

**CORPO DE BOMBEIROS MILITAR DE SANTA CATARINA  
DIRETORIA DE ENSINO  
CENTRO DE ENSINO BOMBEIRO MILITAR  
ACADEMIA BOMBEIRO MILITAR**

**WAGNER ALBERTO DE MORAES**

**ESTUDO DA OBSTRUÇÃO DAS SAÍDAS DE EMERGÊNCIA DURANTE A  
EVACUAÇÃO URGENTE SOB ELEVADA DENSIDADE POPULACIONAL**

**FLORIANÓPOLIS  
ABRIL 2014**

**Wagner Alberto de Moraes**

**Estudo da obstrução das saídas de emergência durante a  
evacuação urgente sob elevada densidade populacional**

Monografia apresentada como pré-requisito para  
conclusão do Curso de Formação de Oficiais do Corpo  
de Bombeiros Militar de Santa Catarina.

**Orientador: Ten Cel BM Vanderlino**

**Florianópolis  
Abril 2014**

CIP – Dados Internacionais de Catalogação na fonte

---

M827e Moraes, Wagner Alberto de

Estudo da obstrução das saídas de emergência durante a evacuação urgente sob elevada densidade populacional . / Wagner Alberto de Moraes. -- Florianópolis : CEBM, 2014.

94 f. : il.

Monografia (Curso de Formação de Oficiais) – Corpo de Bombeiros Militar de Santa Catarina, Centro de Ensino Bombeiro Militar, Curso de Formação de Oficiais, 2014.

Orientador: Ten Cel BM Vanderlei Vanderlino Vidal, Esp.

1. Evacuação de edificações . 2. Saída de emergência . 3. Dinâmica de multidões. II. Título.

CDD 363.379

---

Wagner Alberto de Moraes

Estudo da obstrução das saídas de emergência durante a evacuação urgente sob elevada densidade populacional

Monografia apresentada como pré-requisito para conclusão do Curso de Formação de Oficiais do Corpo de Bombeiros Militar de Santa Catarina.

Florianópolis (SC), 08 de Abril de 2014.

---

Prof Esp Vanderlei Vanderlino Vidal – Ten Cel BM  
Orientador

---

Prof Esp Alexandre Vieira – Major BM  
Membro da Banca Examinadora

---

Prof Esp Fábio Fregapani Silva – 2º Ten BM  
Membro da Banca Examinadora

Dedico este trabalho a Deus, companheiro inseparável; aos meus pais, pelo amor e apoio incondicional em todos os momentos; à minha noiva, pelo carinho e compreensão.

## AGRADECIMENTOS

A Deus, por sempre abrir portas em minha vida e me dar força para que eu as mantenha abertas.

Aos meus pais pelos ensinamento mais preciosos que recebi: fazer o bem não importa a quem.

A minha noiva, Sofia, pela força, carinho e compreensão. Tenho ao meu lado uma grande mulher.

Ao Corpo de Bombeiros Militar de Santa Catarina, instituição de excelência, tenho orgulho de fazer parte desta família.

A todos oficiais, praças, funcionários civis e alunos do Centro de Ensino Bombeiro Militar, que contribuíram sobremaneira para a minha formação bombeiro militar.

Em especial ao Maj BM Helton, comandante da Academia Bombeiro Militar na época do ensaio, por ter autorizado a realização destes experimentos durante o VII Treinamento de Resistência Operacional.

Aos alunos soldados do CFSd 2013 do Corpo de Bombeiros Militar de Santa Catarina, pela participação nas atividades práticas, vocês foram o diferencial deste trabalho.

A Empresa 4Vision e ao Ten BM Fregapani, pelo apoio nas filmagens dos experimentos.

Ao pesquisador, Illès Farkas, por ter disponibilizado seu modelo matemático já implementado, reduzindo tempo de pesquisa e agregando a credibilidade de seu referendado trabalho, apresentado em artigo da Revista Nature em 2000 (volume 407).

Ao meu orientador, Ten Cel Vanderlino, pela orientação, apoio e preciosos conhecimentos.

“Embora ninguém possa voltar atrás e fazer um novo começo, qualquer um pode começar agora e fazer um novo fim.”

(Francisco Cândido Xavier)

## RESUMO

O presente trabalho faz um estudo sobre as causas e consequências da obstrução das saídas de emergência pelas pessoas durante a evacuação urgente sob elevada densidade populacional. Em um ambiente controlado e livre de obstáculos internos, foram realizados experimentos de evacuação através de uma única saída com 1,12 m de vão livre, variando-se apenas a densidade populacional. Nas filmagens foram observados diversos fenômenos tais como a formação de arcos de sustentação, onde as pessoas ficam presas umas as outras e contra às paredes, e a turbulência, caracterizada pelo deslocamento aleatório e involuntário das pessoas dentro da multidão. Paralelamente, foram realizadas simulações análogas aos experimentos utilizando o modelo proposto por Helbing, Farkas e Vicsek (2000). Foram obtidos tempos de evacuação próximos aos resultados experimentais, mostrando uma tendência de redução no fluxo das pessoas através da porta com o aumento da densidade populacional nas proximidades da saída. O mesmo modelo computacional foi replicado para verificar quanto a adição de uma coluna a frente da saída de emergência ou o aumento sistemático da saída melhora os tempo de evacuação. Embora as normas historicamente tenham dado grande ao aumento das aberturas da saídas, os resultados apresentados neste trabalho mostram que muito mais do que “abrir as portas” há que se prever sistemas focados na qualidade, que ordenem a saída do público, evitando o aumento localizado das densidades nas proximidades da saída de emergência.

**Palavras-chave:** Evacuação de edificações. Saída de emergência. Dinâmica de multidões.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	Processo comportamental em incêndios . . . . .	33
Figura 2	Formação de arcos . . . . .	38
Figura 3	Efeito de canto . . . . .	39
Figura 4	Simulação: influência do nível de pânico sobre a evacuação . . . . .	43
Figura 5	Croqui do experimento . . . . .	46
Figura 6	Tomada de imagens das 3 câmeras . . . . .	47
Figura 7	Ilustração do modelo matemático: cinemática . . . . .	49
Figura 8	Ilustração do modelo matemático: dinâmica . . . . .	50
Figura 9	Zonas de baixa pressão dentro da multidão . . . . .	55
Figura 10	Resultados experimentais tratados . . . . .	55
Figura 11	Visualização dos arcos que bloqueiam a saída . . . . .	57
Figura 12	Observação do aprisionamento contra à parede . . . . .	58
Figura 13	Visualização do efeito de turbulência . . . . .	59
Figura 14	Análise das trajetórias individuais devido ao efeito de turbulência . . . . .	60
Figura 15	Tela de simulação que representa o experimento . . . . .	62
Figura 16	Tela de simulação com obstáculo defronte a saída de emergência . . . . .	64
Figura 17	Curva de evacuação simulada com obstáculo defronte a saída . . . . .	65
Figura 18	Simulação de um cenário hipotético com portas de 200 cm e 80 cm . . . . .	70
Figura 19	Simulação de um cenário hipotético com portas de 160 cm e 120 cm . . . . .	70
Figura 20	Cenários de simulação do evento da boate Kiss . . . . .	76
Figura 21	Medição da largura dos ombros . . . . .	87
Gráfico 1	Resultados experimentais . . . . .	53
Gráfico 2	Validação do modelo de simulação . . . . .	63
Gráfico 3	Tempo de evacuação simulado em função da larguras da saída . . . . .	66
Gráfico 4	Perfil da evacuação simulada para diferentes larguras da saída . . . . .	67
Gráfico 5	Simulação do tempo de evacuação em função da abertura, representado em três etapas . . . . .	68
Gráfico 6	NSCI e os tempos de evacuação em função da lotação. . . . .	73
Gráfico 7	Resultados de cenários similares à boate Kiss com 1000 pessoas . . . . .	77

Gráfico 8	Resultados de cenários similares à boate Kiss com 600 pessoas . . . . .	78
Quadro 1	Histórico da normatização de saídas de emergência no mundo. . . . .	27
Quadro 2	Evolução do conceito de pânico. . . . .	34
Quadro 3	Parâmetros para simulação simplificada da boate Kiss . . . . .	76
Quadro 4	Saída de emergência em edificações . . . . .	94

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Resultados experimentais . . . . .	53
Tabela 2	Parâmetros de simulação . . . . .	62
Tabela 3	Tempo de evacuação e fluxo em função da abertura da saída . . . . .	88
Tabela 4	Resultado de simulação: indivíduos 1 a 50 . . . . .	89
Tabela 5	Resultado de simulação: indivíduos de 51 a 100 . . . . .	90
Tabela 6	Resultado de simulação: indivíduos de 101 a 150 . . . . .	91
Tabela 7	Resultado de simulação: indivíduos de 151 a 200 . . . . .	92
Tabela 8	Resultado de simulação: indivíduos de 201 a 210 . . . . .	93

## LISTA DE ABREVIATURAS

CBMSC	Corpo de Bombeiros Militar de Santa Catarina
CEBM	Centro de Ensino Bombeiro Militar
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
NFPA	<i>National Fire Protection Association</i>
NIST	<i>National Institute of Standards and Technology</i>
NBS	<i>National Bureau of Standards</i>
NSCI	Norma de Segurança Contra Incêndio e Pânico
PPCI	Projeto Preventivo Contra Incêndio
PRE	Plano de Regularização de Edificação
TRO	Treinamento de Resistência Operacional
DJ	<i>Disk Jockey</i>

## LISTA DE SÍMBOLOS

$D$	densidade populacional
$J$	fluxo
$\overline{J_{evac}}$	fluxo médio através da saída de emergência
$l$	largura da saída de emergência
$v$	velocidade média dos indivíduos
$Ca$	capacidade de passagem
$P$	lotação
$N_0$	lotação
$u.p.$	unidade de passagem
$N$	número de unidades de passagem
$t$	tempo
$t_{evac}$	tempo de evacuação total
$t_{sim}$	tempo de evacuação total (simulado)
$t_{exp}$	tempo de evacuação total (experimental)
$v_i^0$	escalar velocidade individual desejada
$\mathbf{e}_i^0$	vetor direção desejada
$\mathbf{v}_i$	vetor velocidade do indivíduo $i$
$m_i$	massa do indivíduo $i$
$\tau$	tempo de reação ao incêndio
$\mathbf{f}_{ij}$	vetor força entre os indivíduos $i$ e $j$
$\mathbf{f}_{iW}$	vetor força entre o indivíduo $i$ e a parede $W$
$\mathbf{f}_p$	vetor força psicológica
$\mathbf{f}_b$	vetor força de reação à compressão dos corpos

$\mathbf{f}_f$	vetor força de fricção
$A_i$	amplitude de $f_{psic}$
$B_i$	constante de espaço de $f_{psic}$
$\kappa$	constante de fricção
$2 R_i$	largura ombro-a-ombro do indivíduo $i$
$d_{ij}$	distância entre os centros dos indivíduos $i$ e $j$
$k$	constante força de reação à compressão dos corpos
$\mathbf{r}_i$	vetor posição do indivíduo $i$ no espaço
$\mathbf{n}_{ij}$	vetor unitário que aponta do indivíduo $j$ ao $i$
$\mathbf{t}_{ij}$	vetor unitário direção tangencial ao movimento relativo entre os indivíduos $i$ e $j$
$N_p$	número de indivíduos a frente de uma dada porta
$N_e$	número de indivíduos evacuados por uma dada porta
$V_1$	câmera 1
$V_2$	câmera 2
$V_3$	câmera 3

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>16</b>
1.1	OBJETIVOS . . . . .	16
1.1.1	Objetivos Específicos . . . . .	17
1.2	JUSTIFICATIVA . . . . .	17
1.3	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO . . . . .	18
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b>	<b>19</b>
2.1	ONDE A SAÍDA DE EMERGÊNCIA FALHOU . . . . .	19
2.1.1	Boate Kiss, Santa Maria, Brasil, 2013 . . . . .	19
2.1.2	República Cromagnon, Buenos Aires, Argentina, 2004 . . . . .	21
2.1.3	Boate Station, Rhode Island, EUA, 2003 . . . . .	22
2.1.4	Boate E2, Chicago, EUA, 2003 . . . . .	23
2.1.5	Dance Hall, Gotenburgo, Suécia, 1998 . . . . .	23
2.1.6	Stardust, Irlanda, 1981 . . . . .	24
2.1.7	Show do The Who, Cincinnati, EUA, 1979 . . . . .	25
2.1.8	Italian Hall, Calumet, EUA, 1913 . . . . .	25
2.1.9	Síntese . . . . .	25
2.2	NORMATIZAÇÃO EM SAÍDAS DE EMERGÊNCIA . . . . .	26
2.2.1	Legislação Catarinense . . . . .	29
2.2.1.1	Poder de Polícia no CBMSC . . . . .	30
2.2.2	Síntese . . . . .	31
2.3	A EVACUAÇÃO DE EMERGÊNCIA . . . . .	31
2.3.1	Comportamento humano . . . . .	31
2.3.1.1	Pânico em massa ou resiliência coletiva? . . . . .	35
2.3.2	Dinâmica de Multidão . . . . .	36
2.3.2.1	Fenômenos Individuais . . . . .	37
2.3.2.2	Fenômenos Grupais . . . . .	38
2.3.3	Síntese . . . . .	39
2.4	O ESTADO DA ARTE . . . . .	40
2.4.1	Experimento com camundongos . . . . .	40
2.4.2	Modelos computacionais . . . . .	41
2.4.2.1	Exemplo de modelo de simulação . . . . .	42
2.4.3	Síntese . . . . .	44
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>45</b>
3.1	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL . . . . .	45

	15
3.2	MODELO DE SIMULAÇÃO . . . . . 48
<b>4</b>	<b>ANÁLISE DOS RESULTADOS 52</b>
4.1	RESULTADOS EXPERIMENTAIS . . . . . 52
4.1.1	<b>Resultados quantitativos . . . . . 52</b>
4.1.2	<b>Resultados qualitativos . . . . . 56</b>
4.1.2.1	Formação de arcos de sustentação . . . . . 56
4.1.2.2	Efeito de turbulência . . . . . 58
4.2	RESULTADOS SIMULADOS . . . . . 61
4.2.1	<b>Obstáculo dissipador da pressão na multidão . . . . . 64</b>
4.2.2	<b>Influência da largura do vão da saída . . . . . 65</b>
4.2.2.1	Por que a relação entre abertura da saída e tempo de evacuação não é linear? . . . . . 67
4.2.2.2	Se existirem duas portas, como dimensioná-las? . . . . . 68
4.3	ANÁLISE DA NORMATIZAÇÃO . . . . . 72
4.3.1	<b>Previsibilidade do tempo de evacuação . . . . . 72</b>
4.3.2	<b>Controle de lotação . . . . . 73</b>
4.3.3	<b>Ordenamento de público . . . . . 74</b>
4.3.4	<b>Larguras das saídas de emergência . . . . . 74</b>
4.3.5	<b>Análise normativa de um caso real, a boate Kiss . . . . . 75</b>
4.4	SÍNTESE DOS RESULTADOS . . . . . 78
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO 81</b>
5.1	RETOMADA DOS OBJETIVOS . . . . . 81
5.2	RESPONDENDO O PROBLEMA DE PESQUISA . . . . . 81
5.3	CONSIDERAÇÕES FINAIS . . . . . 82
	<b>REFERÊNCIAS 85</b>
	<b>APÊNDICE A Definição da largura dos indivíduos 87</b>
	<b>APÊNDICE B Resultados de simulação 88</b>
B.1	Tamanho de porta . . . . . 88
	<b>APÊNDICE A Capacidade de acesso 94</b>

# 1 INTRODUÇÃO

O incêndio ocorrido na Boate Kiss em Santa Maria-RS no dia 27 de janeiro de 2013 reafirmou a política que deve nortear todos os Corpos de Bombeiro que buscam preservar vidas: investir em prevenção é mais eficiente que em resposta. Por mais bem equipado que possa estar, ou mais rápido que possa responder a um sinistro dessa magnitude, os Corpos de Bombeiros pouco poderiam fazer para liberar a passagem de pessoas que se aglomeram em uma saída de emergência lutando para escapar do ambiente tomado por fumaça tóxica. É imperativo que pessoas, localizadas em ambientes propícios ao rápido acúmulo de fumaça, sejam evacuadas rapidamente.

Nas normas atuais a quantidade e largura total das saídas de emergência dos locais de concentração de público são calculadas, dentre outros fatores, utilizando-se a lotação máxima do local. Cada unidade de passagem, largura ombro a ombro entre as colunas de indivíduos enfileirados na passagem pela saída, é 0,55 m. Qualquer unidade de passagem é capaz de evacuar um determinado número de pessoas por unidade de tempo. O cálculo considera que as pessoas estão calmas, sabem o que fazer e formam filas ordenadas. Comportamento semelhante ao escoamento laminar de um fluido, o leito de um rio de águas calmas.

Entretanto, este padrão não condiz com a realidade de um sinistro onde há grande densidade populacional e as pessoas não estão alertas, não conhecem a edificação e muitas vezes estão em estado psico-fisiológicos alterados. Quando a fumaça toma conta, a busca por ar puro fará as pessoas à retaguarda empurrarem aquelas à frente. Indivíduos próximos à saída sofrerão pressões e ficarão obstruídos uns aos outros, criando arcos de grande resistência que inibem a evacuação. O efeito psicológico ao perceber a saída congestionada é aumentar a força sobre aqueles à sua frente, levando ao esmagamento de pessoas contra obstáculos físicos, ou ao pisoteamento daqueles que caem ao solo.

Quais fatores causam a obstrução das saídas de emergência e retardam a evacuação de pessoas em condições extremas? Existe algum remédio alternativo ao aumento da largura das saídas de emergência?

## 1.1 OBJETIVOS

Estudar a obstrução nas saídas de emergência e discutir soluções para garantir que a evacuação seja mais rápida e segura.

### 1.1.1 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos estão relacionados às etapas que serão seguidas, e podem ser resumidos nos seguintes verbos: pesquisar, experimentar, simular e analisar.

**Pesquisar** os seguintes tópicos relacionados ao objetivo do trabalho:

- a) sinistros históricos;
- b) normatização;
- c) comportamento humano;
- d) dinâmica das multidões;
- e) pesquisas correlacionadas;

**Experimentar** a evacuação de emergência através de uma saída monitorada por câmeras de vídeo visando identificar nas filmagens os fenômenos de dinâmica de multidões que afetam a saída das pessoas. Paralelamente, obter uma relação entre a lotação do local de reunião de público e o tempo necessário para a saída de todos.

**Simular** os cenários aplicados nos experimentos, utilizando um modelo matemático descrito em Helbing, Farkas e Vicsek (2000) e comparar seus resultados de tempo de evacuação com àqueles obtidos nos experimentos. visando analisar os tempos de evacuação teórico e experimental. Testar, em ambiente de simulação, a capacidade das seguintes soluções em reduzir o tempo de evacuação: aumentar a largura da porta ou adicionar um dispositivo que dificulte a formação de bloqueios nas saídas de emergência.

