimento e simulação e comparando-se as médias, chega-se a um erro de 2,8%, com o procedimento de ajuste efetuado.

Estes valores de erro obtidos são significativamente inferiores ao espalhamento de dados experimentais obtidos em ensaios registrados em literatura.

A calibração do modelo computacional permitiu ainda a reprodução de efeitos coletivos observados durante o experimento.

Durante o trecho do percurso referente ao corredor do terceiro pavimento houve

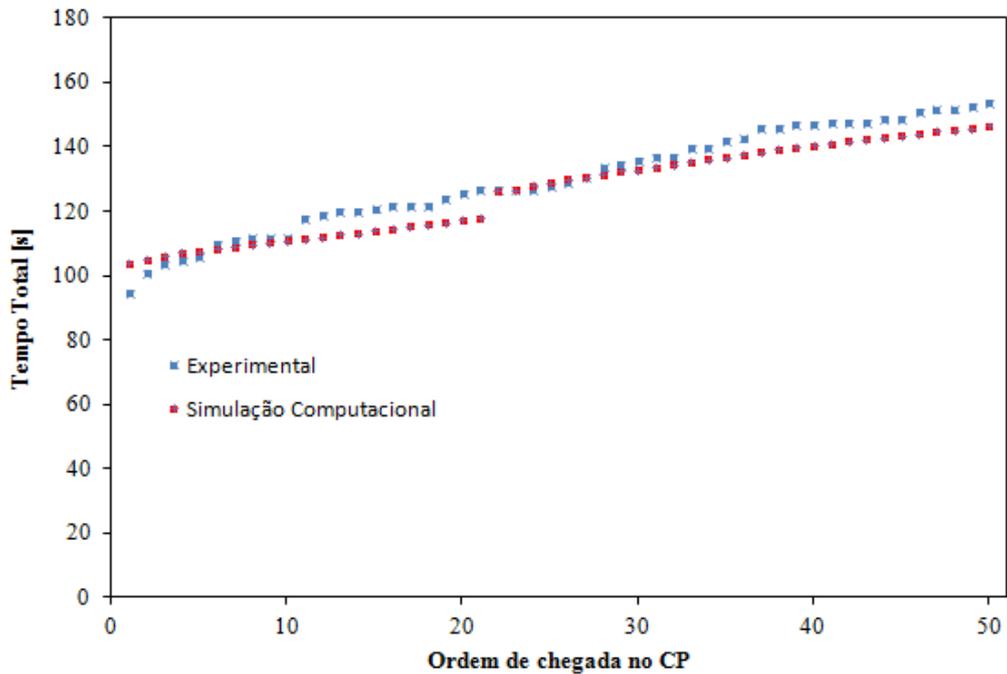


Figura 4.12: Comparação de resultados entre experimento e simulação para tempos totais de evacuação.

a formação de dois grupos de alunos se deslocando com um determinado distanciamento, onde o grupo de maior velocidade é composto em sua maior parte pelos alunos das salas 3 e 4 e o alunos com menor velocidade das salas 1 e 2. Este fato se justifica: (i) pelo número maior de participantes alocados na sala 1; (ii) consequentemente, o maior tempo de reação nesta sala; (iii) maior distância das salas 1 e 2 até o CP6. A Figura 4.13 apresenta: (a) distanciamento entre dois grupos formados durante o caminho do corredor observado no experimento; (b) reprodução através do modelo computacional do mesmo comportamento.

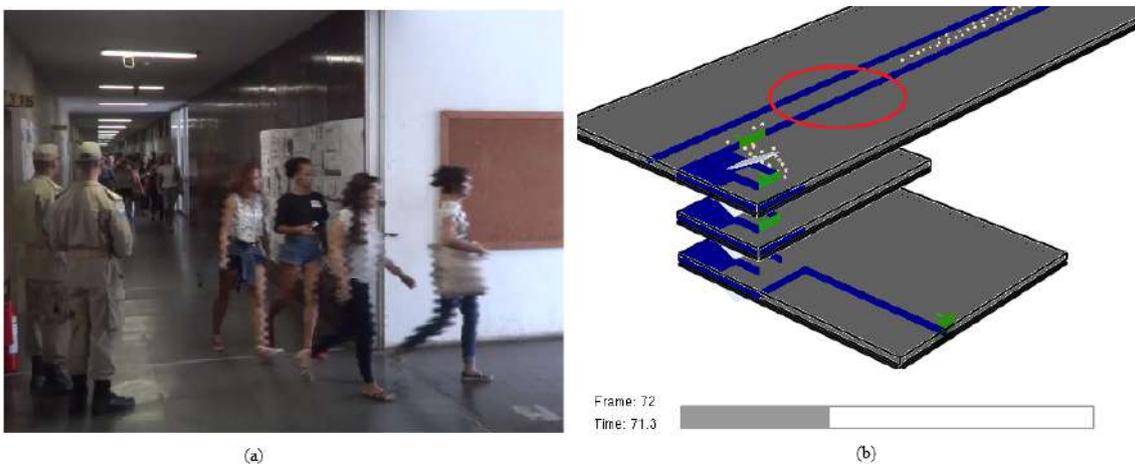


Figura 4.13: Formação de dois grupos se deslocando com distanciamento no corredor: (a) durante o experimento; (b) comportamento retratado através da simulação computacional.

Ao entrar nas escadas, foi observado um ordenamento no fluxo devido a maior densidade causada pelo estreitamento da largura do caminho, culminando na formação de um grupo apenas. Como relatado anteriormente, na etapa experimental foi observada a formação do efeito *jammimg* nas escadas. Foi possível reproduzir este efeito nas simulações computacionais, conforme exposto na Figura 4.14: Efeito *jammimg* nas escadas: (a) durante o ensaio experimental; (b) mesma conduta refletida através da ferramenta computacional.

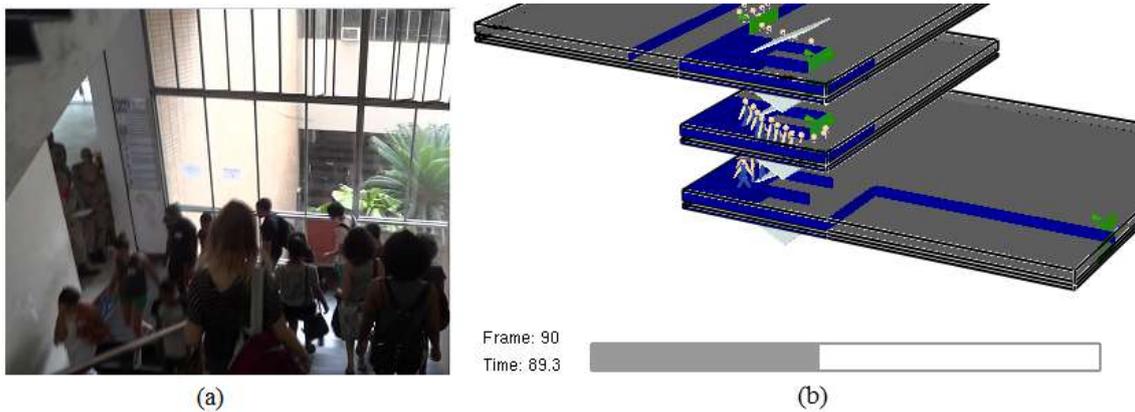


Figura 4.14: Efeito *jammimg* nas escadas: (a) ensaio experimental; (b) reprodução do comportamento através da simulação computacional.