**Analisar**, sob a ótica dos resultados apresentados, a efetividade da norma vigente em Santa Catarina em evitar tragédias relacionadas à obstrução das saídas de emergência.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

O interesse do Corpo de Bombeiros Militar de Santa Catarina está contemplado no aperfeiçoamento das normas de segurança contra incêndio e pânico, especificamente na adequação de rotas de fuga e saídas de emergência de locais com grande concentração de pessoas. A opção por um bom método matemático e a realização de experimentos relacionados ao tema, trazem credibilidade a norma, levando-a a ter um caráter mais técnico e menos empírico.

Ao público em geral, o desenvolvimento de saídas de emergências mais seguras, reflete em segurança da população em hospitais, escolas, supermercados, condomínios. Sistemas de segurança bem planejados fazem a diferença nos sinistros, naqueles momentos em que os segundos passam a contar como horas.

### 1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Após esta introdução, o Capítulo 2 traz uma revisão bibliográfica relacionada às evacuações urgentes com bloqueio das saídas de emergência por parte das pessoas em pânico. Serão abordadas algumas das tragédias mais marcantes, a normatização, o conceito de pânico, a dinâmica de multidões e as pesquisas relacionadas ao tema.

O Capítulo 3 descreve a metodologia utilizada nos experimentos de evacuação de emergência realizados no Centro de Ensino Bombeiro Militar (Seção 3.1) e o modelo matemático que simula a evacuação de pessoas, gentilmente cedido por Helbing, Farkas e Vicsek (2000), o qual é detalhadamente analisado na Seção 3.2.

O Capítulo 4 traz os resultados experimentais e simulados. Na Seção 4.1 são identificados fenômenos relacionados à dinâmica de multidões analisando-se as imagens dos experimentos de evacuação. A Seção 4.2 traz os tempos de evacuação obtidos nas simulações de cenários análogos aos utilizados nos experimentos. O software é utilizado para calcular tempos de evacuação em cenários idealizados: maiores aberturas nas saídas e inclusão de obstáculos em frente a porta. A Seção 4.3 faz uma análise da norma, especificamente a parte relacionada às saídas de emergência da normatização vigente em Santa Catarina, com fulcro nos resultados deste trabalho. São simulados cenários relacionados à boate Kiss, verificando se, e como, cada elemento normativo poderia melhorar aquela evacuação.

O Capítulo 5 verifica o alcance dos objetivos e responde as perguntas de pesquisa (Quais fatores causam a obstrução das saídas de emergência e retardam a evacuação de pessoas em condições extremas? Existe algum remédio alternativo ao aumento da largura das saídas de emergência?). Nas considerações finais, discute-se como alguns resultados podem ser materializados em medidas que tornem os locais de reunião de público mais seguros e quais seriam os próximos passos para esta linha de pesquisa.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo traz um compêndio de sinistros mundo afora onde vidas humanas foram ceifadas por anomalias na evacuação de edificações de reunião de público, em especial aqueles decorrentes de elevada densidade populacional (Seção 2.1). A fundamentação teórica reúne assuntos relacionados: às normas de segurança contra incêndio e pânico (Seção 2.2); às pesquisas sobre movimento de multidões e comportamento de pânico (Seção 2.3); aos trabalhos de pesquisadores que analisaram a obstrução das saídas de emergência (Seção 2.4)

### 2.1 ONDE A SAÍDA DE EMERGÊNCIA FALHOU

A presente seção traz uma releitura de tragédias humanas relacionadas à evacuação deficiente de público, resultado de rotas de fuga mal projetadas, em desacordo com normas vigentes, trancadas ou simplesmente inadequadas ao número de pessoas que as edificações comportavam no momento dos sinistros.

#### 2.1.1 Boate Kiss, Santa Maria, Brasil, 2013

No dia 27 de janeiro de 2013 um incêndio trágico na boate Kiss em Santa Maria, interior do Estado do Rio Grande do Sul, foi responsável pela morte de 242 pessoas. A investigação relatada em Rio Grande do Sul (2013, p. 2) concluiu que a causa do incêndio foi,

[...] uma centelha de um fogo de artifício utilizado pela Banda Gurizada Fandangueira. [...] O vocalista da banda levantou a mão em direção ao teto e uma chama ou faísca tocou o forro, o qual possuía isolamento acústico de esponja, material altamente inflamável (poliuretano). Assim, poucos segundos depois a espuma pegou fogo, gerando uma fumaça preta e tóxica que se alastrou por toda a boate, [...] fazendo com que muitas pessoas desmaiassem tão logo aspiraram o ar impregnado da fumaça originada da queima.

Em decorrência da fumaça, os indivíduos tentaram desesperadamente deixar o local mas os sistemas relacionados à saída de emergência falharam, como descreve Rio Grande do Sul (2013, p. 3),

[...] A Boate Kiss possuía apenas uma saída que dava acesso ao seu exterior. A referida saída foi absolutamente insuficiente para dar vazão à quantidade de pessoas que se amontoaram na tentativa desesperada

de deixar o local, sendo que muitas delas morreram buscando a saída. Não bastasse a existência de uma única saída, contribuiu também para o resultado danoso a existência de diversos obstáculos físicos, guarda-corpos (barras de contenção) nas rotas de saída, degraus, deficiência da iluminação de emergência, falta de indicação ou sinalização das rotas de fuga, além do local estar superlotado, fatores que em conjunto dificultaram a rápida evacuação do local.

Soma-se a isto o despreparo dos seguranças do local que em um primeiro momento impediram a saída de muitas pessoas cobrando delas as comandas pagas. Eles não reconheceram o início do incêndio por si e também não possuíam nenhum meio de comunicação com outros seguranças próximos ao palco. Rio Grande do Sul (2013, p. 118) analisa o fato de civis terem atuado no resgate sem ter conhecimento técnico e meios seguros para tal:

As duas guarnições de bombeiros que primeiro chegaram à Boate Kiss eram compostas por sete bombeiros militares e seis alunos bombeiros. [...] Os bombeiros estimularam, e inclusive forneceram alguns equipamentos para que os civis ingressassem no interior da boate, com a finalidade de resgatar as pessoas que lá encontravam. [...] Além de não conter os civis, houve até estímulo e fornecimento de equipamentos, sendo que os bombeiros inclusive jogaram água com a mangueira nos populares, para que estes pudessem entrar e resgatar vítimas. Com efeito a solicitação de apoio aos populares, em que pese tenha proporcionado o salvamento de inúmeras vítimas, redundou na morte de civis. [...] Em decorrência dessas atitudes dos bombeiros, ao menos 05 pessoas morreram porque entraram no interior da Boate KISS desprovidos de equipamentos de proteção individual adequados, no intuito de salvar amigos, familiares, namorados.

Sob o aspecto da evacuação de público, CREA-RS (2013, p. 3) em seu Anexo I evidencia que as saídas de emergência não estavam posicionadas de forma segura:

A boate Kiss apresentava somente uma saída de emergência, que era a mesma de acesso a ela. Era formada por duas portas com vão de luz de 1,75m de largura e outra com 1,6m a outra, almofadadas internamente com espuma e couro sintético, e entre elas uma divisória central fixa de 1,0m. Como eram dois vãos de luz, frontalmente à boate eram colocados guarda-corpos metálicos para formar bretes ordenadores de fluxo. Na parte interna havia guarda-corpos metálicos separando espaços e ordenando o fluxo dos ocupantes.

A presença de guarda-corpos segundo Rio Grande do Sul (2013, p. 130), principalmente aquele posicionado frontalmente a saída, ocasionou obstrução à passagem de pessoas em fuga:

Estes guarda-corpos, tanto interna como externamente, foram elementos de obstrução à saída das pessoas na ocasião da desocupação, principalmente os frontais às portas de saída, cuja passagem era menor que a largura das duas portas. As paredes laterais e de fundo da boate ficavam

justapostas às paredes dos prédios vizinhos, não havendo janelas ou outras saídas disponíveis. O prédio era totalmente fechado em todo o seu perímetro, inclusive na fachada, com exceção das referidas portas frontais justapostas de acesso e saída.

Em entrevista a Revista Emergência nº 47 (GEZGER, 2013), O Tenente Lenine de Macedo Maia, Comandante da 2ª Seção de Busca e Salvamento do 4º Comando Regional de Bombeiros (Santa Maria), relatou um detalhe sobre o resgate das vítimas. Segundo ele, no interior da boate Kiss incendiada, os bombeiros, deitados, buscavam enxergar através da fumaça menos densa. Avistavam o movimento das mãos das vítimas, tentavam puxá-las mas os corpos não vinham. Depois que a fumaça saiu, avistou-se a pilha de corpos.

### **2.1.2 República Cromagnon, Buenos Aires, Argentina, 2004**

Quase oito anos antes do incêndio da Boate Kiss, 193 pessoas perderam suas vidas na casa noturna República Cromagnon em decorrência de incêndio iniciado por artefatos pirotécnicos. Outras 1524 pessoas tiveram algum tipo de lesão. A descrição a seguir é baseada na revisão da sentença judicial sobre o caso descrito (ARGENTINA, Buenos Aires, 2009).

Segundo Argentina (Buenos Aires, 2009, p. 9), às 22h50 do dia 30 de dezembro de 2004 subiu ao palco o grupo Callejeros. Não era a primeira banda a se apresentar nesta boate da capital da Argentina naquela noite e nem foram os primeiros a alertar o público sobre o risco inerente ao uso de artefatos pirotécnicos por parte da plateia. Mesmo com o alerta, os artefatos continuaram acesos e logo após iniciada a primeira canção, uma faísca originou o foco de incêndio no teto que se propagou rapidamente gerando fumaça espessa e tóxica (ácido cianídrico). Em consequência do fogo, a espuma de poliuretano que recobria o teto derreteu e gotejou em alguns setores do local, ocasionando lesões ao público e novos focos de incêndio.

O grupo parou a apresentação e as pessoas começaram a sair. A maioria das portas de acesso ao local se encontravam fechadas bem como a saída de emergência. Instantes após o início do incêndio, a luz foi cortada, provocando pânico e desespero nos presentes. Para piorar, o painel luminoso sobre a saída de emergência se acendeu, indicando aos presentes uma saída fechada como a rota de fuga a ser seguida. Muitos desmaiaram e caíram ao solo, impedindo a saída de outros. Próximos as saídas, formaram-se pilhas humanas. Aqueles que encontravam-se no primeiro piso, mais distantes das saídas, sequer conseguiram alcançá-las, e foram retirados inconscientes ou já sem vida. (ARGENTINA, Buenos Aires, 2009)

### 2.1.3 Boate Station, Rhode Island, EUA, 2003

O uso de artefatos pirotécnicos por uma banda que se apresentava na boate Station (Rhode Island, EUA), na noite de 20 de fevereiro de 2003, quase 10 anos antes da tragédia na boate Kiss, acabou resultando em um incêndio que culminou na morte de 100 pessoas. Segundo descrito em Grosshandler et al. (2005a, p. iii), as faíscas acidentalmente atingiram o isolamento acústico de poliuretano nas paredes e teto. O fogo se propagou rapidamente pelo teto sobre a pista de dança. Em menos de um minuto a fumaça era visível através da porta e em cinco minutos chamas irromperam acima do telhado. A evacuação foi dificultada pela aglomeração na saída principal do prédio. Perderam a vida 100 pessoas.

Baseada nos vídeos e depoimentos de sobreviventes, Grosshandler et al. (2005a, p. 6-9, tradução nossa) chegou as seguintes conclusões relacionadas à evacuação,

Muitas pessoas podem ter acreditado que o foco inicial fazia parte do show ou tentaram manter suas posições na multidão até o fim da apresentação. Outros fatores que podem ter atrasado o início da evacuação foi a falta de alerta por parte da organização da casa ou a sensação errônea de que o fogo seria controlado;<sup>1</sup>

Grosshandler et al. (2005a, p. 6-10) descreve que boa parte dos ocupantes não sabia da existência de saídas alternativas a principal e aqueles que utilizaram a saída lateral afirmam que despencaram alguns degraus após passarem pela porta. Saíram pelas janelas 79 pessoas, muitas das quais assistidas por indivíduos que estavam na parte de fora da boate.

Grosshandler et al. (2005a, p. 6-10, tradução nossa) conclui a respeito da inexistência nos vídeos de comprovação de pânico no processo de evacuação,

É aparente no vídeo que a saída se tornou intrespassável; a câmera observa chamas significantes na área da porta quando o operador se direciona, pela primeira vez, para a lateral da edificação, em torno de 85 s após o início do incêndio. Portanto, é provável que fumaça e chamas tenham bloqueado a saída dentro deste intervalo. Após quatro minutos e meio do início, fumaça densa e chamas puderam ser vistas ao nível do solo, na entrada do patamar de saída. Muitos sobrevivente descreveram a evacuação como pânico, ou como uma fuga em debandada; todavia, nenhuma evidência de pânico foi capturada nas filmagens. <sup>2</sup>

<sup>1</sup>[...] people initially believed that it was "part of the show" or wished to maintain their locations within the crowd for the rest of the show. This may also have occurred because the occupants were apparently not instructed by the club's staff to begin evacuation. People appear to have initially felt that the fire would be controlled [...]

<sup>2</sup>It is apparent from the WPRI video that this exit rapidly became impassable; the camera observed significant flames in the area of this door when the camera operator first made his way to the side of the building at 1 minute 25 seconds after the start of the fire. Thus, it is likely that smoke and flames blocked this exit within 1 minute 25 seconds of the start of the fire. At 4 minutes 30 seconds

O uso do termo pânico para descrever o comportamento humano em tragédias como esta acima descrita é polêmico nos meios acadêmicos. Essa discussão está reservada à Seção 2.3.1.

#### **2.1.4 Boate E2, Chicago, EUA, 2003**

Na manhã de 17 de fevereiro de 2003, 21 pessoas morreram e 57 pessoas ficaram feridas no danceteria E2 em Chicago. Segundo Grosshandler et al. (2005a, p. 30), duas mulheres iniciaram uma briga na pista de dança e logo um grupo maior estava envolvido. Seguranças borrifaram spray de pimenta na multidão o que ocasionou a disparada do público em direção a saída. Como a danceteria ficava no segundo pavimento, pessoas foram pressionadas escada abaixo pela multidão às suas costas. A maior parte das mortes ocorreu no topo da escada por esmagamento.

#### **2.1.5 Dance Hall, Gotenburgo, Suécia, 1998**

Provavelmente, estes casos envolvendo casas noturnas com saídas de emergência inapropriadas poderiam ter sido evitados, ou ao menos amenizados, se o exemplo da Dance Hall em Gotenburgo tivesse resultado em aprendizado. Conforme Grosshandler et al. (2005a, p. 32), na noite de 28 outubro de 1998 um incêndio mortal assolou a Dance Hall em uma festa de Halloween com aproximadamente 400 pessoas. Segundo testemunhas, as pessoas estavam ombro a ombro. A danceteria, localizada no segundo andar da edificação, era dotada de duas saídas opostas cuja abertura era 0,80 m. Pouco antes da meia-noite, fumaça de um incêndio entrou no andar da danceteria por uma das portas. Logo as luminárias da discoteca começaram a tilintar e então a cair ao solo devido a exposição ao calor. O *DJ* ligou para os bombeiros e ao perceber que não seria capaz de escapar pela única saída disponível, que ficava após toda a multidão, quebrou uma janela e saltou de uma altura de 6 m.

Foram muitos os que o seguiram. Chegando ao local, os bombeiros não puderam colocar uma escada para evacuar as pessoas pela janela dada a grande quantidade de feridos no chão. Decidiram adentrar a edificação por sua entrada principal deparando-se com um emaranhado de pessoas presas entre si na escada. Após arrastadas essas vítimas para fora da edificação os bombeiros subiram a escadaria deparando-se agora com uma pilha humana compacta na saída da danceteria. Os corpos eram removidos da porta e passados escada abaixo até a saída. Enquanto os corpos eram removidos pessoas de dentro da danceteria escalavam a pilha e ocupavam os espaços recém abertos. Neste ínterim, foi

---

after the start of the fire, dense smoke and flames could be seen down to the floor level just inside of the platform exit. Multiple survivors described the evacuation as "panicked" or likened it to a "stampede"; however, no evidence of panic was captured on the video.

possível posicionar escadas em algumas das janelas disponíveis e iniciou-se a evacuação de sobreviventes diretamente do segundo andar. Foram encontradas 20 pessoas mortas em uma sala próxima a esta saída, provavelmente por buscarem refúgio ao não conseguirem escapar. A maioria das 63 mortes ocorreu por intoxicação pela fumaça. Outras 180 pessoas ficaram feridas e em torno de 50 resgatadas pelos bombeiros através das escadas colocadas nas janelas.

### 2.1.6 Stardust, Irlanda, 1981

A danceteria Stardust localizava-se no segundo andar de um antigo prédio industrial, em Dublin. Nas palavras de Fahy, Proulx e Aiman (2009, p. 7, tradução nossa),

A edificação de dois andares tinha janelas apenas em sua fachada, todas protegidas por barras anti-furto. Havia seis saídas no edifício, incluindo a entrada principal. Antes do incêndio, duas destas saídas encontravam-se trancadas. Em torno de 800 pessoas estavam na Stardust no momento do incêndio. O foco inicial, quando observado pela primeira vez, envolvia assentos em um recanto fechado da danceteria, porém o calor pode ser sentido pelas pessoas no salão em poucos minutos.<sup>3</sup>

Grosshandler et al. (2005b, p. C-32, tradução nossa) detalha os motivos que levaram a rápida propagação do incêndio,

O fogo espalhou-se rapidamente através dos assentos na zona de origem do incêndio e, para o restante da área, devido a presença de uma linha de assentos contendo grandes quantidades de material combustível e encostados em uma parede forrada com carpete.<sup>4</sup>

Fahy, Proulx e Aiman (2009, p. 7) afirma que os funcionários tentaram extinguir o incêndio mas este se espalhou rapidamente pelos assentos. No momento em que os funcionários abandonaram a tentativa de extinguir as chamas, o teto falso, sobre os assentos e em algumas áreas onde as pessoas dançavam, colapsou, espalhando fumaça e chamas pelo salão. O *DJ* anunciou o incêndio como um pequeno problema e disse às pessoas para não entrarem em pânico e moverem-se para as saídas. De acordo com os relatos da investigação pós-incêndio um grande número de pessoas iniciaram a retirada do salão, enquanto alguns permaneceram assistindo o incêndio e outros continuaram dançando. Na

<sup>3</sup>This fire occurred in a disco located in a former factory building. The two-story building had windows only at the front, and those were covered with security bars. There were six exits in the building, including the main entrance. Two of the exits were locked before the fire. Eight hundred people were estimated to be in the building at the time of the fire. The fire, when first observed, involved seats in a closed-off alcove area of the club, although an increase in heat had been felt by patrons in the ballroom some minutes earlier.

<sup>4</sup>The fire spread rapidly from seat to seat in the area of origin and ultimately through the entire area due to the presence of a tier of seats containing quantities of combustible material abutting a wall lined with combustible carpet tiles [...].

sequência, o forro colapsou e as pessoas dispararam em fuga. A saída principal rapidamente tornou-se congestionada e a iluminação desligou. No fim, 48 pessoas morreram e mais de 200 sofreram algum tipo de lesão.

Segundo Grosshandler et al. (2005b), as investigações concluíram que o incêndio foi causado por um incendiário que cortou assentos e os inflamou com jornais em chamas. Este autor afirma que a capacidade das saídas de emergência estava adequada e que a principal causa das mortes foi a rápida propagação do incêndio.

### **2.1.7 Show do The Who, Cincinnati, EUA, 1979**

Retornando duas décadas na linha do tempo, chegamos ao show do The Who, em Cincinnati, onde em torno de 8 mil fãs chegaram cedo ao Coliseum para conseguirem os melhores lugares. Apenas duas das 16 portas disponíveis foram abertas. Os guardas deixariam entrar o número suficiente para encher o lobby e então fechariam temporariamente as portas. A lentidão na entrada fez com que a multidão pressionasse para entrar. Próximo a uma das entradas muitos caíram, as pessoas logo atrás foram empurrados pela multidão por sobre aqueles no chão. Onze pessoas foram pisoteadas até a morte e outras 200 se machucaram no incidente. Esta tragédia, também transcrita de Grosshandler et al. (2005a, p. 26), mostra que os incidentes relacionados com movimento de multidão e restrições impostas por portas não se achem a ambientes fechados e a fluxos de saída.

### **2.1.8 Italian Hall, Calumet, EUA, 1913**

Para ilustrar quão antigo é o problema relacionado ao dimensionamento de saídas de emergência, retorna-se aproximadamente um século até a noite de Natal do ano de 1913, onde mineiros em greve e suas famílias se reuniram para a ceia de Natal no segundo andar do Italian Hall, em Calumet. Segundo Grosshandler et al. (2005a, p. 13), o único acesso ao local era por meio de uma escadaria. O incidente ocorreu, quando mais de 400 pessoas estavam no local e alguém gritou “fogo!” “fogo!”; era um alarme falso. As pessoas correram em pânico para as escadas. Dos 73 que morreram pisoteados, 59 eram crianças.

### **2.1.9 Síntese**

Foram listadas acima algumas tragédias que tem em comum a combinação fatal de superconcentração de pessoas, edificações inseguras e procedimentos falhos. Os incêndios nas casas noturnas Kiss, Cromagnon, Station, Gotenburg e Stardust criaram

ambientes inóspitos aos ocupantes em poucos minutos, tornando a evacuação urgente condição necessária à sobrevivência. A ameaça preponderante nestes casos foi a fumaça.

Outros fatores também podem tornar a multidão nociva à seus próprios integrantes. Na boate E2, de uma briga entre duas mulheres e a reação inapropriada dos seguranças (uso de spray de pimenta) ocasionou a disparada das pessoas rumo a saída. No Italian Hall, bastou alguém bradar "fogo!" dentro do salão. Nem mesmo um ambiente fechado é condição básica. No caso da entrada no Show do The Who, foi a relação inadequada entre a grande quantidade de público pressionando para entrar e o pequeno número de aberturas disponíveis para a entrada das pessoas que ocasionou tantas mortes por esmagamento.

Em todos os casos descritos, o elemento comum foi a superlotação. Independente do motivo que as façam querer passar por um vão ao mesmo tempo, as pessoas irão obstruir-se se a densidade populacional chegar a tal ponto que a pressão dos de trás evitar que os da frente se movam, simplesmente por terem seus membros presos uns aos outros. A próxima seção traz um estudo das normas relacionadas a saída de emergência e discute a capacidade destas em evitar a formação do fenômeno de obstrução nas saídas de emergência.

## 2.2 NORMATIZAÇÃO EM SAÍDAS DE EMERGÊNCIA

Em entrevista a Gezger (2013), José Carlos Tomina, superintendente do CB 24<sup>5</sup> da ABNT, afirma que:

Existem 64 normas brasileiras na ABNT relacionadas à segurança contra incêndio. São 27 regulamentações estaduais. Se for cumprido o que está escrito, se for para a prática o que está no papel, lá (boate Kiss) não teria acontecido e teríamos edificações melhores do que temos.

Dentre essas normas nacionais, tem-se a NBR 9077:1993, que trata das saídas de emergência em edifícios. Esta legislação, base para boa parte das normas estaduais utilizadas pelos Corpos de Bombeiros, define as saída de emergência em ABNT (1993, p. 4) como:

caminho contínuo, devidamente protegido, proporcionado por portas, corredores, *halls*, passagens externas, balcões, vestíbulos, escadas, rampas ou outros dispositivos ou combinação destes, a ser percorrido pelo usuário, em um incêndio, até atingir a via pública ou espaço aberto, protegido do incêndio, em comunicação com o logradouro.

A definição acima é uma descrição geral do sistema de saída de emergência e como tal, varia pouco de norma para norma. A forma como isto é feito é que está

---

<sup>5</sup>Comitê de Segurança Contra Incêndio.

sempre em evolução. Retornando ao trecho da declaração de Tomina no início desta seção: "[...] Se for cumprido o que está escrito [...]". Tal afirmação leva a crer que as legislações vigentes são condições necessárias e suficientes, bastando aplicá-las. Entretanto, a história nos mostra que mesmo a existência de regras não evita tragédias, aliás, a ocorrência destas é que molda novas regras. O Quadro 1 traz um histórico da evolução das normas relacionadas às saídas de emergência em nível mundial, baseado na revisão bibliográfica apresentada em Valentin e Ono (2006, p. 2).

Quadro 1: Histórico da normatização de saídas de emergência no mundo.

Ano	Evento	Resultado
1909	Projeto para construção do Terminal Hudson, Nova York.	Estudo sobre a capacidade de medir a velocidade de pedestres.
1913	Tragédias na Rhoades e Theatre Iroquois (1903), Lakeview (1908) e Tringle Shirtwaist (1911).	Criação do Comitê para Proteção a Vidas (Committee on Safety to Life) da NFPA.
1927	Estudos conduzidos durante o período de 1917-1927 nos EUA.	A primeira edição do " <i>Building Exits Code</i> " da NFPA.
1935	Estudos sobre evacuação em estações de trem e metrô, teatros, lojas de departamento e escritórios do governo Federal.	"Projeto e construção de saídas de edifícios" editado pelo <i>National Bureau of Standards</i> (atual NIST).
Anos 40	Incêndio nas danceterias Rhythm Club (1940) e Cocoanut Grove (1942) e nos hotéis La Salle e Wincoff Hotel (1946).	Exigência de saídas adequadas para edifícios com grande concentração de público e hotéis. Estes incêndios provocaram as maiores mudanças no " <i>Building Exits Code</i> ", posteriormente denominado " <i>Life Safety Code</i> ".
1967	Incêndio no veículo espacial Apollo 1 e no Restaurante Dale's Penthouse.	Incêndios de grande repercussão que aceleraram as mudanças na engenharia de proteção contra incêndio nos EUA.
1973	Presidente Johnson estabelece a Comissão Nacional para Prevenção e Controle de Incêndio.	Criação do relatório denominado " <i>America Burning</i> ".
1974	Centro para Pesquisa em Incêndio do "National Bureau of Standards" do Departamento de Comércio.	Centro ganha prestígio e torna-se vitalício.
Anos 70-80	Universidade de Surrey, Reino Unido e " <i>National Bureau of Standards</i> ", EUA.	Pesquisa sobre o comportamento humano em situação de incêndio.
1993	Atentado à bomba no World Trade Center	Uma das poucas fontes de estudo da evacuação de pessoas com deficiência física.

Fonte: baseado nas informações de Valentin e Ono (2006, p. 2)

Da evolução apresentada no Quadro 1, chegou-se a norma americana atual, a NFPA 101<sup>6</sup> (NFPA, 2000), que lista como os requisitos das saídas de emergência que garantem a segurança dos ocupantes de um edifício:

- a) número suficiente de saídas de emergência, que deverão estar devidamente sinalizadas e desobstruídas;
- b) proteção das saídas de emergência contra o fogo, calor e fumaça durante o tempo de evacuação determinado pelo tipo de ocupação do edifício;
- c) providenciar saídas de evacuação alternativas;
- d) compartimentação das áreas através de construções apropriadas para assegurar áreas de refugio nas ocupações, onde a evacuação total, não é uma consideração primária;
- e) existência de sistemas de alarme para os ocupantes e notificação do Corpo de Bombeiros em caso de incêndio;
- f) iluminação das saídas de emergência;
- g) indicação dos caminhos de evacuação;
- h) proteção de equipamentos ou áreas de perigo, que possuam risco de produzir incêndio capaz de colocar em risco a evacuação dos ocupantes;
- i) desenvolver, organizar e praticar, simulados de evacuação;
- j) instruir via sistemas de alarme verbais em edifícios com grande densidade ocupacional e com elevados riscos, de modo a evitar o pânico;
- k) preterir o uso de materiais de acabamento nos interiores com uma elevada taxa de inflamabilidade ou produção de fumaça, que podem colocar em risco a evacuação dos ocupantes.

Analisando os requisitos acima pode-se inferir que quanto maior o número de saídas e a distância entre elas, melhor é a distribuição dos indivíduos no ambiente, menor o contato físico e, portanto, menor o tempo de evacuação das pessoas. Alarmes diminuem o tempo entre o início do incêndio e a percepção da necessidade de fuga. Iluminação e sinalização permitem rápida identificação da rota de fuga. Proteger as saídas contra chamas e fumaça aumenta o tempo disponível para a evacuação. O controle dos materiais de acabamento evita a formação de fumaça tóxica, que envenena e mata mais rapidamente os indivíduos. A prática de simulados de evacuação traz uma experiência prévia aos ocupantes da edificação, ensinando-os o que fazer em caso de emergência.

É neste ponto que a peculiaridade dos locais de reunião de público traz um problema. É inviável, talvez impossível realizar um simulado de evacuação para o público

---

<sup>6</sup>*Life Safety Code.*

de uma casa noturna. Se realizado em um fim de semana, não teria o mesmo efeito para o próximo, pois o público mudou no todo ou em grande parte. Quando um sinistro ocorrer, muitas pessoas não terão a experiência de quais procedimentos seguir para evadir o local. Neste momento, pode preponderar a relação entre lotação e a abertura das saídas disponíveis, que caso corretamente dimensionadas, facilitará o escoamento das pessoas para fora da edificação. A seguir é feito um estudo focado no cálculo das aberturas das saídas de emergência exigidas pela legislação vigente no Estado de Santa Catarina.

### 2.2.1 Legislação Catarinense

Santa Catarina, até a data deste trabalho, com relação aos sistemas de saída de emergência, segue o que está previsto no capítulo VIII s NSCI<sup>7</sup> de Santa Catarina (1992).

O Art. 208 da NSCI, Santa Catarina (1992, p. 43), define os requisitos que as passagens e corredores devem possuir,

Art. 208 - As passagens e corredores deverão atender aos seguintes requisitos:

- I. permitir o escoamento fácil de todos os ocupantes do pavimento;
- II. permanecer desobstruídas em todos os pavimentos;
- III. a largura das passagens e dos corredores será medida na menor parte livre;

A largura das passagens e corredores é equivalente ao cálculo dos acessos, descrito no Art. 204, inciso VI da NSCI, Santa Catarina (1992, p. 42),

Art. 204 - Os acessos por balcões e terraços, para ingresso em escadas, atenderão às seguintes condições:

[...]

VI - ter largura proporcional ao número de pessoas que por eles transitarem, determinadas em função da natureza das ocupações das edificações, conforme estabelecido na Tabela do Anexo F, dimensionada pela fórmula:

$$N = \frac{P}{Ca}, \quad (1)$$

onde N é o número de unidades de passagem, P é o número máximo de pessoas (lotação) e Ca é a capacidade de acesso. A tabela que define o valor de Ca para diversos tipos de edificações, Anexo "F" da NSCI (SANTA CATARINA, 1992), é reproduzida no Anexo A. Por ela, os locais de reunião de público (restaurantes, bares e boates), admitem densidade máxima de uma pessoa por unidade de área (1 p/m<sup>2</sup>) e a capacidade de acesso Ca das portas de saída é igual a 100. Isso significa que em cada unidade de passagem, 100 pessoas deverão ser capazes de passar através da saída por minuto. O Art. 203 da NSCI, Santa Catarina (1992, p. 42), fixa o tamanho da unidade de passagem,

<sup>7</sup>Norma de Segurança Contra Incêndio do Estado de Santa Catarina - Decreto Estadual nº 4.909 de 18/10/94 - Diário Oficial nº 15.042 de 19/10/94.

Art. 203 - Para efeito desta norma a unidade de passagem será fixada em 0,55 m.

Seguindo a NSCI, uma saída de um local de reunião de público que possuir 1,65 m de largura, conterà 3 unidades de passagem, e portanto, será capaz de evacuar 300 pessoas em segurança a cada minuto.

A largura das saídas de emergência atenderá os seguintes requisitos conforme a NSCI, Santa Catarina (1992, p. 43),

Art. 210 - A largura das saídas de emergência deverá atender aos seguintes requisitos:

I - ser proporcional ao número de pessoas que por elas transitarem; II - ser determinada em função da natureza da ocupação da edificação; III - ter no mínimo 1,20 m; IV - ser acrescida de uma unidade de passagem para cada conjunto de pessoas, conforme anexo F.

O inciso XI do Art. 23 da NSCI, Santa Catarina (1992, p. 13), que versa especificamente sobre exigências para locais de reunião de público como boates e salões, exige,

[...] no mínimo, uma porta de entrada e outra de saída do recinto, situados em pontos distantes, de modo a não haver sobreposição de fluxo, com larguras mínimas de 2 m. [...];

#### 2.2.1.1 Poder de Polícia no CBMSC

A Lei que instituiu o Poder de Polícia no Corpo de Bombeiros Militar de Santa Catarina, revogou o decreto da NSCI a contar de 28 de junho de 2014, traz alguns avanços relacionados às saídas de emergência. Dentre estes, destacam-se o parágrafo 2º do Art 4º que trata das exigências para o Projeto Preventivo Contra Incêndio (PPCI), Santa Catarina (2013, p. 2):

Art 4º § 2º O PPCI ou PRE deve prever, de acordo com o tipo do imóvel e os respectivos riscos e ocupações, os seguintes dispositivos ou sistemas:

[...]

IV - de escape e realocação de pessoas e de bens do local de risco para uma área segura;

[...]

IX - de proteção, tranquilidade e salubridade públicas em eventos de reunião de público;

X - planta de emergência;

XI - informatizado de controle e registro do público;

[...]

Os incisos IV e IX tratam genericamente das rotas de fuga e saídas de emergência em locais estratégicos para facilitar o reconhecimento do local, suas rotas de fuga e saídas de emergência.

O mesmo Art. 4º de Santa Catarina (2013, p. 2), agora em seu parágrafo 4º: "É proibida a realização de show pirotécnico em ambientes fechados". Tal proibição é resultado direto da tragédia da Boate Kiss (Seção 2.1.1), reafirmando o fato de que as normas tem saltos evolutivos após tragédias que trazem grande comoção social.

### 2.2.2 Síntese

A História mostra que as normas evoluem muito após experiências trágicas. De tempos em tempos exige-se uma abertura maior, reduz-se a lotação máxima. Outrossim, o excesso de exigências acarreta prejuízos à indústria da construção, para qual cada metro quadrado a mais investido em segurança na área comum é um a menos a ser negociado como área privativa de seus clientes.

Raros são os estudos científicos, seja por meio de experimentos controlados ou por simulações, que resultam em números otimizados, seguros porém não exagerados. No caso específico do projeto de saídas de emergência considera-se a evacuação de pessoas análoga ao deslocamento de fluidos. Tal correlação se perde em elevadas densidades populacionais nas saídas, restando úteis apenas em condições de normalidade, em baixa densidade populacional e sem pânico instaurado.

## 2.3 A EVACUAÇÃO DE EMERGÊNCIA

Segundo Saboia (2010, p. 4), a movimentação da multidão,

compreende várias pessoas se deslocando em um ambiente compartilhado, almejando dirigir-se para destinos específico. É resultante de uma complexa inter-relação entre fatores próprios de cada indivíduo (personalidade, motivação e percepção) e os fatores externos a eles, que são coexistentes na interação de elementos do ambiente com o indivíduo (estrutura física onde ocorre a movimentação)

Baseado na definição acima, esta monografia estuda a evacuação de emergência multidão sob duas óticas: fatores comportamentais (Seção 2.3.1) e a dinâmica de multidões (Seção 2.3.2).

### 2.3.1 Comportamento humano

O comportamento humano relacionado ao uso das saídas de emergência é condicionado por três fatores principais. Primeiro o fisiológico, refere-se às condições

de mobilidade e saúde que gozam os indivíduos. Segundo tem-se os fatores psicológicos, relacionados à ansiedade ou calma, medo ou coragem e existência ou não de pânico apresentados por cada indivíduo. Por fim, tem-se os fatores sociológicos, decorrentes da identidade social formada pelo grupo no momento da tragédia.

Um estudo da *Flanery Associates* descrito em Silva (2007, p. 10), identifica os fatores fisiológicos que mais interferem nas reações dos indivíduos ao calor e à fumaça produzidos nos incêndios:

- a) **idade em seus extremos** - os mais novos e os mais velhos tem menos resistência aos efeitos do fogo;
- b) **tamanho** - pessoas mais fortes podem tolerar melhor as doses de substâncias tóxicas geradas durante um incêndio;
- c) **condição física pré-existente** - a forma geral do indivíduo vai ter efeitos na sua capacidade de sobrevivência durante um incêndio. Isto inclui a sua condição cardíaca, respiratória e sua mobilidade (peso, flexibilidade, doenças músculo-esqueléticas).
- d) **capacidades respiratórias** - qualquer doença crônica como a asma vai reduzir a capacidade respiratória. Condições agudas tais como gripe e pneumonias vão também ter efeitos na sua capacidade. Os fumantes têm uma concentração relativamente elevada de monóxido de carbono no sangue e nas vias respiratórias, o que lhes vai reduzir a capacidade para receber oxigênio;
- e) **medicações, drogas, álcool** - podem reduzir a capacidade de reconhecer uma situação perigosa e reagir perante ela.