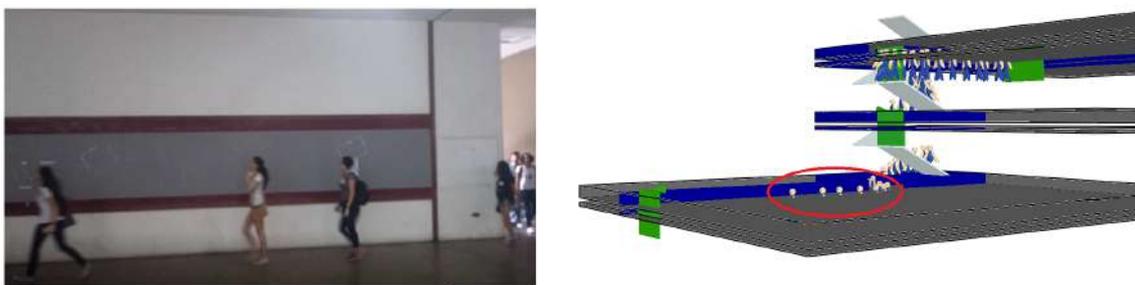


Figura 4.15: Fluxo ordenado dos participantes no corredor principal de acesso à porta principal do térreo; (a) experimental; (b) reprodução via simulação computacional.

A passagem pelas escadas desenvolveu no grupo de alunos (já unificado) um fluxo de caminhada bem ordenado. Atentou-se para o comportamento de caminhar em fila indiana dos participantes no corredor do térreo que dá acesso à saída principal do prédio. Este fenômeno também foi reproduzido através do modelo computacional como retrata a Figura 4.15: (a) fato observado no ensaio; (b) reprodução do efeito através da ferramenta de simulação computacional.

4.4.2 Cenário 2

Para o cenário 2 do experimento descrito no capítulo 3, devido a baixa visibilidade gerada pela presença de fumaça, não foi possível calcular as velocidades e tempos gastos nos percursos do corredor e escada, apenas tempo total de evacuação. Portanto, foi utilizado como ponto de partida o modelo já calibrado para o cenário 1.

Os ajustes para o modelo 2 visaram apenas a calibração do tempo total de evacuação através da redução da velocidade dos participantes por consequência da presença da fumaça.

Durante o simulado, não foi possível mensurar a densidade da fumaça artificial gerada, por conseguinte, não se calculou o coeficiente de extinção. O processo de calibração do modelo computacional se deu então através do ajuste do parâmetro de concentração de fuligem.

Definiu-se como condição de contorno inicial a presença de uma fumaça no ambiente de concentração tal que se pudesse alcançar a redução de velocidade desejada conforme exposto na Figura 4.16.

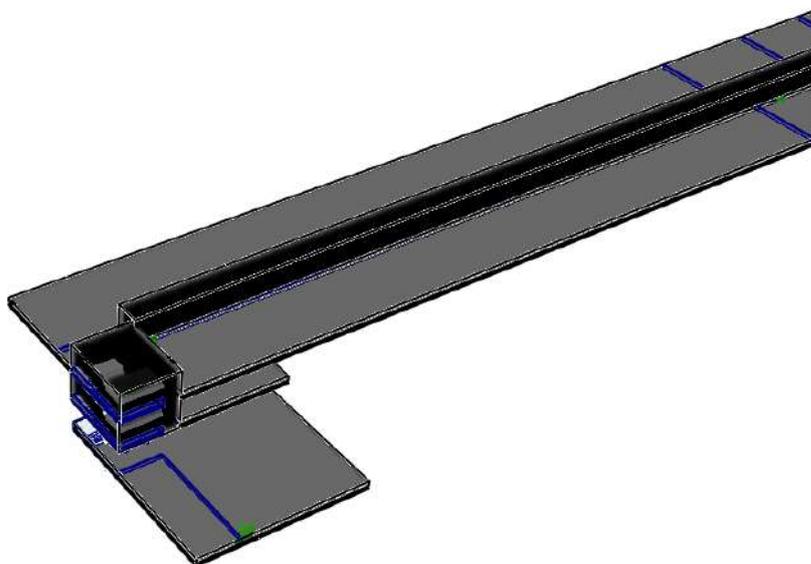


Figura 4.16: Fluxo ordenado dos participantes no corredor principal de acesso à porta principal do térreo; (a) experimental; (b) reprodução via simulação computacional.

O tempo total de evacuação registrado no cenário 2 para o ensaio foi de 173 segundos. O modelo calibrado para este cenário apresentou 171,7 segundos, de modo que o erro percentual entre o experimento e a simulação computacional é pequeno. A Figura 4.17 ilustra o momento final da evacuação para o cenário 2.