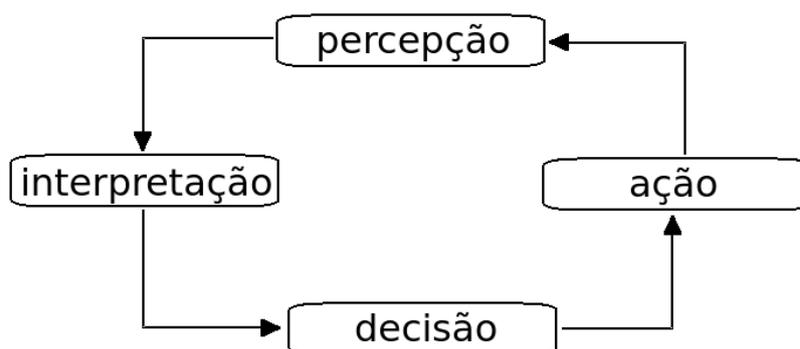
Os fatores psicológicos estão intimamente ligados a personalidade dos indivíduos conforme descreve Silva (2007, p. 11):

A personalidade de um indivíduo poderá ter impacto na forma em como ele reage perante uma situação de emergência, uma vez que, enquanto uns tentarão combater o fogo, outros mover-se-ão imediatamente para um local mais seguro. A título de exemplo, estudos têm mostrado que os homens têm mais a iniciativa para combater o fogo, enquanto que as mulheres têm normalmente como primeira iniciativa o abandono do edifício.

Conforme ampla revisão bibliográfica apresentada em Kuligowski (2009), os processos comportamentais relacionados às pessoas envolvidas em incêndios são divididos em quatro etapas conforme apresenta a Figura 1.

A primeira fase é a percepção dos sinais físicos (chama, calor, fumaça ou fuligem) e sinais sociais como ouvir discussões, não perceber reação de outras pessoas ou

Figura 1: Processo comportamental em incêndios.



Fonte: adaptado de Kuligowski (2009, p. 6)

receber contato de fora da edificação. Desencontro de informações, corrida contra o relógio, memórias ou pensamentos sobre eventos anteriores também surgem nesta fase. Na fase da interpretação, a segunda, as percepções obtidas anteriormente são interpretadas e a situação e o risco para si e demais ocupantes são definidos. Baseados nas interpretações da situação e do risco envolvido, desenvolve-se a terceira fase, a tomada de decisão. As ações dos ocupantes ocorrem na fase quatro, onde ocorre a materialização das decisões tomadas na fase anterior. O processo reinicia com a percepção de novos sinais físicos ou sociais.

Segundo Costa (2009, p. 10), preponderam os seguintes aspectos do comportamento humano durante a evacuação de edifícios sob incêndio: reentrada, formação de grupos e pânico. A reentrada aumenta a densidade populacional da área em evacuação e diminui a velocidade com que as pessoas saem, aumentando os fatores de risco para pânico. Pode causar confusão mental quanto a escolha correta da saída, pois ao entrar em sentido oposto, o reentrante pode atrair a atenção de pessoas em fuga para a sua rota, levando-as a segui-lo. A formação de grupos de evacuação, onde familiares e amigos tenderam a permanecer próximos, acarretando um maior tempo de evacuação. O pânico é materializado em primeira análise no "congelamento" das pessoas que ficam paralisadas perdendo a capacidade de tomada de decisão. Outro comportamento característico é o "estouro de boiada", onde as outras pessoas saem em disparada inconsciente ao ver uma pessoa ou um grupo saindo em determinada direção.

Conforme Silva (2007, p. 11), a percepção da ameaça é outro fator importante, pois antes de se retirar, o indivíduo procura confirmar se a ameaça à sua segurança é real. A não ser que tenha indicações óbvias, tais como fumaça ou chamas visíveis, ele não tomará ações imediatas de resposta perante um alarme de incêndio. Entretanto, por mais que as indicações óbvias não se evidenciem, se um dos indivíduos entrar em pânico, aqueles que o rodeiam tendem a ficar mais agitados e, em casos extremos, a entrar em tal estado.

Várias definições para o conceito de pânico tem sido sugeridas ao longo do

tempo. O Quadro 2 compila conceitos relacionados pânico.

Quadro 2: Evolução do conceito de pânico.

<b>Autor</b>	<b>Definição de pânico</b>
Le Bon (1897)	Conceito original de pânico parece ter origem na definição de "multidão psicológica" criada por este autor: grupo de pessoas onde os indivíduos perderam sua personalidade para dividir as mesmas motivações e pensamentos da multidão, que é inferior às mentalidades individuais.
Quarantelli (1957)	uma reação de medo aguda marcada pelo comportamento de fuga irracional
Keating (1982)	Elementos do pânico: a) esperança de escapar em condições de recursos escassos; b) comportamento contagioso; c) agressividade para garantir a própria segurança; d) resposta ilógica, irracional.
Goldenson (1984)	Reação envolvendo terror, confusão e comportamento irracional precipitado por uma situação ameaçadora.
Johnson (1987)	Comportamento competitivo e egoísta não controlado pelas restrições sociais e culturais ou quebra da ordem social, competição não regulada por forças sociais.

Fonte: Fahy, Proulx e Aiman (2009)

O uso indiscriminado da palavra pânico para explicar situações de emergência e desastres é controverso nos meios acadêmicos como pode ser lido nas palavras de Fahy, Proulx e Aiman (2009, p. 2, tradução nossa):

Apesar das numerosas evidências mostrarem que é muito raro ocorrer pânico em incêndios, este termo continua sendo usado erroneamente tanto pelo público quanto pelos especialistas em incêndios. É necessário desmistificar o conceito errôneo que trata o pânico como um elemento essencial de um incêndio. <sup>8</sup>

Existem outros termos relacionados às emoções que descrevem melhor o que usualmente é tratado como pânico, por exemplo, o medo e a ansiedade. Oltmanns e Emery (1995) define o medo como a emoção que surge ante perigo real e iminente, estabelecendo-se rapidamente, tornando a resposta do indivíduo mais rápida às ameaças do ambiente. Semelhante ao medo, tem-se a ansiedade, que segundo Sternberg (1995) é uma emoção que surge quando a ameaça atual não é claramente percebida ou localizada pelo indivíduo.

A imprensa é uma das maiores responsáveis por perpetuar o mal uso do termo pânico, cunhando este termo como sujeito ativo dos desastres em muitas de suas reportagens e manchetes. Nas palavras de Fahy, Proulx e Aiman (2009, p. 3, tradução nossa):

<sup>8</sup>Despite the numerous evidence that panic is a very rare occurrence in fires, the idea of panic and the term continue to be used by the public as well as fire experts. It is necessary to demystify the misconception that panic is an essential element of a fire and identify any scientific justification for continuing using this concept.

O pânico é tão esperado durante as emergências que jornalistas tem uma lista de perguntas sobre o tema quando entrevista os sobreviventes. Apesar do apelo midiático, as testemunhas relatam mais atos calmos e silenciosos que atitudes semelhantes ao pânico.<sup>9</sup>

Segundo Fahy, Proulx e Aiman (2009), psicólogos e sociólogos costumavam aplicar o conceito de pânico para explicar tragédias e justificar mudanças nas normas e códigos de Segurança Contra Incêndio e Pânico. Nos anos 1970, alguns pesquisadores desafiaram o senso comum, sugerindo que o pânico muitas vezes é mito criado para justificar os resultados das tragédias, cujas causas reais eram edificações com projetos de segurança ineficientes ou ocorrências mal gerenciadas.

### 2.3.1.1 Pânico em massa ou resiliência coletiva?

O pânico em massa é uma espécie diferente de pânico, comportamento sociológico antítese da resiliência coletiva. Segundo Drury (2012), o conceito de **pânico em massa** faz parte tanto do imaginário popular quanto de uma família de teorias acadêmicas. Como explicação para o comportamento em emergências e desastres, o pânico em massa representa a vulnerabilidade dos grupos sociais que possuiriam a tendência inerente de assumirem posturas patológicas e **comportamento mal-adaptativo** quando submetido ao estresse.

As condições necessárias para a ocorrência de pânico são: a existência de perigo que ameaça a vida; a baixa probabilidade de escapar deste; e a presença de multidão. Uma vez instaurado o pânico em massa, suas características, segundo Drury, Novelli e Stott (2013), seriam:

- a) medo desproporcional ao perigo que se apresenta, emoções arrebatando a razão;
- b) instintos primitivos, lutar ou fugir, substituindo valores e regras da sociedade;
- c) perda do controle comportamental e quebra das obrigações sociais, predominando a competição egoísta entre os indivíduos.
- d) falta de coordenação coletiva.

Desta forma, o pânico em massa é um sério problema de saúde pública, sugerindo que a reação humana em situações de emergência, especialmente as coletivas, levam as pessoas a maiores riscos que aqueles dos quais elas buscam escapar.

---

<sup>9</sup>Panic is so much expected during emergencies that journalists have a number of questions about panic when interviewing survivors. Despite the media bias, when listening closely to survivors being interviewed, they seemed to report many more observations of calm and silence than what could be quoted as a "panic response".

Ainda, segundo Drury, Novelli e Stott (2013), pesquisas demonstram que a ligação social, que as teorias de pânico em massa sugerem sumir ante o instinto de sobrevivência de cada indivíduo, são de fato, extremamente duradouras no desenrolar das ocorrências. O modelo social da resiliência coletiva faz uma distinção entre a multidão física (indivíduos locados no mesmo espaço), e a multidão psicológica (pessoas que sentem e agem como uma só). Indivíduos abandonam o sentimento egoísta e passam a ver nos outros companheiros subjugados à mesma realidade. A mudança do eu para o nós significa que o interesse de cada indivíduo se torna o da multidão. A sobrevivência coletiva requer consenso imediato em prol dos objetivos sejam estes, por exemplo, a decisão de evacuar ou não uma edificação e qual a rota a ser seguida). Se as ações coordenadas do grupo são as mesmas intencionadas por todos os seus indivíduos, existe um senso de obrigação moral e motivação que leva as pessoas a quererem atuar no interesse coletivo. Dentro da multidão psicológica, a solidariedade se traduz nas seguintes consequências que contribuem para a sobrevivência do grupo: socorro ao próximo, civilidade rotineira entre os indivíduos e expectativa de ser ajudado se necessário.

Trabalhos como o de Fahy, Proulx e Aiman (2009) vão além ao considerar a corrida em disparada às saídas, em condições extremas com o ambiente tomado por fumaça densa, uma resposta racional do indivíduo, não pânico, pois ele o faz para garantir sua sobrevivência ante a morte iminente.

Em pânico ou não, o “estouro de boiada” em direção a saída ocorrerá quando as pessoas perceberem que estão em risco dentro de uma edificação e que suas vidas dependem de uma saída rápida. Resta aos especialistas em prevenção focar as ações na garantia da segurança destas edificações, provendo-as de saídas de emergências eficientes e proporcionais ao número de pessoas que a edificação costuma comportar.

Do comportamento humano, passamos para o estudo físico da multidão: a dinâmica de movimentação dos indivíduos e os efeitos desta na evacuação de multidões sob elevada densidade populacional.

### 2.3.2 Dinâmica de Multidão

Dinâmica de multidão é definida por Still (2000, p. 1, tradução nossa): “o estudo de como e onde multidões se formam e se movimentam acima da densidade crítica de uma pessoa por metro quadrado”.<sup>10</sup>

Após vasta revisão bibliográfica e investigações empíricas, Helbing, Farkas e Vicsek (2000) lista os eventos extremos que ocorrem durante uma evacuação urgente, logo após a identificação da ameaça e início da saída dos indivíduos:

<sup>10</sup>Crowd dynamics can be defined as the study of the how and where crowds form and move above the critical density of more than one person per square metre.

- a) as pessoas tentam se mover mais rápido do que o normal;
- b) indivíduos começam a pressionar para sair, causando interações físicas com aqueles ao seu redor;
- c) o movimento e a passagem através dos vãos tornam-se descoordenados;
- d) nas saídas, formação de arcos e bloqueios são observados;
- e) congestionamentos se formam;
- f) as pressões tornam-se perigosas;
- g) pessoas machucadas ou caídas agem como obstáculos, retardando ainda mais a saída;
- h) a tendência ao comportamento de massa aumenta, ou seja, o indivíduo busca fazer o que os outros estão fazendo;
- i) saídas alternativas são negligenciadas.

Johnson (apud STEINBERG, 2005, p. 23) descreve outro aspecto da evacuação urgente:

As pessoas no fundo da multidão não conseguem ver o que está acontecendo lá na frente. Num colapso de massa, as pessoas empurram. As pessoas do fundo presumem que existe espaço e saídas suficientes, e se movem pra frente. Isso esmaga as pessoas ainda mais, mas as pessoas do fundo não percebem.

Vários trabalhos dentre os quais Helbing, Farkas e Vicsek (2000) e Still (2000) estudaram a dinâmica de multidão dividindo-a em fenômenos individuais, relacionados a como cada pedestre age isoladamente, ou a fenômenos grupais, que se relacionam a multidão observada como um todo.

#### 2.3.2.1 Fenômenos Individuais

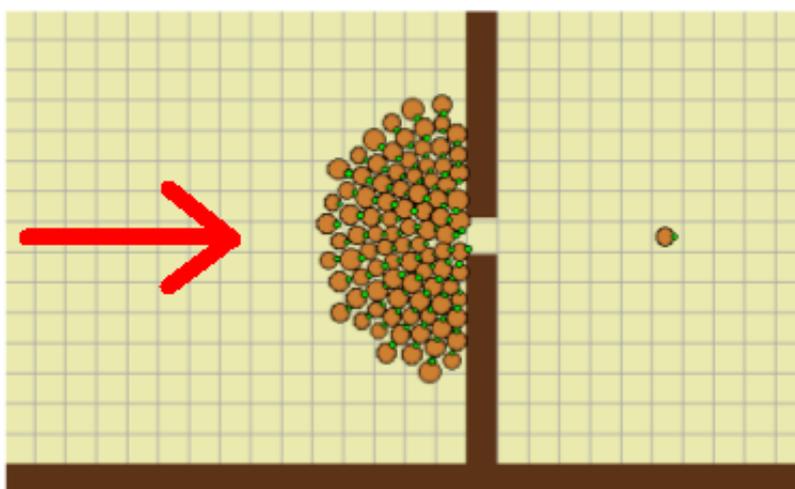
Helbing, Farkas e Vicsek (2000) relata que os pedestres escolhem o caminho mais rápido, não necessariamente o mais curto. Existindo mais de um caminho, o pedestre escolherá aquele que o permita deslocar-se variando o mínimo possível sua velocidade e orientação. Mesmo com o caminho escolhido congestionado, o pedestre terá aversão em mover-se em sentido oposto. Estas características são exploradas pelos autores no modelo matemático que está descrito na Seção 3.2.

### 2.3.2.2 Fenômenos Grupais

Os fenômenos que emergem em uma multidão observada como um todo surgem espontaneamente e unicamente a partir de interações entre subunidades de um sistema. Alguns dos fenômenos descritos na literatura estão sintetizados nos parágrafos a seguir.

**Formação de arcos.** Conforme Helbing, Farkas e Vicsek (2000), durante a evacuação de emergência os pedestres se aglomeram no espaço em torno do acesso de saída. A velocidade é reduzida e a densidade aumenta na região. A distribuição das pessoas em volta da passagem lembra a forma geométrica de um arco, conforme representado na Figura 2, resultado de simulação descrito em Saboia (2010). O arco se sustenta pela pressão que as pessoas atrás exercem sobre quem está na frente, impedindo a saída destes. Eventualmente quando os arcos se quebram, o fluxo de pedestres que deixam o local aumenta, até que um novo arco se forme.

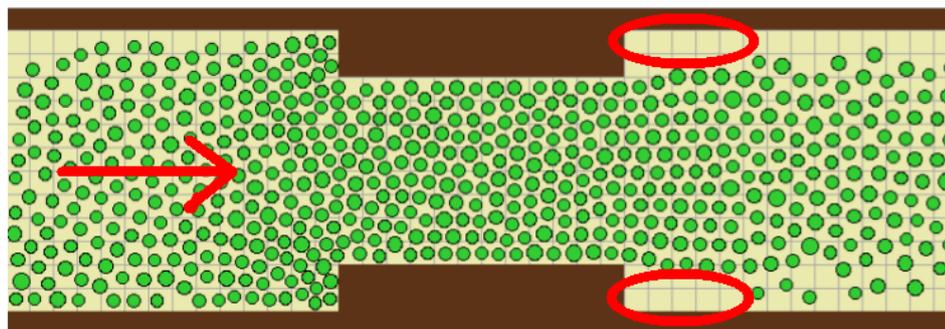
Figura 2: Representação do fenômeno de formação de arcos.



Fonte: Saboia (2010).

**Efeito de gargalo e efeito de canto.** Saboia (2010) relata a existência de afunilamentos no fluxo de pedestres os quais podem levar a dois efeitos. Na aproximação do estreitamento, o fluxo diminui. A consequência é o aumento da densidade de pessoas, configurando o efeito de gargalo. Logo após os afunilamentos, a velocidade da multidão aumenta e a densidade diminui, mas os pedestres continuam percorrendo o espaço como se ainda estivessem na região mais estreita, ou seja, o espaço disponível depois do afunilamento não é completamente preenchido. Conhecido como efeito de canto, este fenômeno representado na Figura 3 mostra como o comportamento da multidão é influenciado pela geometria do ambiente.

Figura 3: Representação do efeito de canto.



Fonte: Saboia (2010).

**Efeito de ondas e efeito de turbulência.** Helbing, Johansson e Al-Abideen (2007) descreve dois outros efeitos decorrentes do aumento da densidade populacional. Quando o fluxo de entrada das pessoas em uma região é maior que o de saída, os indivíduos não conseguem sustentar a pressão que vem de trás e pressionam fortemente as pessoas à frente. O resultado é que a multidão ora se desloca ora pára, em movimentos que lembram ondas. A turbulência ocorre quando a pressão em determinado local na multidão ultrapassa valores críticos, surgem deslocamentos aleatórios e não intencionais em todas as direções possíveis, que empurram as pessoas de um lado para o outro.

### 2.3.3 Síntese

A dinâmica das evacuações de emergência, como visto acima, pode ser subdividida em fatores humanos (relacionados à fisiologia, psicologia e sociologia) e dinâmicos (fenômenos físicos que emergem na multidão no momento que os indivíduos buscam ocupar o mesmo lugar no espaço ao mesmo tempo, sendo este lugar a rota de fuga).

O pânico em massa é menos frequente que o comportamento de resiliência coletiva, ligação social sintetizada na solidariedade entre os indivíduos que buscam um objetivo comum, a salvação do grupo. Em condições extremas, ambientes extremamente quentes e asfixiantes, lutar pela própria sobrevivência não é um comportamento irracional, mas a única opção sensata. Comportamentos humanos extremos raramente são causa de tragédias, são sim consequências de edificações inseguras ou mal gerenciadas. Mesmo com a incoerência de asfixia pela fumaça, as pessoas podem ser pisoteadas ou esmagadas umas às outras ou contra as paredes.

Outros estudiosos já haviam percebido que o problema está mais na estrutura que na multidão. A análise bibliográfica prossegue com o trabalho de outros pesquisadores que estudaram o fenômeno da obstrução das saídas de emergência.

## 2.4 O ESTADO DA ARTE

O movimento das moléculas de um gás usado em analogia ao deslocamento de pessoas em situações de baixa concentração foi objeto de estudo de Henderson (1974). Nesse modelo os ocupantes do edifício têm sua posição e velocidade de deslocamento consideradas independentes daquelas apresentadas por outras pessoas no ambiente.

Acima de uma determinada densidade populacional, passa-se a adotar o modelo hidráulico em analogia ao escoamento da água através de dutos. Este modelo assume as seguintes hipóteses fundamentais segundo Coelho (1997):

- a) todos ocupantes iniciam a evacuação ao mesmo tempo;
- b) pessoas estão na posse das suas capacidades físicas e emocionais;
- c) densidade uniforme;
- d) trajetos pré-definidos;
- e) fluxos unidirecionais.

Conforme descrito em Coelho (1997), o movimento conjunto de pessoas pode ser caracterizado pela sua densidade  $D$ , velocidade  $v$  e fluxo  $J$ . Densidade é o número de pessoas por unidade de área. A velocidade é o espaço percorrido pelas pessoas por unidade de tempo e o fluxo traduz a quantidade de pessoas que atravessa uma determinada seção do caminho por unidade de tempo. Estas grandezas se relacionam juntamente com a largura  $l$  da transição (ou vão) em estudo na equação

$$J = v.D.l, \quad (2)$$

indicando, à primeira vista, que o fluxo aumenta invariavelmente com o aumento da velocidade, densidade e largura do vão por onde as pessoas passam. Todavia a velocidade é dependente da densidade, pois as pessoas se movimentam mais rapidamente quanto maior for o espaçamento entre elas.

Modelos como este, válidos para a saída ordenada de pessoas, são a base para definir a largura de saídas de emergência pela maioria das normas. Nos casos onde a densidade aumenta muito a ponto de dificultar a locomoção das pessoas, encontram-se apenas alguns estudos empíricos, com animais, e vários modelos computacionais dentre os quais um será selecionado para ser descrito e aplicado neste estudo.

### 2.4.1 Experimento com camundongos

Após extensa revisão bibliográfica, não foi encontrado experimento algum que envolvesse o pânico instaurado nas pessoas e a necessidade de saída urgente através de

passagens restritivas, tais quais os vãos de uma saída de emergência. Todavia foram encontrados experimentos com animais. Aproveitando a forte repulsa que camundongos tem à água, Ball (2013) apresenta um experimento onde vários destes animais são colocados em uma câmara inundada, forçando-os a escapar para uma plataforma seca adjacente sob diversas condições de rotas de fuga. Frente a uma abertura estreita, os roedores formaram uma espécie de fila e realizaram uma evacuação ordenada. Portas mais largas fizeram com que os animais ficassem presos uns aos outros, tornando a rota de saída esporádica e ineficiente. A saída também tornou-se errática quando foram colocadas diversas portas e a multidão ao redor de uma saída obstruiu as portas próximas. Ball (2013, p. 2, tradução nossa) relaciona o comportamento dos roedores ao humano,

Igual ao homem, o camundongo em pânico diante ameaças à sua vida buscará a fuga mesmo que seja necessário passar por cima dos outros. Ainda mais, como o ser humano em pânico, o camundongo tende a seguir outros invés de buscar a melhor rota de fuga disponível.<sup>11</sup>

Sem se ater ao uso da palavra pânico, extrai-se da citação acima o instinto animal, o qual possivelmente se aplica aos seres humanos em situação similar, e que leva os camundongos a ter dois comportamentos: pressionar ou, se necessários, passar por cima de outros animais em seu caminho; e seguir a rota escolhida pela maioria de seus vizinhos invés de buscar analisar a situação por si, negligenciando muitas vezes melhores opções de fuga.

#### 2.4.2 Modelos computacionais

Boa parte das linhas de pesquisa atuais fazem uso do recurso da simulação. Informações de ocorrências como vídeos ou relatos de testemunhas são utilizadas para criar modelos matemáticos que representem cenários de pessoas evacuando edificações. Saboia (2010) resume o estudo do movimento de multidão e a evacuação de emergência em duas abordagens principais: macroscópica e microscópica.

Na abordagem macroscópica, a multidão é estudada como um todo, analisada por grandezas macroscópicas como fluxo, densidade e pressão. Os modelos que seguem a abordagem microscópica descrevem a posição e velocidade de cada pedestre em um determinado momento. Características próprias de cada indivíduo podem ser inseridas, possibilitando modelar multidões heterogêneas. O comportamento da multidão é resultado de interações entre cada pedestre modelado, sendo as grandezas macroscópicas (fluxo, densidade e pressão) resultantes de tais interações ao longo do tempo, bem como os

---

<sup>11</sup>Like us, mice fleeing from life-threatening danger look for the exit and make for it, pushing others aside if necessary. What's more, like panicking humans, the animals tend to follow one another rather than assessing the best exit route.

fenômenos emergentes, a exemplo da formação de arcos ao redor de saídas, que se formam em evacuações de salas.

#### 2.4.2.1 Exemplo de modelo de simulação

Após listar os eventos relacionados à dinâmica da multidão (início da Seção 2.3.2), Helbing, Farkas e Vicsek (2000) propõe uma simulação baseada no modelo de Forças Sociais que é adequado para descrever o aumento de pressão dentro da multidão conforme a densidade vai aumentando, especialmente próximo às saídas de emergência. As principais conclusões dos autores quanto a dinâmica de multidão, são dadas a seguir:

- a) para pessoas apressadas,  $v_i^0 > 1,5m/s$ , foram observadas formações irregulares de bloqueios da saída e avalanches de pessoas sendo liberadas ao mesmo tempo quando os arcos de sustentação eram quebrados;
- b) dado que o entupimento da saída está associado a atrasos, tentar se mover mais rápido pode causar a redução da velocidade média de evacuação, devido ao atrito entre as pessoas;
- c) se as paredes estiverem suficientemente afastadas, os arcos se formarão pela combinação de dois efeitos: primeiro, redução da velocidade devido ao efeito gargalo causado, por exemplo, pela passagem por uma porta, e segundo, forte atrito entre pessoas que se torna dominante com a proximidade entre elas. Desta forma o perigo pode ser minimizado pela construção de edificações que evitem os gargalos;
- d) as obstruções podem ocorrer mesmo em rotas de fuga mais largas e a colocação de colunas assimetricamente posicionadas próximo às saídas melhora o fluxo e previne a formação de pressões elevadas dentro da multidão que poderiam causar esmagamentos de indivíduos.

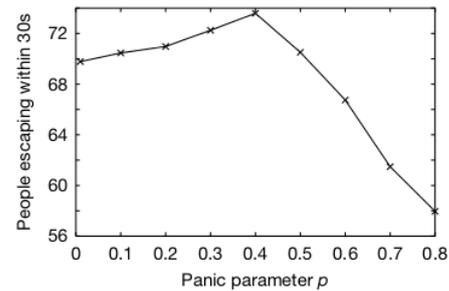
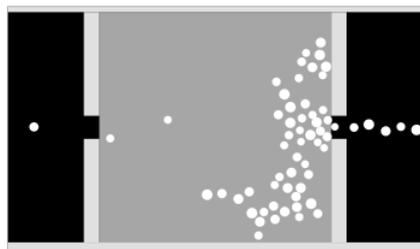
**Grau de pânico.** Helbing, Farkas e Vicsek (2000) analisa outra condição existente quando há mais de uma saída disponível, o processo de escolha da rota de fuga. Seja um quarto tomado de fumaça onde as pessoas tenham que identificar uma das saídas invisíveis. É uma busca às cegas na qual existe uma combinação de dois comportamentos distintos: seguir os outros ou explorar o local por si. Desta forma, cada pedestre  $i$  tem que selecionar uma direção individual  $e_i$  ou seguir uma direção média  $\langle e_j^0(t) \rangle_i$  dos seus vizinhos  $j$  dentro de um certo raio  $R_i$ . Uma mistura dos dois comportamento, ponderada pelo parâmetro  $p_i$ , é calculada por

$$e_i^0(t) = Norm[(1 - p_i)\mathbf{e}_i + p_i \langle e_j^0(t) \rangle_i], \quad (3)$$

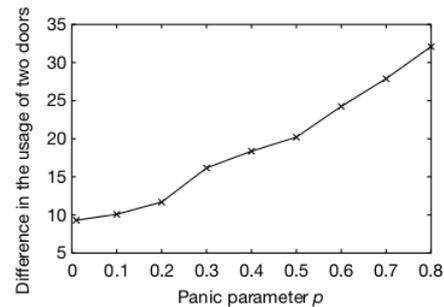
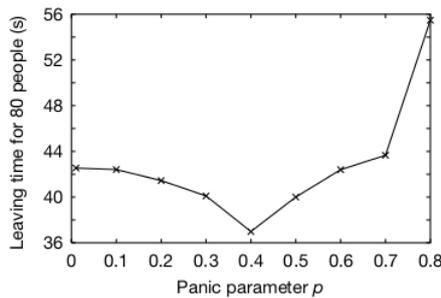
onde  $Norm(z) = z/||z||$  é o vetor  $z$  normalizado. Como consequência, tem-se comportamento individualista quando  $p_i$  é próximo a zero e comportamento de manada com valores próximos a unidade. Desta forma,  $p_i$  pode ser considerado como o grau de pânico do indivíduo  $i$ . A Figura 4 apresenta os resultados dos testes com diversos valores para o grau de pânico  $p_i$ .

Figura 4: Simulação da influência do nível de pânico sobre o tempo total de evacuação:

- (a) 90 pessoas e duas saídas de 1,5m; (b) pessoas evacuadas dentro de 30 s;



- (c) tempo de evacuação de 80 pessoas; (d) diferença do uso entre as duas saídas.



Fonte: Helbing, Farkas e Vicsek (2000)

Observando-se os resultados da Figura 4, Helbing, Farkas e Vicsek (2000) chegaram às seguintes conclusões:

- O Gráfico 4d, que representa a diferença entre o uso de duas saídas distintas para diversos valores do grau de pânico, sugere que no comportamento puramente individualista a decisão pela escolha da saída é acidental e tende a ser equalizada, enquanto que o comportamento de manada levará a multidão a se mover para a mesma direção, que provavelmente estará bloqueada como representado na Figura 4a;
- Os Gráficos 4b e 4c mostram que as chances de sobrevivência aumentam para uma certa mistura de comportamento individualista e de manada, onde individualismo permite que as pessoas detectem as saídas e o comportamento de manada garante que as soluções corretas sejam imitadas pelos outros. Se os pedestres seguirem tateando pelas paredes é esperado que o comportamento de

manada causará congestionamentos enquanto que os individualistas movendo-se em sentidos opostos irão se obstruir.

O pesquisador Illes Farkas, um dos autores de Helbing, Farkas e Vicsek (2000), disponibilizou um software com o qual é possível simular a evacuação por uma única saída de emergência. Na Seção 3.2 o modelo matemático implementado neste software é apresentado em detalhes.

### 2.4.3 Síntese

Helbing, Farkas e Vicsek (2000) chegaram a várias conclusões importantes a respeito da evacuação urgente sob elevada densidade dentre as quais cita-se: a formação instável de arcos de sustentação entre as pessoas que bloqueiam a saída, a capacidade que um obstáculo tem em reduzir as pressões e melhorar o tempo de evacuação e a existência de um fator de pânico ótimo, o qual maximiza a performance de uma dada condição de evacuação. Tudo isso, observações derivadas de simulações que exigem experimentos adicionais conforme palavras dos próprios autores de Helbing, Farkas e Vicsek (2000, p. 490, tradução nossa):

Estamos buscando dados complementares e vídeos adicionais relacionados a evacuação urgente a fim de testar nossos modelos quantitativamente, e compará-lo a modelos alternativos.<sup>12</sup>

Ball (2013) colocara os camundongos em estado de pânico utilizando o medo que estes tem da água. Comparativamente, a expectativa de morte iminente em uma sala tomada de fumaça asfixiante levaria os seres humanos a apresentar comportamento semelhante e assim realizar o estudo mais fidedigno possível. Todavia, colocar seres humanos em estado de pânico é um ato antiético, cap:referencialTeorico quicá criminoso.

Visando suprir a falta de estudos experimentais sem causar prejuízos aos participantes, o Capítulo 3 apresenta a metodologia do experimento de evacuação urgente e o modelo matemático desenvolvido por Helbing, Farkas e Vicsek (2000), o qual será utilizado nas simulações necessárias ao cumprimento dos objetivos desta monografia.

---

<sup>12</sup>We are now calling for complementary data and additional video material on escape panics to test our model quantitatively, and compare it with alternative models.

### 3 METODOLOGIA

O “Estudo da obstrução de saídas de emergência durante a evacuação urgente sob elevada densidade populacional” trata-se de um estudo de caso onde um grupo de pessoas, sob diversas condições de **densidade populacional**, é motivado a **evacuar urgentemente uma edificação através de uma porta**, ora denominada saída de emergência. Da revisão bibliográfica a ser apresentada e dos experimentos realizados, observam-se vários fenômenos de movimentação de multidão dentre os quais a **obstrução da saída de emergência**.

Estudo de caso, conforme relata Ventura (2007, p. 385), é geralmente organizado em torno de um pequeno número de questões as quais se referem ao como e ao porquê da investigação. Resta aqui elucidar as causas e possíveis soluções do fenômeno que leva as pessoas, ao saírem às pressas, obstruírem-se nas saídas de emergência. A revisão bibliográfica, vista anteriormente, é uma ferramenta útil para potencializar o estudo de caso por meio de comparações, fundamentação teórica e reforço argumentativo.

Neste capítulo estão descritos o procedimento experimental (Seção 3.1) e o modelo matemático descrito por Helbing, Farkas e Vicsek (2000), o qual é utilizado no software de simulação de evacuação aplicado nesta monografia (Seção 3.2).

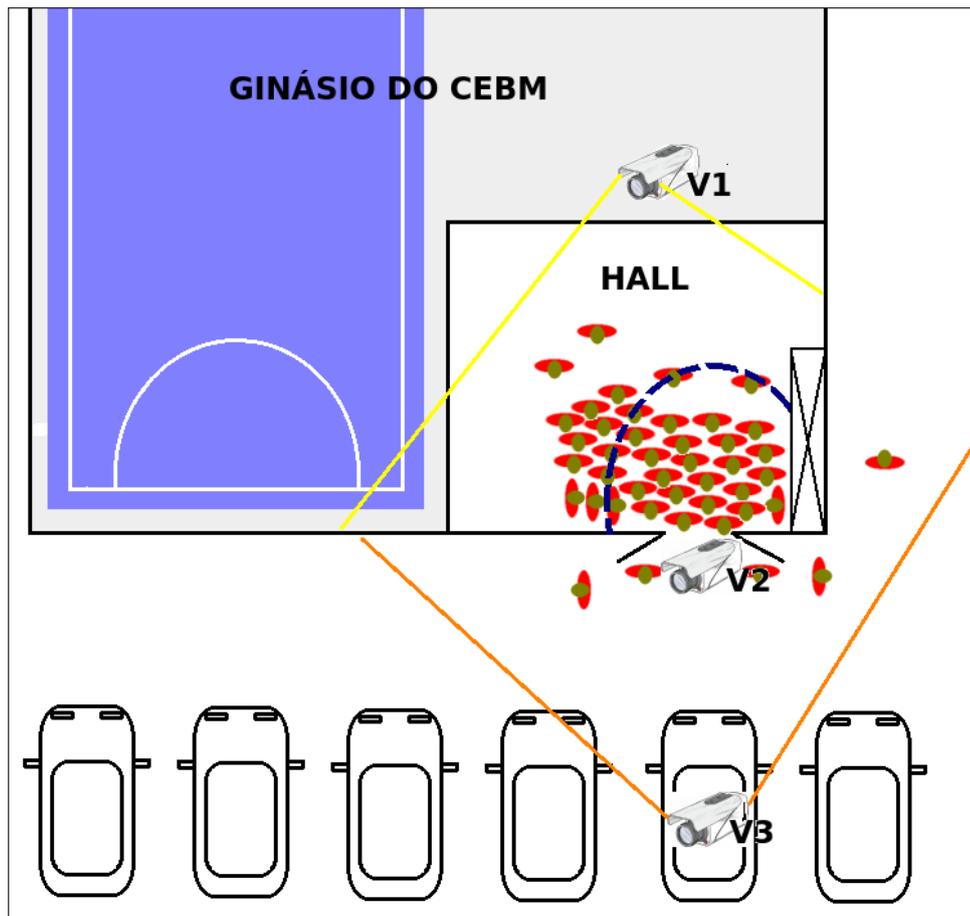
#### 3.1 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O Experimento de evacuação urgente proposto neste trabalho visa verificar a influência da lotação de um local de reunião de público na segurança dos ocupantes. Em um ambiente fechado, com apenas uma saída disponível, e com os ocupantes bem distribuídos, soa-se o apito. Todos são impelidos a saírem imediatamente, reação observada pelas pessoas, por exemplo, após perceberem risco iminente a própria vida. Conforme a lotação existente, maior será o número de pessoas pressionando para sair, ocasionando diversos níveis de obstrução na saída.

Seja uma área delimitada no hall do ginásio de esportes do Centro de Ensino Bombeiro Militar em Florianópolis, que possui um formato retangular com área útil aproximada de 70 m<sup>2</sup>, cuja única saída disponibilizada foi uma porta com vão de 1,12 m de largura. Sejam os voluntários deste experimentos os alunos soldados do Corpo de Bombeiros Militar de Santa Catarina, na ocasião participando do VII Treinamento de Resistência Operacional (TRO). Em cada uma das rodadas, sob a supervisão de oficiais da Diretoria de Atividades Técnicas do Corpo de Bombeiros Militar de Santa Catarina,

um quantitativo de alunos foi convidado a simular um ambiente de reunião de público, sob diferentes condições de densidade populacional. Os participantes eram estimulados a circular pela área, espalhando-se como se estivessem em uma casa noturna. Ao soar do apito, todos deveriam sair do hall através da saída existente. Três câmeras filmadoras foram estrategicamente posicionadas para captar em detalhes os fenômenos existentes na evacuação urgente. A Figura 5, apresenta uma vista superior da área do ginásio (fora de escala), detalhando alguns aspectos do experimento.

Figura 5: Croqui do experimento mostrando o posicionamento das três câmeras filmadoras



Fonte: do Autor

A câmera  $V_1$  (cone de filmagem cor amarela), controlada por operador posicionado na arquibancada do ginásio a cinco metros acima do nível piso, filma a multidão pela retaguarda. Fixada acima do batente superior da saída, a câmara  $V_2$  (círculo hachurado cor azul) registra as pessoas momentos antes de saírem do hall do ginásio. Por fim, a  $V_3$  (cone de filmagem cor laranja) é posicionada sobre um veículo estacionado próximo à saída, filmando cada pessoa de frente ao sair do ginásio. A Figura 6 apresenta uma fotografia simultânea das câmeras  $V_1$ ,  $V_2$  e  $V_3$ .

A presença de veículos estacionados próximos à saída de emergência, não raro encontrada em locais de reunião de público como casas noturnas, atrapalha a dispersão



- c) minimizar o risco de acidentes aos participantes, respeitando questões éticas inerentes;
- d) focar este experimento na dinâmica de multidão, visualizando os fenômenos descritos na Subseção 2.3.2.