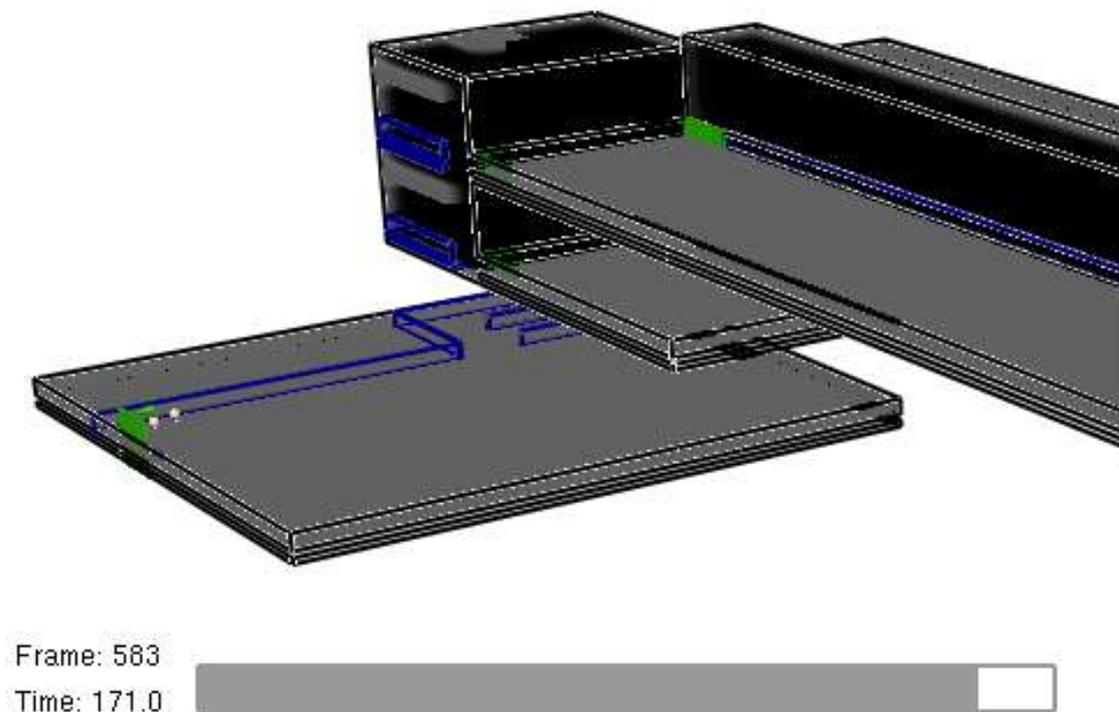


Figura 4.17: Simulação computacional para o cenário 2 do simulado.

4.4.3 Análise de Sensibilidade - Cenário 1

Além da calibração da redução da velocidade pelo efeito da fumaça no cenário 2, também foi executada uma análise de sensibilidade aos principais parâmetros do modelo no cenário 1. Os parâmetros variados foram as velocidades desejadas, o tempo de relaxação e o diâmetro dos agentes. A velocidade desejada dos grupos foi variada entre $1,2 v_0$ e $0,8 v_0$.

O impacto nos tempos totais de evacuação são mostrados na Figura 4.18. Verifica-se forte influência desta variável nos resultados. O diâmetro dos agentes foi variado entre $0,25 m$ e $1,0 m$. Verificou-se baixa influência deste parâmetro no modelo, conforme demonstrado na Figura 4.19.

O tempo de relaxação foi variado de $0,1 s$ a $1,0 s$, possuindo significativo impacto nos resultados da simulação de evacuação. Ressalta-se que o valor de $0,3 s$, para o tempo de relaxação, é capaz de representar resultados ainda mais próximos dos resultados experimentais que o da calibração anteriormente realizada, conforme demonstrado na Figura 4.20.

Por fim, foram executadas nove análises permitindo a variação estocástica de todas as variáveis relacionadas acima.

Desta forma, os valores aleatórios destes parâmetros variam em torno de valores padrão, estabelecidos de forma segura para diversos tipos de populações e já incorporados no software de simulação. O resultado gráfico é demonstrado na Figura

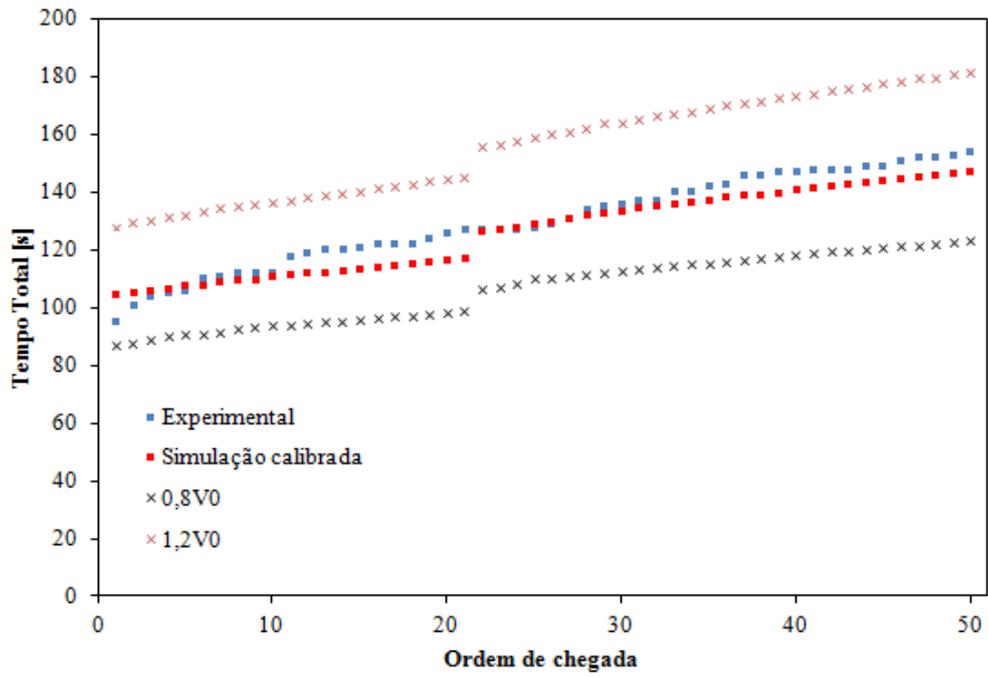


Figura 4.18: Análise de sensibilidade: impacto da variação da velocidade desejada v_0 nos tempos totais.

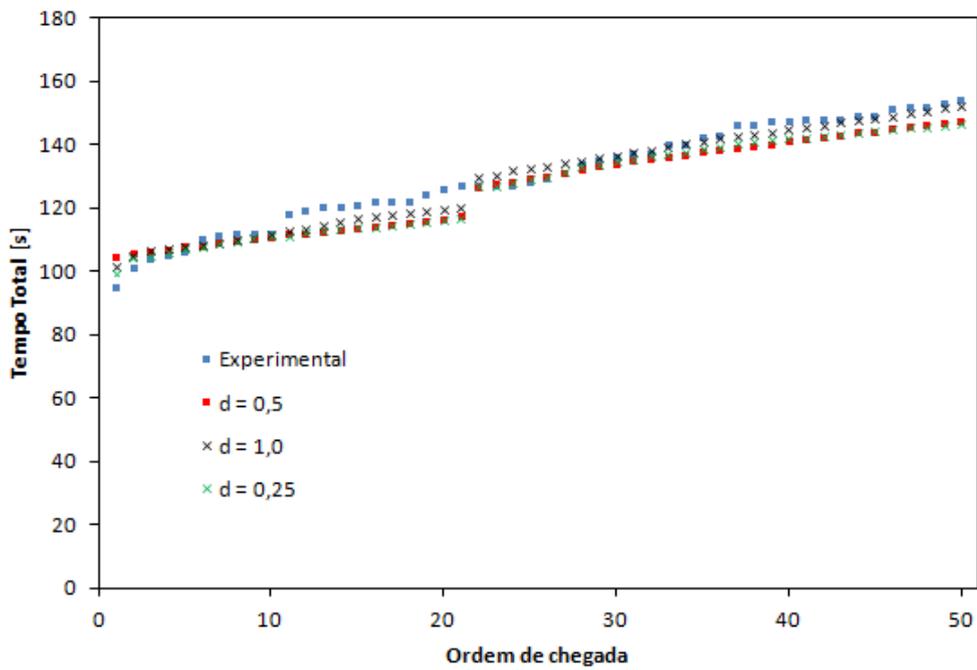


Figura 4.19: Análise de sensibilidade: impacto da variação do diâmetro dos agentes nos tempos totais.