Nestes ensaios, inicia-se a contagem do tempo com o soar do apito. A saída do último indivíduo determina o tempo total de evacuação.

### 3.2 MODELO DE SIMULAÇÃO

O modelo matemático descrito em Helbing, Farkas e Vicsek (2000), é baseado na seguinte premissa inicial: percebido um sinistro, todo indivíduo busca seguir uma direção, a saída de emergência, a uma certa velocidade desejada. Caso as pessoas a frente não estejam na mesma velocidade, sofrerão a pressão dos indivíduos à retaguarda. Pelo modelo, agem sobre cada indivíduo forças físicas e sócio-psicológicas, sendo estas últimas relacionadas principalmente à aversão das pessoas por locais aglomerados. As forças físicas são as reações à compressão e a fricção, tanto entre os indivíduos quanto entre indivíduo e parede. A descrição abaixo foi adaptada de Helbing, Farkas e Vicsek (2000) com a inclusão de dois esquemas ilustrativos ressaltando: a posição e deslocamento dos indivíduos no espaço de simulação (Figura 7) e a aplicação das forças psicológica, de reação à compressão e de fricção (Figura 8).

Assumindo uma composição de forças sócio-psicológicas e físicas influenciando o comportamento da multidão: cada um dos  $P$  pedestres  $i$  com massa corporal  $m_i$  gostaria de se locomover com uma velocidade desejada  $v_i^0$  e em uma determinada direção  $\mathbf{e}_i^0$ , e por isso, tende a adaptar sua velocidade atual  $\mathbf{v}_i$  dentro de um certo tempo de reação  $\tau_i$ . A Figura 7 traz a representação de como cada indivíduo, ou circunferência de raio  $R$  no modelo, têm suas posições, e velocidades definidas vetorialmente.

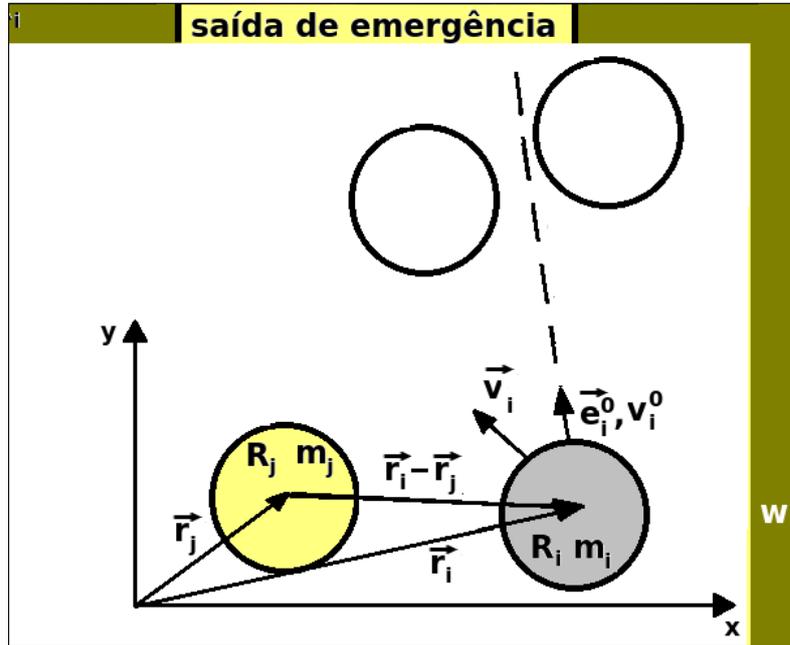
Simultaneamente, a pessoa tenta manter uma distância dos outros pedestres  $j$  e das paredes  $W$ . Tal fato pode ser matematicamente representado por forças interativas  $\mathbf{f}_{ij}$  e  $\mathbf{f}_{iW}$ , respectivamente. A forma como as forças interativas agem sobre os indivíduos está esquematizada na Figura 8.

A mudança de velocidade através do tempo é dada pela equação da aceleração

$$m_i \frac{d\mathbf{v}_i(t)}{dt} = m_i \frac{v_i^0(t)\mathbf{e}_i^0(t) - \mathbf{v}_i(t)}{\tau_i} + \sum_{j \neq i} \mathbf{f}_{ij} + \sum_W \mathbf{f}_{iW}, \quad (1)$$

enquanto que a mudança de posição  $\mathbf{r}_i(t)$  é dada pela velocidade  $\mathbf{v}_i(t) = d\mathbf{r}_i/dt$ . O primeiro somatório da Equação 1 é dado por

Figura 7: Esquema ilustrativo da cinemática do modelo matemático desenvolvido por Helbing, Farkas e Vicsek (2000).



Fonte: do Autor

$$\sum_{j \neq i} \mathbf{f}_{ij} = f_{p,ij} + f_{b,ij} + f_{f,ij} \quad (2)$$

$$(3)$$

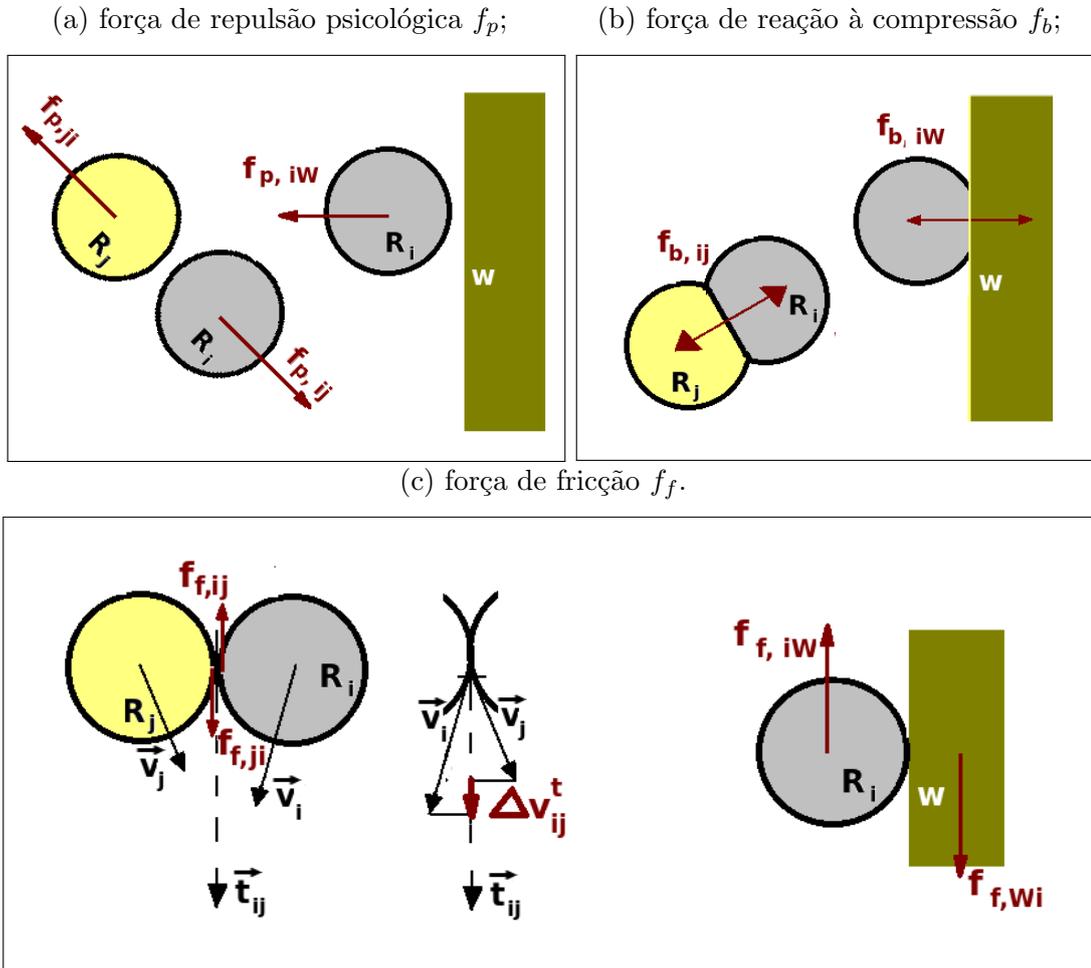
onde  $f_{p,ij}$  é uma força repulsiva que representa a tendência psicológica de dois pedestres  $i$  e  $j$  permanecerem longe um do outro (Figura 8a), e é calculada por

$$\mathbf{f}_{p,ij} = A_i e^{\left[\frac{r_{ij} - d_{ij}}{B_i}\right]} \mathbf{n}_{ij}, \quad (4)$$

onde  $A_i$  e  $B_i$  são constantes,  $d_{ij} = \|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j\|$  representa a distância entre os centros de massa dos pedestres  $i$  e  $j$ , e  $\mathbf{n}_{ij} = (n_{ij}^1, n_{ij}^2) = (\mathbf{r}_i + \mathbf{r}_j)/d_{ij}$  é um vetor normalizado que aponta do indivíduo  $j$  ao  $i$ . Os pedestres se tocarão se a distância  $d_{ij}$  for menor que a soma  $R_{ij} = (R_i + R_j)$  dos seus raios. Neste caso, assume-se duas forças adicionais inspiradas em interações granulares. Primeiro, a força exercida pelos corpos em reação às forças de compressão (Figura 8b):

$$\mathbf{f}_{b,ij} = k(R_{ij} - d_{ij})\mathbf{n}_{ij}, \quad (5)$$

Figura 8: Esquema ilustrativo da dinâmica do modelo matemático desenvolvido por Helbing, Farkas e Vicsek (2000).



Fonte: do Autor

e segundo, a força de fricção que representa a resistência aos movimentos tangenciais relativos entre os pedestres  $i$  e  $j$  quando estes estão em contato (Figura 8b), a qual é dada por

$$\mathbf{f}_{f,ij} = \kappa(R_{ij} - d_{ij})\Delta v_{ji}^t \mathbf{t}_{ij}, \quad (6)$$

onde  $\mathbf{t}_{ij} = (-n_{ij}^2, n_{ij}^1)$  representa a direção tangencial e  $\Delta v_{ij}^t = (\mathbf{v}_j - \mathbf{v}_i) \cdot \mathbf{t}_{ij}$  é a velocidade tangencial relativa entre  $i$  e  $j$ , enquanto  $k$  e  $\kappa$  são constantes. Substituindo as Equações 4, 5 e 6 na Equação 2, obtém-se

$$\mathbf{f}_{ij} = [A_i e^{\frac{R_{ij} - d_{ij}}{B_i}} + kg(R_{ij} - d_{ij})] \mathbf{n}_{ij} + \kappa g(R_{ij} - d_{ij}) \Delta v_{ji}^t \mathbf{t}_{ij}, \quad (7)$$

onde a função  $g(x)$  é zero se os pedestres não tocarem uns aos outros ( $d_{ij} > r_{ij}$ ), e é igual ao argumento  $x$  nos outros casos. A interação com as paredes é analogamente tratada: se

$d_{iW}$  significa a distância para a parede  $W$ ,  $\mathbf{n}_{iW}$  representa o vetor normal à parede e  $\mathbf{t}_{iW}$  é a direção tangencial, a força de interação com as paredes é dada por

$$\mathbf{f}_{iW} = [A_i \exp^{\frac{R_i - d_{iW}}{B_i}} + kg(R_i - d_{iW})] \mathbf{n}_{iW} - \kappa g(R_i - d_{iW}) (\mathbf{v}_i \mathbf{t}_{iW}) \mathbf{t}_{iW}. \quad (8)$$

Encerrando a análise matemática, as Equações 7 e 8 podem ser substituídas na Equação 1 que representa a aceleração resultante sobre cada indivíduo em um determinado instante. Helbing, Farkas e Vicsek (2000) implementou o modelo matemático acima utilizando linguagem de programação C.

## 4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

O Capítulo 2 abordou as tragédias ligadas às evacuações ineficientes, normatização, comportamento humano, dinâmica de multidão e os estudos correlatos a este trabalho. O Capítulo 3 apresentou o procedimento metodológico referente aos experimentos e às simulações. Dos objetivos específicos propostos na Subseção 1.1.1, faltam conjugar os verbos experimentar, simular e analisar.

Este capítulo apresenta e analisa os resultados dos experimentos e simulações. A Seção 4.1 identifica os fenômenos relacionados à dinâmica de multidões e analisa a influência da lotação do local de reunião de público sobre o tempo de evacuação total. A Seção 4.2 compara os resultados experimentais aos tempos de evacuação obtidos via simulações de cenários análogos. Na sequência, novos testes são realizados para verificar, quantitativamente, qual é a influência da inclusão de obstáculos no caminho da multidão e do tamanho das saídas de emergência sobre o tempo de evacuação. Com fulcro nos resultados deste trabalho, a Seção 4.3 analisa alguns elementos da NSCI (SANTA CATARINA, 1992), concluindo a respeito da efetividade desta em melhorar o tempo de evacuação sob condições de elevada densidade populacional. A Seção 4.4 resume os resultados obtidos.

### 4.1 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Os resultados obtidos com os experimentos descritos na Seção 3.1 podem ser divididos em: quantitativos, destacando-se o tempo de evacuação em função da densidade populacional; e qualitativos, onde foram identificados alguns dos fenômenos relacionados a dinâmica de multidões (Subseção 2.3.2.2).

#### 4.1.1 Resultados quantitativos

A Tabela 1 apresenta os resultados quantitativos dos experimentos realizados. Da esquerda para a direita tem-se o número inicial de pessoas  $P$  (lotação), a densidade populacional  $D$  dado em  $p/m^2$ , o tempo de evacuação total  $t_{evac}$  dado em segundos e o fluxo médio  $\overline{J_{evac}}$ , representando o número médio de pessoas que saem pela porta a cada segundo.

Foram realizados sete experimentos, iniciando-se com uma condição pouco povoada, de  $0,5 p/m^2$ . Para os ensaios com densidade de 1 e  $1,5 p/m^2$  o grupo pôde ser totalmente renovado. Nos ensaios com maior número de alunos, foi necessário repetir a

participação de alguns voluntários, perdendo o elemento surpresa do soar do apito. Desta forma, no último ensaio foram colocados 280 pessoas no hall, as quais já haviam passado pelo experimento.

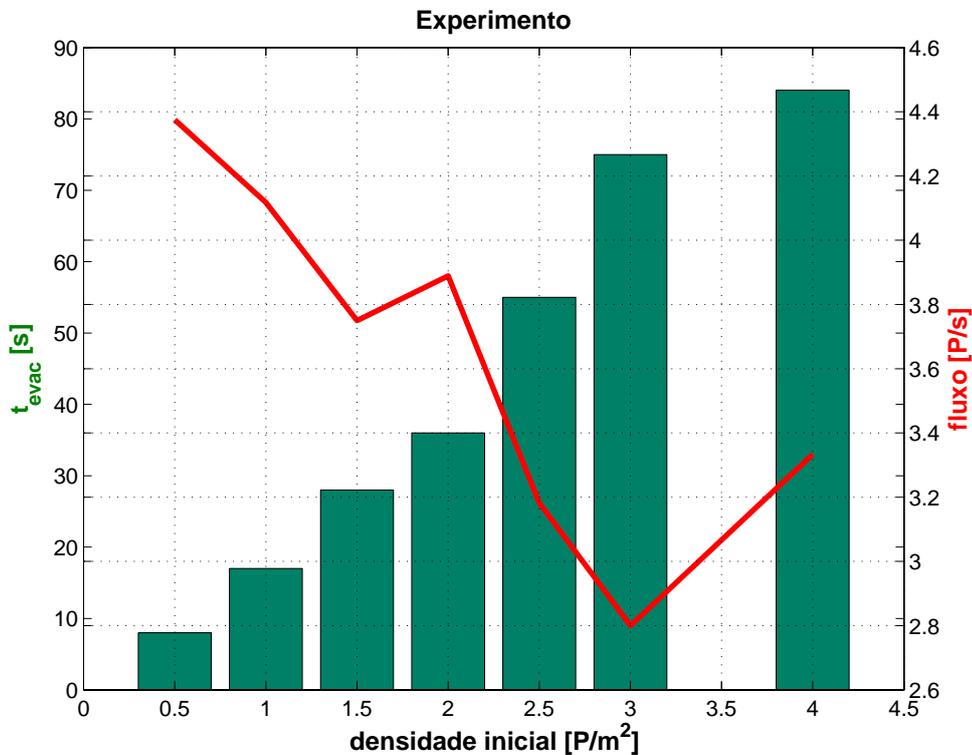
Tabela 1: Lotação, densidade populacional, tempo de evacuação e fluxo médio através da saída obtidos nos experimentos.

Ensaio	P	D [p/m <sup>2</sup> ]	$t_{evac}$ [s]	$\overline{J_{evac}}$ [P/s]
A	35	0,5	8	4,375
B	70	1,0	17	4,118
C	105	1,5	28	3,750
D	140	2,0	36	3,889
E	175	2,5	55	3,182
F	210	3,0	75	2,800
G	280	4,0	84	3,333

Fonte: do Autor.

Os tempos de evacuação total  $t_{evac}$  e fluxo médio das pessoas através da saída de emergência  $\overline{J_{evac}}$ , dados na Tabela 1, estão apresentados no Gráfico 1 na forma de colunas e linhas, respectivamente.

Gráfico 1: Resultados experimental indicando o tempo de evacuação total e fluxo médio de pessoas através da saída em função da lotação inicial.



Fonte: do Autor.