4.21.

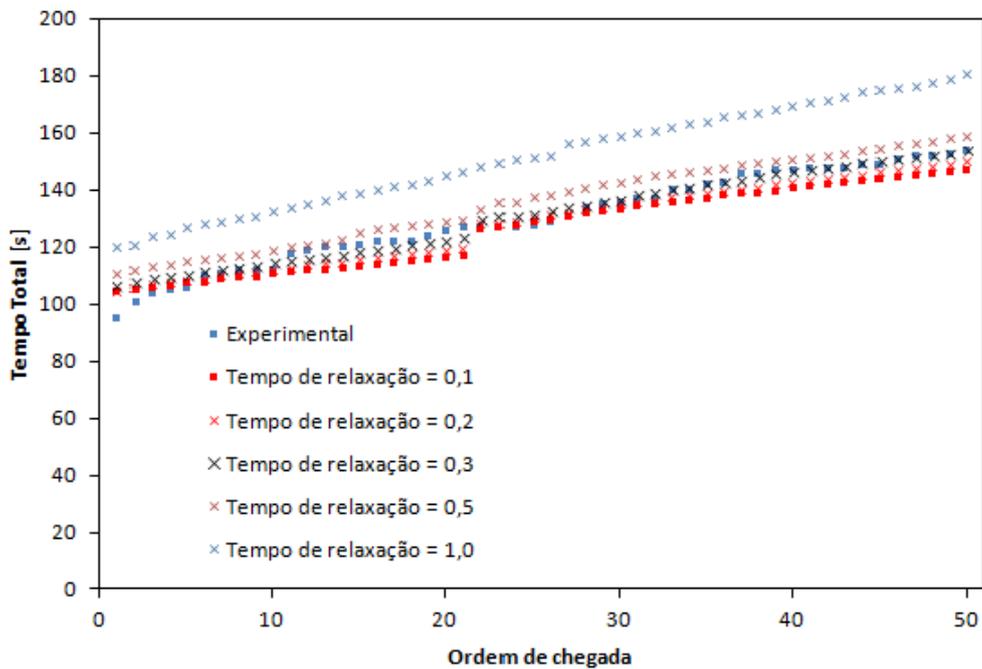


Figura 4.20: Análise de sensibilidade: impacto da variação do do tempo de relaxação dos agentes nos tempos totais.

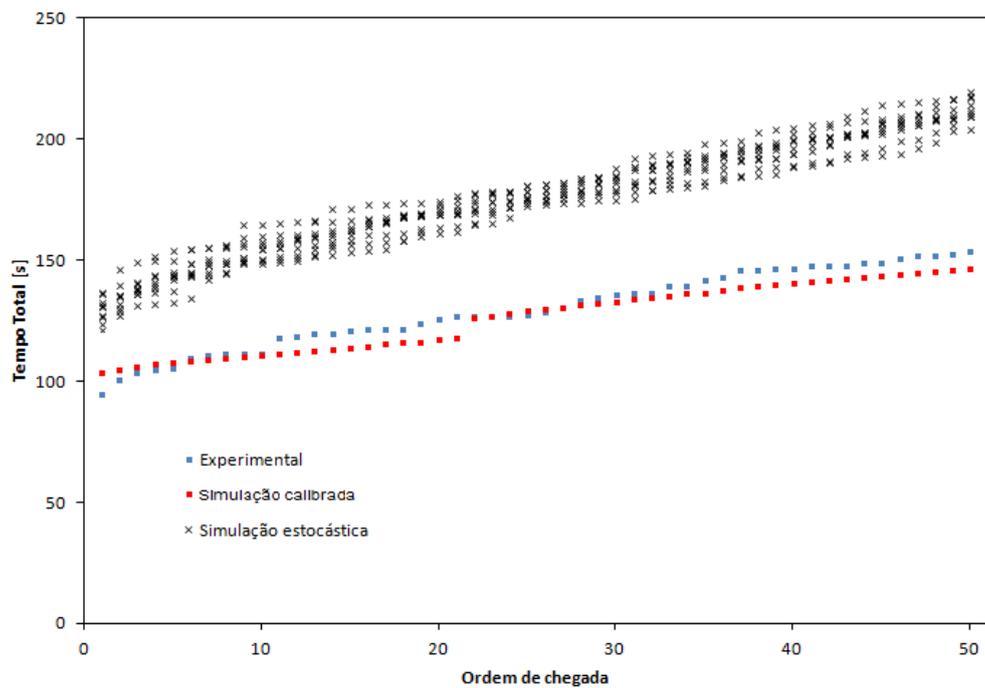


Figura 4.21: Análise de sensibilidade: variação estocástica em torno de parâmetros padrão, calibrados para diversos tipos de populações.

Os resultados demonstram que os valores padrão possuem range de aleatoriedade superior ao desvio entre experimento e resultado calibrado, conforme a metodologia deste trabalho. Além disso, comparando-se os resultados experimentais com os resultados estocásticos, é possível identificar evidente distanciamento entre os valores.

Este distanciamento é consequência da margem de segurança incorporada pelos parâmetros padrão, bem como do incremento de velocidade desejada e decréscimo do tempo de relaxação, consequentes do conhecimento das rotas de saída e da presença de monitores e sinais sonoros de orientação frequentes, durante o experimento de evacuação.

Capítulo 5

Conclusões

Na presente dissertação, uma metodologia de simulação computacional de movimento de pessoas foi descrita, executada e calibrada. Os ajustes foram efetuados comparando-se os resultados da ferramenta computacional com dados experimentais, obtidos em um ensaio de evacuação de edifício. Para viabilizar a calibração, uma extensiva análise do modelo foi elaborada, bem como um estudo de sensibilidade aos principais parâmetros de influência. A partir dos resultados obtidos é possível destacar que:

- Os tempos de reação calculados durante o ensaio experimental encontram-se abaixo dos valores reportados na literatura. Este fato se justifica: (i) pelo prévio conhecimento por parte dos participantes da dinâmica do simulado e da localização da saída da edificação; (ii) pela efetividade do sinal sonoro emitido pelos cadetes da academia do CMBERJ.
- Os dados de velocidade no corredor obtidos através do experimento encontram-se ligeiramente acima dos dados já reportados na literatura, o que representa de forma lídima a população em questão, que é em suma, jovem.
- No que se refere à velocidade dos alunos nas escadas, verificou-se que o resultado do ensaio encontra-se dentro da faixa de dados existentes na literatura.
- Foi possível, através do ensaio observar diversos efeitos coletivos pertinentes a situações de evacuação, o que ressalta a relevância de se considerar fatores psicológicos inerentes ao comportamento humano durante o projeto de meios de escape de instalações de reunião de grande público.
- Após a devida calibração do modelo computacional, foi possível representar de forma fidedigna: (i) os tempos totais de evacuação obtidos através do ensaio; (ii) os efeitos coletivos evidenciados: *Jamming* nas escadas, *herding* a subdivisão em grupos no corredor do terceiro andar; (iii) o ordenamento após saída

da escada no térreo; (iv) a discreta redução de velocidade de caminhada sob condições de fumaça.