A Figura 1 leva a seguinte análise:

- a) pelo gráfico de barras, o tempo de evacuação aumenta com o número de pessoas existentes no local;
- b) pelo gráfico de linhas, nota-se uma tendência à diminuição do fluxo médio de pessoas através da saída com o aumento da densidade populacional, indicando uma influência negativa da lotação sobre o tempo de evacuação;
- c) esta diminuição é não-linear, dado que a inclinação da curva do fluxo médio dentro do intervalo  $[0,5, 1,5]$  p/m<sup>2</sup> é menos acentuada que dentro do intervalo  $[2,0, 3,0]$  p/m<sup>2</sup>. A não linearidade é decorrente das obstruções na saída, que se tornam mais frequentes e duradouras com o aumento do número de pessoas pressionando para sair;
- d) as linhas ascendentes observadas nos intervalos  $[1,5, 2,0]$  e  $[3,0, 4,0]$  p/m<sup>2</sup>, indicam alterações nos Ensaios D e G, onde a maioria dos participantes, por já terem participado nos ensaios de menor densidade, não forçaram sua saída como anteriormente;
- e) tais alterações não são tão defeituosas quanto proveitosas, pois os Ensaios D e G, onde a evacuação foi mais eficiente que o esperado, podem ser comparados aos outros ensaios, extraíndo informações a respeito da relação entre a pressão interna na multidão, que ocasiona os bloqueios na saída, e o tempo de evacuação;

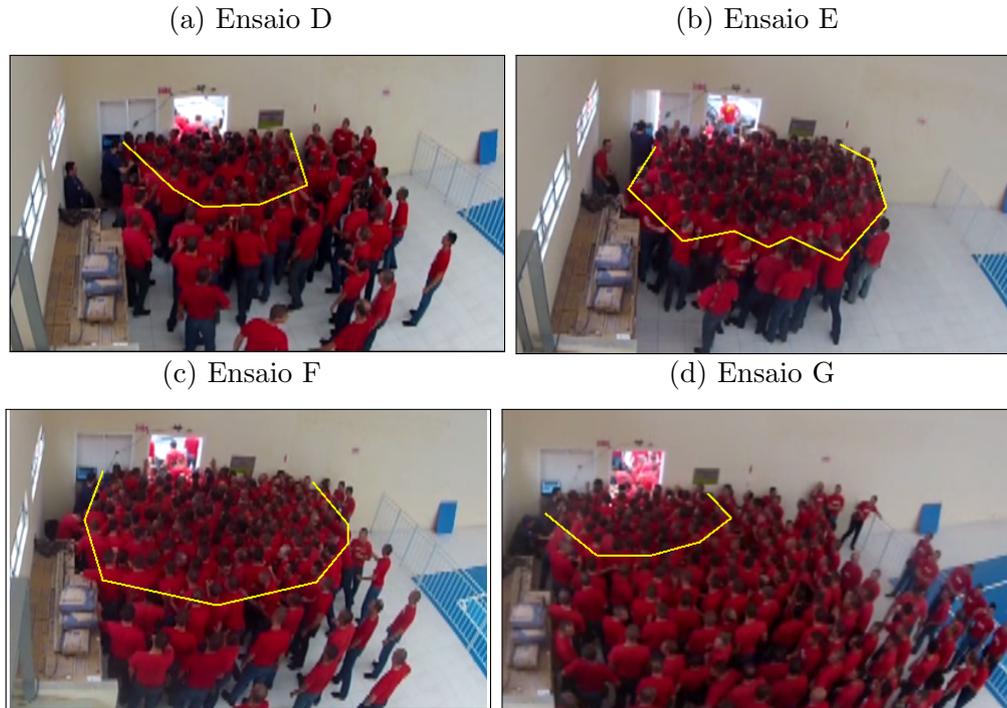
Sobre a pressão interna, a qual não foi mensurada nos experimentos, ela pôde ser identificada nas filmagens por meio da elevada compactação dos indivíduos. Para ilustrar o quanto a pressão sobre os indivíduos foi mais baixa na maior parte dos Ensaios D e G, a Figura 9 traz quatro fotografias de ensaios distintos, transcorridos aproximadamente 25 % do tempo total de evacuação, ou seja, entre o soar do apito e a saída do último indivíduo. A pressão é diretamente relacionada a área ocupada por pessoas altamente compactadas, as quais estão delimitadas nas figuras pela linha amarela. Atrás deste limite, os indivíduos não participam efetivamente do ensaio, pois não pressionam para sair.

As Figuras 9b e 9c, mostram que os ensaios E e F, apresentaram maior área compactada e apenas alguns poucos indivíduos ao fundo sem pressionar os colegas. Desta forma, estes ensaios tendem a ser mais fidedignos à proposta do experimento deste trabalho, que é alcançar situações de elevada pressão para verificar a existência da formação dos arcos de sustentação e do efeito de turbulência, apresentados na Subseção 2.3.2.2.

As Figuras 9a e 9d apresentam menor compactação e grande número de “telespectadores” à retaguarda da multidão. A análise que relaciona pressão à tempo de evacuação será retomada na Seção 4.2.

Para encerrar esta análise quantitativa, os dados dos ensaios experimentais da Tabela 1 são tratados, retirando-se os valores dos Ensaios D e G, permitindo calcular uma

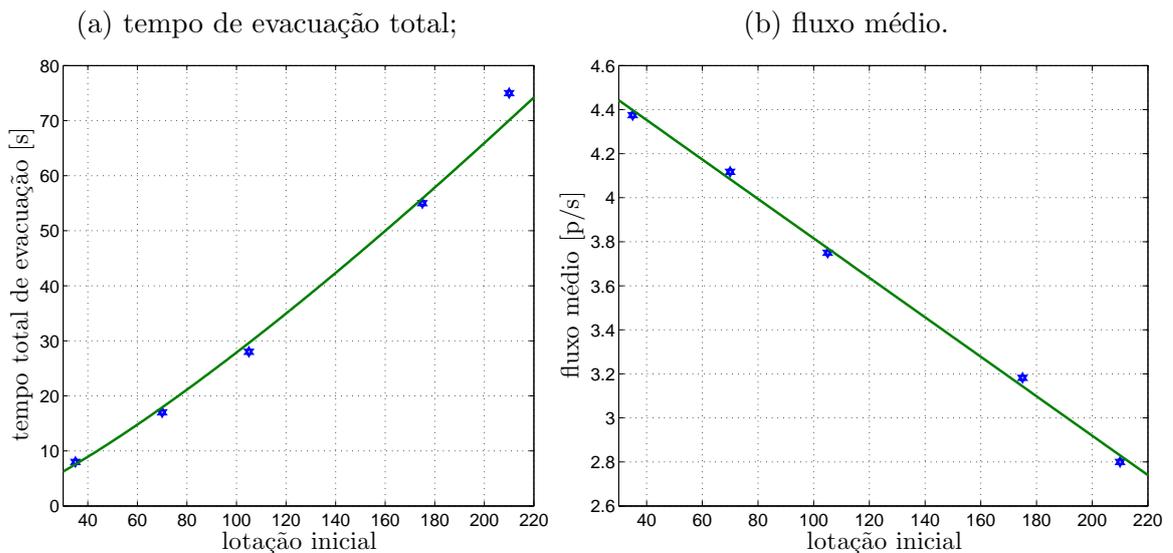
Figura 9: Fotografia dos ensaios identificando zonas de baixa pressão fora do contorno do limite em amarelo (câmera V<sub>1</sub>).



Fonte: do Autor.

curva de tendência para o tempo de evacuação e para o fluxo, ambos em função da lotação inicial, conforme a Figura 10.

Figura 10: Resultados experimentais sem os dados dos Ensaios D e G:



Fonte: do Autor.

A linha de tendência da Figura 10a é uma interpolação geométrica dos dados,

cuja equação

$$t_{evac}(P) = \alpha P^\beta, \quad (1)$$

representa a relação do tempo de evacuação em função da lotação para um local de reunião de público com uma abertura de 1,12 m, sendo:  $P$  a lotação; e  $\alpha$  (0.091610906) e  $\beta$  (1.2416665865) constantes. O coeficiente de determinação<sup>1</sup> ficou em torno de 0,9957, o que significa uma ótima aproximação da curva com os dados.

A linha de tendência da Figura 10b é uma interpolação linear dos dados, cuja equação

$$\overline{J_{evac}}(P) = \alpha \cdot P + \beta, \quad (2)$$

representa a relação do fluxo médio em função da lotação para um local de reunião de público com uma abertura de 1,12 m. Na Equação 2  $P$  é a lotação;  $\alpha$  (-0.0089601329) e  $\beta$  (4.711255814), são constantes. O coeficiente de determinação ficou em 0,9973.

#### 4.1.2 Resultados qualitativos

Esta seção faz uma análise mais detalhada nos vídeos, buscando identificar neles alguns dos fenômenos de multidão discutidos na Subseção 2.3.2.2, como a formação de arcos de sustentação e o efeito de turbulência.

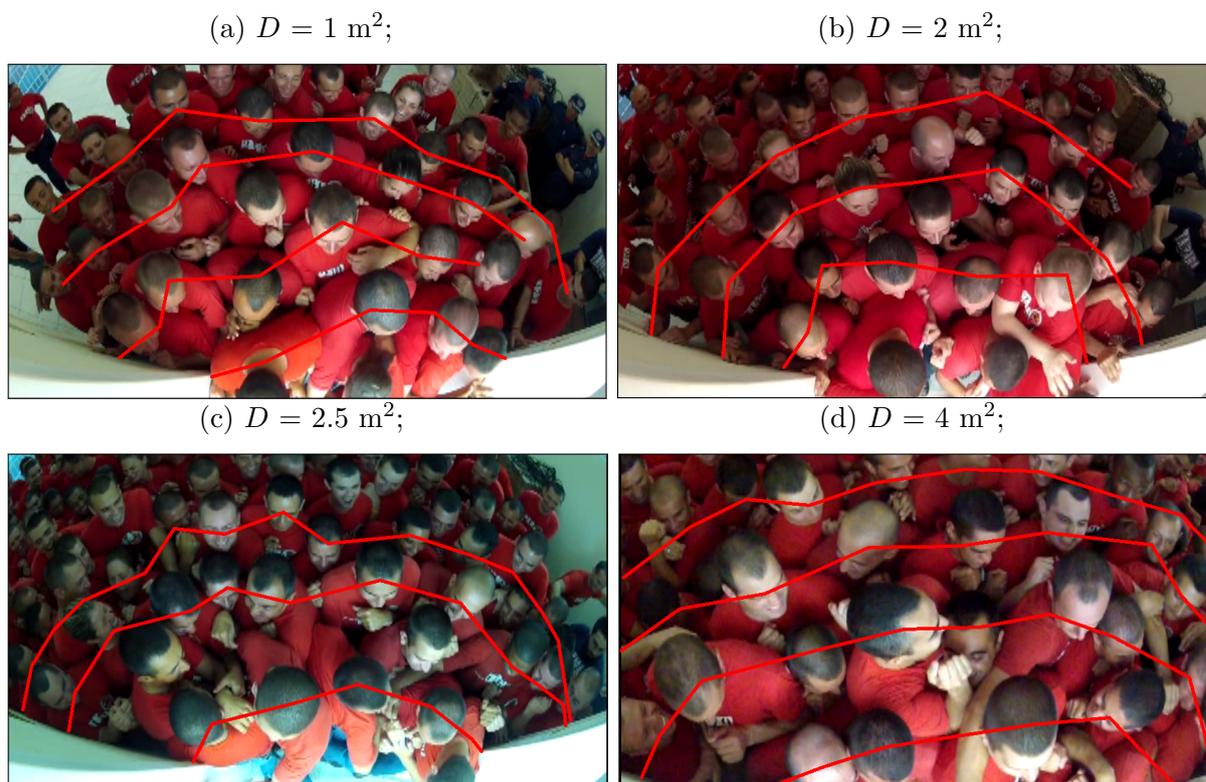
##### 4.1.2.1 Formação de arcos de sustentação

Nas diferentes condições de densidade apresentadas na Figura 11, é possível identificar os arcos de sustentação onde os indivíduos, ombro a ombro, bloqueiam-se diante da saída de emergência. As linhas vermelhas são segmentos de reta que conectam os centros geométricos dos indivíduos, e possuem o formato semelhante aos arcos arquitetônicos. Repare que as pessoas de trás, ao tentar abrir caminho para a saída, pressionam a retaguarda do arco compactando-o ainda mais. Nas extremidades laterais, os indivíduos são pressionados contra a parede.

A Figura 11d ilustra como as pessoas ficam compactadas. Em alguns indivíduos só é possível visualizar a cabeça, pois estão até com seus ombros e pescoço encobertos pelas pessoas próximas. Uma das consequências da formação de arcos de sustentação é a ocorrência do aprisionamento de indivíduos contra às paredes como mostra a Figura

<sup>1</sup>também chamado de  $R^2$ , é uma medida de ajustamento de um modelo estatístico linear generalizado, como a regressão linear, em relação aos valores observados. O  $R^2$  varia entre 0 e 1, indicando, em percentagem, o quanto o modelo consegue explicar os valores observados. (WIKIPEDIA, 2014)

Figura 11: Visualização dos arcos de sustentação que bloqueiam a saída (câmera  $V_2$ ):



Fonte: do Autor.

12, situação que pode evoluir para o esmagamento, queda e pisoteamento em eventos extremos.

No início da análise os dois indivíduos, destacados em amarelo e azul, estão pressionados contra a parede por estarem posicionados nas laterais dos arcos de sustentação (Figura 12a). O indivíduo destacado em azul está ao lado da saída, seu ombro está encostado no batente da porta. Após 15 segundos, ambos são arrastados pela turbulência na multidão para à esquerda, ficando o amarelo fora do campo visual da câmera (Figura 12c). Aos 26 segundos, o indivíduo destacado em azul consegue sair enquanto o amarelo, de volta no campo visual, continua pressionado contra a parede (Figura 12b). Apenas após 32 segundos, permanecendo no máximo a um metro da saída e exercendo muita força contra a parede, o indivíduo destacado em amarelo consegue sair (Figura 12d).

A análise acima demonstra que mesmo os indivíduos tão próximos das saídas de emergência podem ter muitas dificuldades em sair. Em ocorrências reais, como o ocorrido no fatídico Show do The Who (Seção 2.1.7), as pressões facilmente se elevam a níveis onde ocorre esmagamentos, queda e pisoteamentos. Cabe ressaltar que o pisoteamento não é intencional, e sim consequência da queda de uma ou mais vítimas, cujo vazio deixado na multidão é rapidamente preenchido pelos indivíduos à volta, que não conseguem evitar o pisoteamento. Se as pressões permanecerem elevadas, aqueles que caíram tornam-se

Figura 12: Observação do aprisionamento dos indivíduos próximos à parede ( $D = 3,0 \text{ p/m}^2$ , câmera  $V_2$ ):

(a)  $t=0\text{s}$ , início da análise;

(b)  $t=26\text{s}$ , amarelo retorna e azul sai;



(c)  $t=15\text{s}$ , amarelo arrastado para a esquerda;

(d)  $t=32\text{s}$ , amarelo saindo.



Fonte: do Autor.

obstáculos aos outros, facilitando a ocorrência de novas quedas.

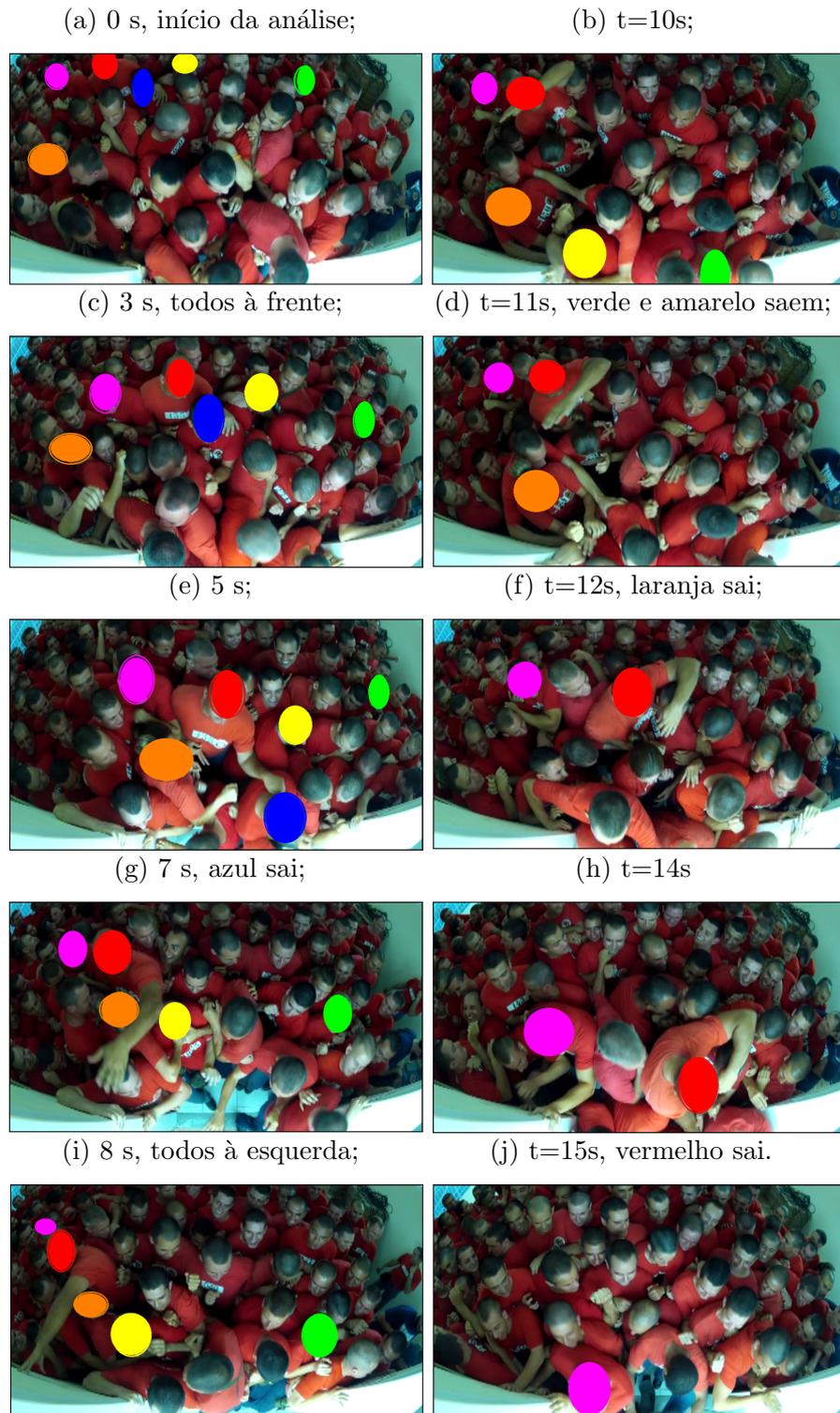
#### 4.1.2.2 Efeito de turbulência

O efeito de turbulência, outra consequência da elevada pressão na multidão, é identificado na sequência de fotografias do deslocamento da multidão, apresentadas na Figura 13.

Sejam seis indivíduos pertencentes à multidão, que inicialmente estava sob uma concentração de  $2,5 \text{ p/m}^2$ , e que está em processo de evacuação do ginásio. Num dado momento do ensaio, nas proximidades da saída de emergência, as pressões atingiram níveis críticos, favorecendo o surgimento da turbulência, identificada pelos deslocamentos aleatórios e não intencionais dos indivíduos destacados na Figura 13.

No início, a distância de cada um dos indivíduos destacados até a saída é praticamente a mesma (Figura 13a). Após três segundos todos se aproximam da saída (Figura 13c). Passam-se dois segundos, e o violeta e o verde estão estagnados enquanto os outros conseguem avançar (Figura 13e). No instante " $t = 7 \text{ s}$ ", o azul sai, exato momento

Figura 13: Visualização do efeito de turbulência ( $D = 2,5 \text{ p/m}^2$ , câmera  $V_2$ ):



Fonte: do Autor.