- Neste trabalho a parte experimental e de simulação computacional foram utilizadas de forma sinérgica, permitindo significativa aderência entre os resultados computacionais e experimentais. Os resultados obtidos permitem a aplicação futura do modelo com maior confiabilidade em casos ou cenários similares.
- Desse modo, a metodologia descrita nesta dissertação poderá ser utilizada em instalações visando avaliar adequação para situações de evacuação, contribuindo para o efetivo aumento da segurança das pessoas e instalações, objetivando redução do risco de fatalidades em situações reais de evacuação.

5.1 Sugestões para Trabalhos Futuros

A seguir, são apresentadas sugestões para trabalhos futuros, a fim de aprimorar a metodologia proposta e enriquecer as conclusões e discussões sobre o tema:

- Aplicar a metodologia descrita para análise de movimentação de pessoas em situações de incêndio para todos os edifícios pertencentes aos campi da UFRJ. De forma a englobar um número representativo de cenários, afim de contribuir com a segurança das instalações.
- Realizar experimentos onde seja possível mensurar de forma realística o tempo de reação das pessoas com objetivo de preencher a lacuna do conhecimento existente na literatura no que se refere a dados específicos da população brasileira.
- Recomenda-se a utilização da ferramenta computacional em complemento aos exercícios simulados de emergência já existentes em edificações de porte. Esta alternativa é capaz de potencializar os resultados produzidos por este bem como guiar a execução do experimento visando minimizar o tempo de evacuação.
- Executar a metodologia computacional para o caso de instalações em fase de projeto quantificando os fatores comportamentais humanos visando aumento da segurança através da otimização dos meios de escape.
- Expandir a aplicação do método proposto para a área de transporte de grande número de passageiros: (i) metrô; (ii) trens; (iii) ônibus.

Referências Bibliográficas

- [1] LANDESMANN, A. *Laudo Técnico sobre o Incêndio Ocorrido em 03/10/2016 no Prédio da Reitoria da UFRJ*. Relatório Técnico 1, Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 2016.
- [2] NELSON, H. B., MOWRER, F. “Emergency Movement”. 3rd edition ed., cap. 14, pp. 3: 367–380, Quincy, Massachusetts, USA, National Fire Protection Association, 2002.
- [3] DRYSDALE, D. *An Introduction to Fire Dynamics*. 3rd edition ed. London, UK, Wiley, 2011.
- [4] GROSSHANDLER, W. *Report of the Technical Investigation of The Station Nightclub Fire*. Relatório Técnico NCSTAR 2, National Institute of Standards and Technology, Fire Research Division, Building and Fire Research Laboratory, Washington, USA, 2005.
- [5] D.HELBBING, I.FARKAS, MOLNÁR, P., et al. “Simulating of Pedestrian Crowds in Normal and Evacuation Situations”. pp. 21–58, Springer, 2002.
- [6] PROULX, G. “Occupant behaviour and evacuation”, *In Proceedings of the 9 th International Fire Protection Symposium*, pp. 25–26, 2001.
- [7] PROULX, G. “Movement of People: The Evacuation Timing”. 3rd edition ed., cap. 13, pp. 3: 342–365, Quincy, Massachusetts, USA, National Fire Protection Association, 2002.
- [8] PAN, X. *Computational modeling of human and social behaviors for emergency egress analysis*. Tese de doutorado, Stanford University, California, EUA, 2006.
- [9] MARCHANT, E. W. *Modelling Fire Safety and Risk: Fires and Human Behaviour*. 1st edition ed. London, UK, John Wiley, 1980.
- [10] HELIOVAARA, S. “Computational models for human behavior in fire evacuations”. 2007.

- [11] HELIOVAARA, S. *Pedestrian behavior in evacuations – simulation models and experiments*. Tese de doutorado, Aalto University, Espoo, Finlândia, 2014.
- [12] HELBING, D. “Pedestrian, crowd and evacuation dynamics”, *Encyclopedia of Complexity and Systems Science*, v. 16, pp. 6476–6495, 2010.
- [13] ORGANIZATION, I. M. “Interim Guidelines for Evacuation Analyses for New and Existing Passenger Ships”. 2002.
- [14] “OpenDocument”. <http://www1.folha.uol.com.br/cotidiano/2013/05/1287277-acusados-de-incendio-na-boate-kiss-sao-soltos-apos-decisao-da-justica.shtml>, 2017. Acesso em: 02/06/2017.
- [15] SCHADSCHNEIDER, A. “Evacuation dynamics: Empirical results, modeling and applications”, *Encyclopedia of Complexity and Systems Science*, pp. 6–19, 2008.
- [16] PAULS, J. *Building evacuation: Research findings and recommendations* In: *Fires and Human Behaviour*. 1st edition ed. New York, USA, Jonh Wiley, 1980.
- [17] FRUIN, J. *Pedestrian Planning and Design*. New York, USA, Association of Urban Designers and Environmental Planners, 1971.
- [18] SEYFRIED, A. “Basics of modelling the pedestrian flow”, *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, pp. 232–238, 2006.
- [19] PREDTECHENSKII, V. M. *Planing for foot traffic flow in buildings*. New Dehli, India, Amerind Publishing, 1978.
- [20] WEIDMANN, U. *Transporttechnik der Fußgänger - Transporttechnische Eigenschaften, des Fußgängerverkehrs (Literaturauswertung)*. 3rd edition ed. Zürich, Switzerland, Schriftenreihe des IVT 90, ETH Zürich, 1993.
- [21] OLDER, S. J. “Movement of pedestrians on footways in shopping streets”, *Tracffic Engineering and Control*, pp. 160–163, 1968.
- [22] HELBING, D. “The dynamics of crowd disasters: An empirical study”, *Physical Review E*, p. 75:046109, 2007.
- [23] CANTER, D. *Fires and Human Behaviour An Introduction*. 1st edition ed. London, UK, Jonh Wiley, 1980.
- [24] KEATING, J. P. “The myth of panic”, *Fire Journal*, pp. 57–62, 1982.

- [25] FAHY, F. R., PROULX, G. “Collective common sense: A study of human behavior during the World Trade Center evacuation”, *NFPA Journal*, pp. 59–67, 1995.
- [26] PROULX, G. “The impact of voice communication messages during a residential highrise fire”. In: *Proceedings of the First International Symposium on Human Behaviour in Fire*, Belfast, UK, 1998.
- [27] PROULX, G. “critical factors in high-rise evacuations”, *Fire Prevention*, pp. 24–27, 1996.
- [28] PROULX, G., FAHY, R., APPY, M., et al. *Home fire safety class for working adults*. Relatório Técnico IR 803, National Research Council of Canada, Canada, 1999.
- [29] JIN, T. “Visibility and Human Behavior in Fire Smoke”. 3rd edition ed., cap. 4, pp. 2: 42–53, Quincy, Massachusetts, USA, National Fire Protection Association, 2002.
- [30] HELBING, D. “A fluid-dynamic model for the movement of pedestrians”, *Complex Systems*, p. 391:315, 1992.
- [31] HENDERSON, L. F. “On the fluid mechanics of human crowd motion”, *Transportation Research*, p. 509:515, 1974.
- [32] HUGHES, R. L. “The flow of large crowds of pedestrians”, *Mathematics and Computers in Simulation*, p. 367:370, 2000.
- [33] HENDERSON, L. F. “The statistics of crowd fluids”, *Nature*, p. 381:383, 1971.
- [34] VON NEUMANN, J. *The Theory of Self-reproducing Automata*. Oak St., EUA, University of Illinois Press,, 1966.
- [35] SCHADSCHNEIDER, A., BURSTEDDE, C., KIRCHNER, A., et al. “Cellular automaton approach to pedestrian dynamics - application”. p. 87, Springer, 2001.
- [36] KISKO, . M., FRANCIS, R. L., NOBEL, C. R. *EVACNET4 User’s Guide, Version 10/29/98*. University of Florida, Florida, EUA, 1998.
- [37] HELBING, D., MOLNÁR, P. “Social force model for pedestrian dynamics”, *Physical Review E*, pp. 4282–4286, 1995.
- [38] HOSTIKKA, S., MCGRATTAN, K., MCDERMOTT, R., et al. *Fire Dynamics Simulator Technical Reference Guide Volume 3: Validation*. National Institute of Standards and Technology, Maryland, EUA, 2013.

- [39] FRANTZICH, H., NILSSON, D. *Utrymning genom tät rök: beteende och förflyttning*. Relatório Técnico 3126, Department of Fire Safety Engineering, Lund University, Lund, SE, 2003.
- [40] LIMA, J. *Medições indiretas e propagação da incerteza*. Relatório Técnico 1, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Porto Alegre, Brasil, 2012.
- [41] HOSTIKKA, S., PALOPOSKI, T., RINNE, T., et al. “Evacuation Experiments in Offices and Public Buildings”, *Espoo Convention*, pp. 1–53, 2007.
- [42] LIMPert, E., STAHEL, W., ABBT, M. “Log-normal Distributions across the Sciences: Keys and Clues”, *BioScience*, p. 341:352, 2001.
- [43] PURSER, D., BENSILUM, M. “Quantification of Behaviour for Engineering Design Standards and Escape Time Calculations”, *Safety Science*, pp. 157–182, 2001.
- [44] GWYNNE, S., GALEA, E., PARKE, J., et al. “The Collection of Pre evacuation Times from Evacuation Trials Involving a Hospital Outpatient Area and a University Library Facility”. In: *Fire Safety Science—Proceedings of the Seventh International Symposium International*, Worcester, MA, 2003.
- [45] FRANTZICH, H. *Tid för utrymning vid brand*. Relatório Técnico 2, Brandteknik, Lunds Tekniska Högskola, Lund, SE, 2001.
- [46] NILSSON, D. “Design of fire alarms: Selecting appropriate sounds and messages to promote fast evacuation”. In: *Sound, Safety and Society, Research on Sound and Sustainability*, Lund, SE, 2014.
- [47] OCCHIALINI, M., BERNARDINI, G., FERRACUTI, F. “Fire exit signs: The use of neurological activity analysis for quantitative evaluations on their perceptiveness in a virtual environment”, *Fire Safety Journal* 82, pp. 63–75, 2016.
- [48] KULIGOWSKI, E. D., PEACOCK, R. D., RENEKE, P. A. *Movement on Stairs During Building Evacuations*. Relatório Técnico Technical Note 1839, National Institute of Standards and Technology, Fire Research Division, Department of Commerce, Gaithersburg, EUA, 2015.
- [49] FRIDOLF, K., RONCHI, E., NILSSON, D., et al. “Movement Speed and Exit Choice in Smoke-Filled Rail Tunnels”, *Fire Safety Journal*, p. 8:21, 2013.

- [50] LOVREGLIO, R., RONCHI, E., NILSSON, D. “A Model of the Decision-making Process During Pre-evacuation”, *Fire Safety Journal*, p. 168:179, 2015.
- [51] KOBESA, M., HELSLOOTB, I., DE VRIES, B., et al. “Exit choice, pre movement time and pre evacuation behaviour in hotel fire evacuation – Behavioural analysis and validation of the use of serious gaming in experimental research”, *Procedia Engineering* 3, pp. 37–51, 2010.
- [52] HAGHANI, M., SARVI, M. “Human exit choice in crowded built environments: Investigating underlying behavioural differences between normal egress and emergency evacuations”, *Fire Safety Journal*, pp. 1–9, 2016.
- [53] CHRAIBI, M. “prt5-file parser for NIST’s Fire Dynamics Simulator (FDS)”. <https://github.com/chraibi/ptr5parser>, 2016. Acesso em: 02/06/2017.
- [54] BRYAN, J. “Behavioral Response to Fire and Smoke”. 3rd edition ed., cap. 12, pp. 3: 315–341, Quincy, Massachusetts, USA, National Fire Protection Association, 2002.
- [55] “OpenDocument”. <https://pt.wikipedia.org/wiki/IncendionaboateKiss>, 2016. Acesso em: 07/02/2016.
- [56] HOSTIKKA, S., KORHONEN, T., PALOPOSKI, T., et al. *Development and validation of FDS+Evac for evacuation simulations*. Relatório Técnico Research Notes 2421, VTT Technical Research Centre of Finland, Helsinki, Finlândia, 2007.
- [57] KENNEDY, W. D., LEVITT, H. L. “Fixed Guideway Transit and Passenger Rail Systems”. 2010.
- [58] HOSTIKKA, S., PALOPOSKI, T., RINNE, T., et al. *Evacuation Experiments in Offices and Public Buildings*. Relatório Técnico 85, Helsinki University of Technology, Espoo, Finlândia, 2007.
- [59] LANDESMANN, A. *Laudo Técnico Parcial Nº 2 sobre os Danos Estruturais do Incêndio ocorrido em 03/10/2016 no Ed. Jorge Machado Moreira - UFRJ*. Relatório Técnico 2, Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 2016.
- [60] DE BOMBEIROS MILITAR DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO, C. “Código de Segurança Contra Incêndio e Pânico”. 1976.
- [61] DE NORMAS TÉCNICAS, A. B. “Saídas de Emergência em Edifícios”. 2011.

Apêndice A

Análise de Conformidade Normativa aplicada ao Ed. JMM

No presente capítulo, analisa-se o nível de conformidade das instalações do Ed. JMM com os requisitos legais e normativos vigentes para garantia de segurança contra incêndio e pânico.

Primeiro apresentam-se as leis, códigos, normas e regulamentações vigentes e discute-se a aplicabilidade destas ao presente estudo de caso. Posteriormente, compara-se o nível de exigência da legislação vigente, considerando os requisitos aplicáveis para o caso, com o estado atual do edifício.

A.1 Legislação Vigente e Normatização Técnica

O decreto lei número 897, de 21 de setembro de 1976 regulamenta o decreto lei número 247, de 21 de julho de 1975, que dispõe sobre segurança contra incêndio e pânico no estado do Rio de Janeiro. O decreto 897 constitui o código de segurança contra incêndio e pânico (COSCIPI [60]), com objetivo de proteção de pessoas e seus bens contra incêndio e pânico no interior de edificações.

A seção II do 4º artigo do COSCIPI evidencia que a abrangência do código se estende aos edifícios com projeto e construção anteriores à data de publicação do mesmo. Em seguida, é reproduzido o 4º artigo e sua referida seção II.

“Art. 4º - O expediente relativo à Segurança Contra Incêndio e Pânico deverá tramitar obedecendo às seguintes normas:”... “Seção II - quando se tratar de edificações antigas ou de estabelecimento de qualquer natureza: a) apresentação ao Corpo de Bombeiros de requerimento solicitando vistoria para determinação de medidas de Segurança contra Incêndio e Pânico, juntando um jogo de plantas, se necessário; b) até 30 (trinta) dias após, recebimento do Laudo de Exigências, juntamente com as plantas apresentadas; c) apresentação de requerimento solicitando

Vistoria de Aprovação após cumpridas as exigências; d) recebimento do respectivo Certificado de Aprovação ou Certificado de Reprovação, 30 (trinta) dias após a entrada do requerimento de que trata a alínea anterior;”

No caso do edifício em análise, a data de construção é anterior ao ano de 1975, quando o código foi emitido, devendo, portanto, seguir a tramitação especificada na seção II do 4º artigo supracitados.

O mesmo documento esclarece o assunto no artigo 232, reproduzido em sequência:

“Art. 232 - As edificações e os estabelecimentos licenciados ou construídos antes da vigência deste Código deverão atender às exigências nele contidas, respeitadas as condições estruturais e arquitetônicas dos mesmos, podendo, a critério do Corpo de Bombeiros, as exigências comprovadamente inexequíveis ser reduzidas ou dispensadas e, em consequência, substituídas por outros meios de segurança.”

Neste artigo, fica expressamente indicado que o Corpo de Bombeiros é a autoridade competente para verificação do atendimento às exigências do COSCIP e por indicar requisitos alternativos, caso a aplicação dos requisitos vigentes, a uma edificação anteriormente construída, seja impraticável.

Adicionalmente, o decreto lei nº 35.671, de 09 de junho de 2004, dispõe especificamente sobre a segurança contra incêndio e pânico nas edificações construídas anteriormente à vigência do COSCIP. A lei 35.671 descreve requisitos adicionais aos requisitos do código, deixando claro, em seu 5º artigo, que as demais exigências do COSCIP deverão ser seguidas. Em sequência, o 5º artigo da lei 35.671 é reproduzido integralmente.

“Art. 5º - As disposições contidas no presente Decreto não isentam a edificação do cumprimento das demais exigências contidas no Decreto 897, de 21 de setembro de 1976 (Código de Segurança Contra Incêndio e Pânico – COSCIP).”

Ainda sobre o COSCIP, cabe ressaltar que o texto do decreto possui uma série de referências a resoluções sequencialmente numeradas (SEDEC) que são emitidas à medida da identificação de necessidade, para esclarecimento dos requisitos legais do referido código e para instruções complementares visando à conformidade com o referido código.

Ressalta-se também, que toda a legislação citada até este ponto do texto abrange apenas edifícios localizados no estado do Rio de Janeiro. Adicionalmente, cabe salientar que o código se sobrepõe aos requisitos de normas técnicas em vigor, pois possui força de lei devido ao decreto 897. Como é de conhecimento geral, normas técnicas são padrões de engenharia que não possuem endosso legal pré-estabelecido.

Entretanto, também é de conhecimento amplo e irrestrito que a adoção de normas técnicas vigentes e nacionalmente reconhecidas reduz significativamente o risco às pessoas e instalações, aumentando a segurança das edificações. Portanto, neste

texto também serão apresentados os principais requisitos da norma ABNT NBR 9077:2001 – Saídas de emergência em edifícios, referentes à garantia de segurança contra incêndios e controle de pânico.

Tanto o COSCIP, quanto a norma NBR-9077 [61] classificam os edifícios em função de suas características construtivas e sobre o objetivo ocupacional. A depender das classes definidas, os requisitos são mais ou menos restritivos.

A Tabela A.1 apresenta a classificação do edifício JMM segundo o COSCIP e segundo a norma NBR 9077, para permitir extrair dos referidos documentos, os principais requisitos aplicáveis.

Tabela A.1 – Classificação conforme COSCIP e NBR 9077

Documento	Classificação	Descrição e observações
COSCIP	Escolar	Edifício enquadrado em duas categorias, devido à presença de auditórios nos andares.
	De Reunião de Público	
NBR 9077	E-1/F-2	E-1: Escolar de uso geral; F-2: Templos e auditórios em geral
	O-1	O-1: Edificações altas com altura superior a 30 m;
	QSW Y	QSW: classificação relativa à área do maior pavimento, área do subsolo e área total; Y: edificação com mediana resistência ao fogo.

Avaliando-se as categorias presentes no 9º artigo do COSCIP, verifica-se que o edifício deve ser enquadrado em duas categorias. A primeira é a categoria escolar, por se tratar de uma dependência de ensino (uma universidade). A segunda categoria enquadrada é de reunião de público, pela presença de auditórios amplos no interior do edifício. Esta classificação em duas categorias resulta em maior rigor de requisitos, descritos pelo código, que para o caso de um edifício enquadrado em uma única categoria.

O mesmo efeito ocorre na classificação pela NBR 9077. O edifício se enquadra na categoria E-1 (escolar) e na categoria F-2 (auditórios em geral). Cabe ressaltar que a classificação pela norma NBR 9077 leva em consideração ainda outros dados do edifício, como altura e área das instalações.

De posse destas classificações, é possível extrair dos documentos apenas os requisitos aplicáveis para análise comparativa e de conformidade.

A Tabela A.2 apresenta de forma resumida os principais requisitos do COSCIP e NBR-9077 de forma comparativa. A definição dos requisitos principais foi feita considerando as exigências que possuem maior impacto na redução de risco e no consequente aumento de segurança contra incêndio e pânico no interior do edifício.

Adicionalmente, na mesma tabela, apresenta-se o grau de conformidade da instalação com cada requisito citado. Para cada exigência apresentada, está referenciado o respectivo item no documento de origem. Além dos itens, algumas observações e comentários são executados na mesma tabela, visando permitir a análise comparativa.

Avaliando-se a Tabela A.2, verifica-se um considerável nível de não conformidade com os requisitos do código COSCIP ou ainda com os requisitos da norma técnica ABNT NBR 9077.

Naturalmente, o alto nível de não conformidade é devido ao fato da inexistência de tais requisitos na data de projeto e construção do referido edifício.

Tabela A.2 – Análise comparativa dos requisitos legais, normativos e nível de conformidade.

Requisito(s):	Referência COSCIP	Referência NBR 9077	Nível de Conformidade do Edifício JMM
Sinalização de saída	Auditórios Art. 92-III c	Acessos e descarga de escadas, auditórios e edificações Item 4.13.3 Conforme NBR 10898	Inexistentes
Número mínimo de escadas para escape	3 escadas à prova de fumaça Art. 180	3 escadas à prova de fumaça 4.5.3 e tab.7	Escadas à prova de fumaça inexistente.
Distância máxima para as saídas	35 m entre escadas Art. 180	20 m à 45 m Dependente da existência de chuveiros e nº de saídas Tab.6	Não atendida. Apenas uma escada, sem ser à prova de fumaça.
Corrimão obrigatório nas escadas	Em ambos os lados Art.191	Item 4.8.4	Corrimão instalado em apenas em um dos lados da escada.
Numeração do andar	Em cada andar e no interior das escadas Art.183	Nos acessos às escadas e descargas. Item 4.13.3	Existente apenas nos corredores. Inexistente no interior da escada.
Sinalização das saídas dos auditórios e locais de reunião	Art.193	Item 4.13.3	Inexistentes
Informação de restrição ao uso de elevadores durante emergência	Art.202	Não exigido.	Não evidenciado.

Tabela A.2 – Análise comparativa dos requisitos legais, normativos e nível de conformidade.

Requisito(s):	Referência COSCIP	Referência NBR 9077	Nível de Conformidade do Edifício JMM
Existência de tubulação interna de prevenção a incêndio.	Art 17 Art 11-IV Art 15-IV Cap. VI	Fora do escopo da norma.	Não evidenciada tubulação interna de prevenção a incêndios.
Existência de portas corta fogo, leves e metálicas no acesso a escadas e antecâmaras.	Art 17 Art. 11IV Art 15-IV Art. 198	Item 4.5.4.3 Portas corta fogo conforme NBR 11742	Inexistentes
Existência de escada enclausurada à prova de fumaça	Art 17 Art. 11IV Art 15-IV Cap.XIX Art. 183	Item 4.5.3 Tab. 7	Inexistentes
Existência de antecâmaras para escadas à prova de fumaça com dutos de ventilação	Art.183 Art. 189	Itens 4.7.11, 4.7.12 e 4.7.13	Inexistente
Existência de chuveiros automáticos (“Sprinkler”)	Art 17 Art. 11IV Art 15-IV Art 80-III Explicitamente exigidos pela Lei 35.671 para edifícios antigos.	Fora do escopo da norma.	Inexistentes
Portas metálicas nos elevadores e vão do poço dos elevadores	Art 17 Art. 11V Art 15-V Art. 202	Não exigido.	Evidenciadas portas metálicas nos elevadores. Não evidenciadas portas metálicas no vão do poço.
Hidrantes internos	Art. 15 VI Cap. VII	Fora do escopo da norma.	Não evidenciado
Hidrantes públicos	Cap. V Art.22*	Fora do escopo da norma	Não evidenciado
Extintores portáteis e sobre rodas	Cap. XI Art. 81	Fora do escopo da norma	Evidenciados nos corredores do edifício.
Dispositivo anti pânico nos auditórios com capacidade acima de 200 pessoas	Art 92-III c	Item 4.5.4.6 Dispositivos conforme NBR 11785	Não evidenciados
Proibição de madeira ou plásticos em portas ou partes de portas	Não exigido.	Salas com cap. Superior a 50 pessoas ou nas rotas de saída. Item 4.5.4.7	Evidenciadas salas com portas de madeira nas salas de aula.

Tabela A.2 – Análise comparativa dos requisitos legais, normativos e nível de conformidade.

Requisito(s):	Referência COSCIP	Referência NBR 9077	Nível de Conformidade do Edifício JMM
Sinalização de saída	Auditórios Art. 92-III c	Acessos e descarga de escadas, auditórios e edificações Item 4.13.3 Conforme NBR 10898	Inexistentes
Sinalização de proibição de fumo nos auditórios	Art. 92-III c	Não exigido	Inexistente
Largura mínima de das escadas	2 m min, até (andares com auditórios de até 200 pessoas) Art. 92-III g	Dimensionadas conforme item 4.4 e tabela 5	Largura de 2 metros em todos os andares.
Dimensões dos degraus das escadas	16 cm = h= 18 cm. 63 cm = 2h +b = 64 cm. (h _{max}): 18,5 cm (b _{min}) 26 cm. Com espelhos. Art. 183 Auditórios: h = 18,5 cm b = 25 cm Com espelho Art. 92-III g	16 cm = h= 18 cm. 63 cm = 2h +b = 64 cm. Nariz (bocel) mínimo de 1,5 cm Item 4.7.3 Figura 4	Evidenciadas dimensões distintas dos requisitos
Dimensões das portas de saída	Dimensões conforme Art. 199 Em saída de auditórios abrindo para recuo Art. 92-III h	Dimensionadas conforme 4.4 e 4.5.4. Abrindo 180° Item 4.4.3.3.	Inexistência de recuos. Necessidade de verificação dimensional.
Abertura das portas de saída	Abertura sempre no sentido de saída. Não podem diminuir a largura da saída abaixo da mínima Art.197	Abertura no sentido de saída Item 4.5.4.1	Portas de correr ou abertura para o interior da sala.
Existência de duas portas nos auditórios	Art. 92-III m	Portas dimensionadas conforme 4.5.4	Não evidenciado
Largura de portas de auditórios	Largura mínima de 2m nas portas Art. 92-III m	Portas dimensionadas conforme 4.5.4	Necessidade de verificação dimensional.
Sistema de proteção contra descargas atmosféricas	Art. 168 II	Fora do escopo da norma	Não evidenciado
Existência de manual de segurança e plano de escape	Art. 179	Não há requisito	Não evidenciado