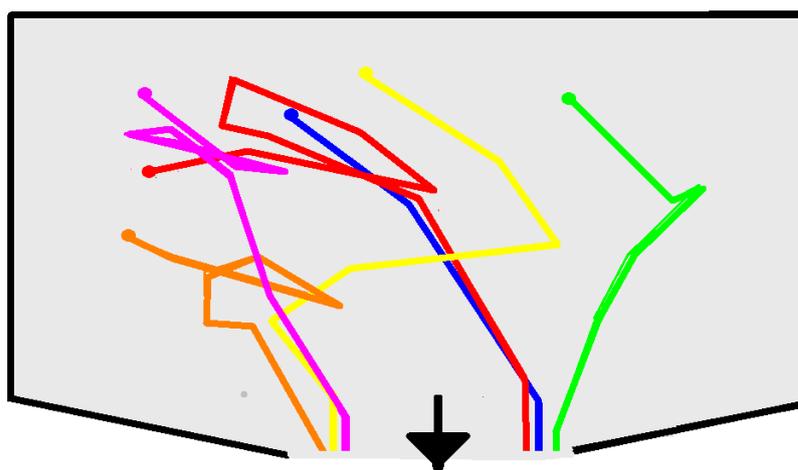
em que uma onda empurra a multidão para à esquerda, aproximando o verde (e afastando os demais) da saída (Figuras 13g e 13i). Passados mais três segundos, saem o verde e o amarelo (Figuras 13b e 13d). Agora outra onda, reativa àquela anterior, empurra a multidão à direita, aproximando os indivíduos destacados (aqueles que ainda não haviam

saído) da saída, culminando na evacuação do laranja, do vermelho e violeta (sequência representada nas Figuras 13f, 13h e 13j).

Neste ponto, retoma-se a discussão de dois fenômenos comuns às evacuações urgentes: a formação de grupos durante a evacuação e a reentrada de indivíduos que já haviam saído do local sinistrado, ambas discutidas na Seção 2.3.1. Imaginando que alguns dos indivíduos destacados fossem de um mesmo grupo familiar, ou possuam qualquer outro laço afetivo. Por mais que pretendam permanecer juntos a turbulência na multidão poderá separá-los. Do momento em que o primeiro indivíduo saiu, aquele em azul (Figura 13g), à saída do último, o violeta (Figura 13j), passou-se em torno de 10 segundos. A primeira vista é pouco tempo, mas tal separação em casos de pouca visibilidade pode levar indivíduos a tentar a reentrada no local, acreditando que o ente querido ficou para trás. A reentrada, se levada a cabo, trará mais uma vítima potencial ao local perigoso e retardará o processo de saída dos outros. Não raro, pode causar confusão mental em algumas pessoas que não saberão mais qual rota seguir, pois, ficam indecisas ao ver alguém seguindo no contrafluxo.

Para realçar o efeito da turbulência sobre o deslocamento das pessoas em uma multidão, interligam-se as posições ocupadas pelos indivíduos ao longo de cada fotografia na Figura 13. Do início da análise até a passagem através da saída de emergência, os indivíduos percorrem um caminho, que na melhor das hipóteses, é aquele esquematizado na Figura 14. Se fosse viável refinar melhor a trajetória, incluindo mais figuras intermediárias, seriam observadas rotas ainda mais tortuosas.

Figura 14: Análise das trajetórias individuais devido ao efeito de turbulência.



Fonte: do Autor.

Analisando a fundo a Figura 13, observa-se a existência de um padrão de deslocamento, como se fossem ondas humanas que vão e vem, da direita para esquerda e vice-versa, como será analisado a seguir, tomando como referência geométrica o ponto de

vista do leitor. Partindo-se dos círculos coloridos, nota-se que os dois primeiros seguimentos de reta estão direcionados preponderantemente para a direita. Infere-se que uma onda, superposta aos movimentos individualizados, carregou a multidão lateralmente para a direita. Com a compactação das pessoas na região mais à direita, ocorre o aumento de densidade e da pressão, gerando, como reação, uma onda para a esquerda (terceiro e quarto seguimentos de reta). O processo se repete mais uma vez, implicando na terceira onda, novamente direcionada à direita. É nesta última onda que surgem as condições favoráveis à saída dos indivíduos destacados em vermelho e violeta, os últimos a sair.

## 4.2 RESULTADOS SIMULADOS

Neste ponto, concentram-se as análises nos resultados simulados, para os quais foi utilizado o modelo de simulação explorado na Seção 3.2, gentilmente cedido pelo pesquisador Illes Farkas, um dos autores do artigo para Revista Nature do ano 2000 (HELBING; FARKAS; VICSEK, 2000). O *Simulation package for pedestrian escape panic*<sup>2</sup>, aqui nomeado apenas *PanicPackage*, foi escolhido pelos seguintes fatores:

- a) representação simples do local de reunião de público e dos indivíduos;
- b) permite incluir pilar no espaço de simulação;
- c) *software* roda em ambiente linux;
- d) proprietário o cedeu sem custos;
- e) boa aceitação destes pesquisadores no meio acadêmico.

Os valores referentes às variáveis descritas na Seção 3.2 e outras configurações pertinentes às simulações estão elencadas na Tabela 2.

O objetivo da simulação é representar o mais fidedignamente possível o ambiente experimental, buscando primeiro, validar seus resultados sob a ótica dos resultados obtidos experimentalmente. A Figura 15 apresenta uma fotografia da tela de simulação, a qual foi programada para replicar o experimento descrito na Seção 3.1. Os dois parâmetros variáveis da Tabela 2, largura da saída e lotação, foram configurados em 1,12 m e 280 pessoas, respectivamente. Portanto, esta é a tela da simulação que representa uma densidade populacional inicial de 4 p/m<sup>2</sup>.

Inicialmente, para alinhar a simulação aos experimentos, realizam-se simulações com 35, 70, 105, 140, 175, 210, 245 e 280 pessoas, mantendo a abertura de 1,12 m. O tempo total de evacuação, experimental (Tabela 1) e simulado, está plotado em função da

---

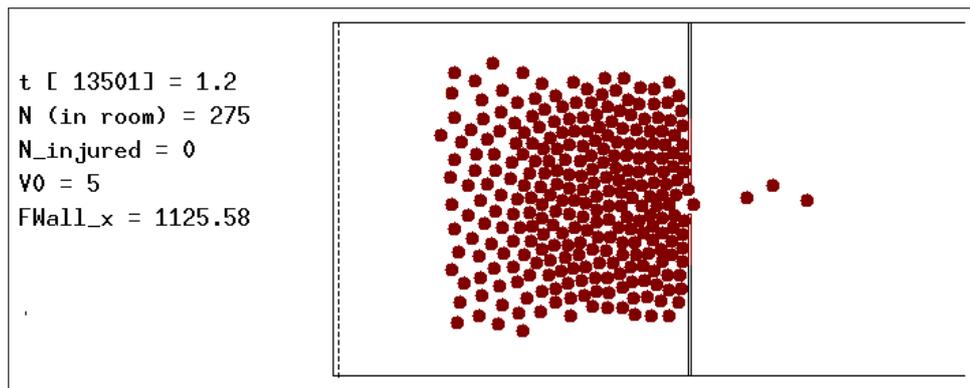
<sup>2</sup>Pacote de simulação para evacuação de pedestres em pânico

Tabela 2: Parâmetros de simulação

descrição	símbolo	valor	unidade
massa	m	80,0	kg
tempo de reação	$\tau_i$	0,5	s
amplitude de $f_{psic}$	$A_i$	25	N
constante de espaço de $f_{psic}$	$B_i$	0,08	m
constante	k	$1,2 \cdot 10^5$	$\text{kg}\cdot\text{s}^{-2}$
constante de fricção	$\kappa$	$3,0 \cdot 10^3$	$\text{kg m}^{-1}\text{s}^{-1}$
largura do indivíduo	$2 r_i$	0,5	m
velocidade desejada	$v_i^0$	5,0	m/s
velocidade da fumaça	$V_{Smoke}$	0,5	m/s
lotação	$N_0$	variável	
largura da saída	l	variável	m
largura da parede	$l_p$	0,15	m

Fonte: configuração das simulações de Helbing, Farkas e Vicsek (2000)

Figura 15: Tela de simulação configurada para representar o experimento.



Fonte: do Autor.

densidade inicial no *hall* do ginásio no Gráfico 2. Calcula-se também o erro percentual relativo o qual é dado por

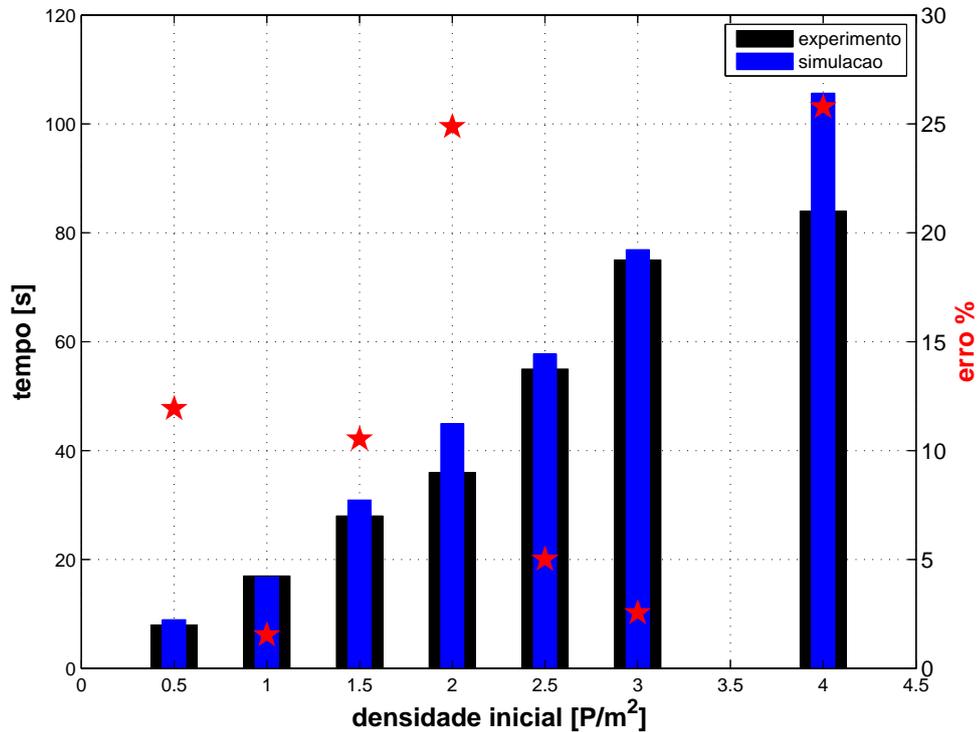
$$Erro = 100 \cdot \left| \frac{t_{sim} - t_{exp}}{t_{exp}} \right|, \quad (3)$$

onde  $t_{sim}$  é o tempo de evacuação total obtido nas simulações e  $t_{exp}$  o correspondente aos experimentos.

Analisando os resultados do Gráfico 2, e retomando a discussão iniciada na Subseção 4.1.1, chega-se as seguintes conclusões:

- em baixas densidades,  $0,5 \text{ p/m}^2$  e  $1,5 \text{ p/m}^2$ , a simulação apresentou erros em torno de 10 %, e 2 % para  $1 \text{ p/m}^2$ ; para esta faixa considera-se a que a capacidade da simulação em representar o experimento é apenas aceitável;

Gráfico 2: Tempo total de evacuação, experimental e simulado, e erro relativo, em função da lotação.



Fonte: do Autor.

- b) em densidades e pressões elevadas, observados nos ensaios de 2,5 e 3 p/m<sup>2</sup>, o erro percentual ficou abaixo de 5 %; considera-se que nesta faixa a simulação é uma boa representação do experimento, e portanto, as próximas simulações utilizarão estas duas condições preferencialmente;
- c) em densidades elevadas porém com pressões aquém do esperado no interior da multidão, observados nos ensaios de 2 e 4 p/m<sup>2</sup>, o erro percentual ficou em torno de 25 %; considera-se que nesta faixa a simulação não representa o experimento;
- d) porém, ela é capaz de definir a parcela devida à pressão dentro da multidão na composição do tempo total de evacuação; é razoável considerar que se as pressões fossem mantidas nos experimentos de 2 e 4 p/m<sup>2</sup> como o foi nos experimentos com 2,5 e 3 p/m<sup>2</sup>, os primeiros oscilariam na mesma faixa de erro dos últimos, ou seja, 5 %;
- e) assim, pode-se inferir que a maior culpada pela redução remanescente de aproximadamente 20 % no tempo de evacuação experimental é a redução das pressões na multidão;

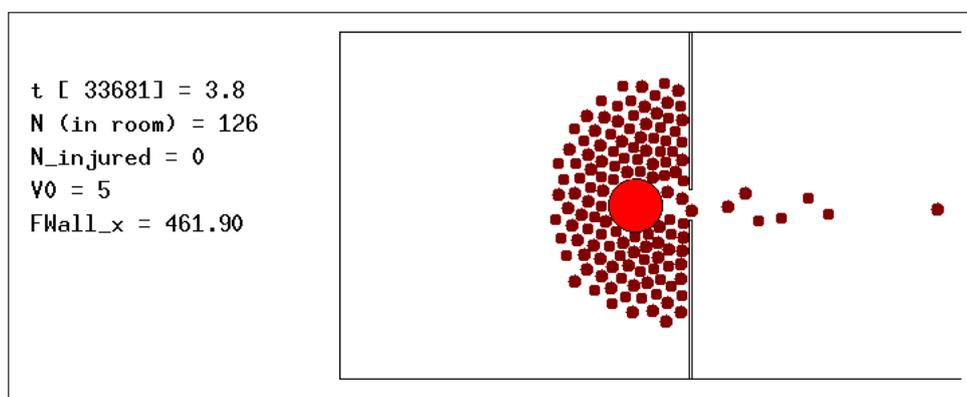
Das análises acima, pode-se concluir duas causas principais para os distúrbios relacionados à evacuação urgente com formação de bloqueios: largura da saída inadequada

e surgimento de pressões excessivas dentro da multidão. A Seção 4.2.1 apresenta os resultados de simulação da aplicação de um pilar hipotético defronte à saída de emergência, diminuindo as pressões dentro da multidão e o tempo de evacuação. A Seção 4.2.2 simula a evacuação de 210 pessoas através de diferentes cenários de larguras das saídas, concluindo a respeito da influência deste fator sobre o tempo de evacuação.

#### 4.2.1 Obstáculo dissipador da pressão na multidão

Após validada a simulação com os dados experimentais (dentro de uma margem de erro aceitável), pode-se prosseguir a análise implementando cenários simulados em computador, os quais não exigem a necessidade de reunir pessoas para experimentos ou mesmo, construir ou reconfigurar edificações para testá-las. Neste contexto, inicia-se a análise pela verificação da influência da inclusão de um obstáculo, próximo a saída de emergência, o qual, em tese, melhoraria o tempo de evacuação. Segundo Helbing, Farkas e Vicsek (2000), a pressão sobre as pessoas nas proximidades das saídas pode ser reduzida com a introdução de um obstáculo defronte a porta, o qual absorveria boa parte das forças impostas pela multidão à retaguarda, conforme fotografia da tela de simulação na Figura 16.

Figura 16: Tela de simulação incluindo uma coluna próxima a saída anteparo que reduz a formação de arcos a frente da saída de emergência.

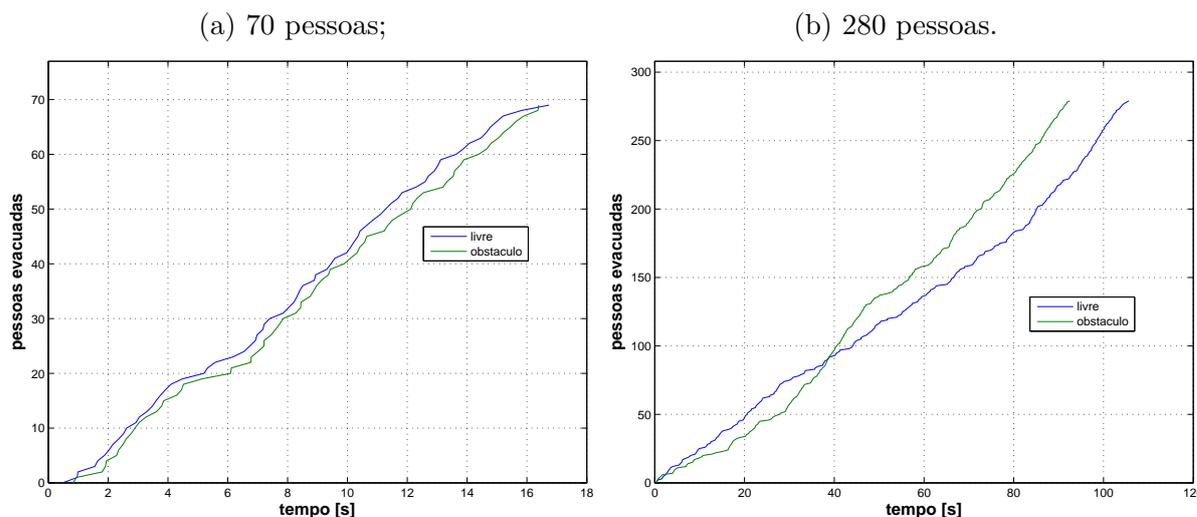


Fonte: do Autor.

O pilar acrescentado ao experimento foi configurado com 2 m de diâmetro e seu centro está 2 m do vão de saída. Para uma lotação de 70 pessoas, ou seja, densidade de  $1 \text{ p/m}^2$ , a presença do obstáculo aumentou levemente o tempo de evacuação, conforme mostra a Figura 17a. O pilar em frente a saída aumenta o percurso médio e, portanto, as pessoas levariam um tempo ligeiramente maior para sair.

Com a lotação inicial de 280 pessoas, resultado apresentado na Figura 17b, a presença do obstáculo mostrou-se decisiva a partir dos 38 segundos da evacuação. Deste ponto em diante mais pessoas foram evacuadas comparativamente ao ensaio com

Figura 17: Curva de de evacuação simulada com obstáculo defronte a saída de emergência com:



Fonte: do Autor.

saída livre de obstáculos. Pela simulação, o tempo total de evacuação foi reduzido em aproximadamente 12 %. Aumentando-se a lotação, os benefícios são maiores. Testes mostram que, para uma população de 350 pessoas, o tempo de evacuação foi reduzido em aproximadamente em 17 % após a inserção do pilar virtual.

#### 4.2.2 Influência da largura do vão da saída

Pela Equação 2, apresentada na Seção 2.4, o fluxo de pessoas através da saída é diretamente proporcional à largura da porta. Seja o mesmo local de reunião de público anteriormente simulado, agora com abertura de saída variável e livre de obstáculos, e com lotação inicial fixada em 210 pessoas, ou seja, densidade de 3 p/m<sup>2</sup>. Com o objetivo de obter uma relação matemática entre a abertura da saída e o tempo de evacuação, nas condições acima apresentadas, os seguintes valores para a largura  $l$  da saída são selecionados

- a) 55 cm (1 u.p.);
- b) 80 cm (porta comum);
- c) 120 cm (mínimo recomendado para uma saída de emergência<sup>3</sup>);
- d) 200 cm (abertura exigida em uma das saídas nos locais de reunião de público<sup>4</sup>);
- e) 240 cm (abertura exigida para hospitais<sup>5</sup>);
- f) 275 cm (5 u.p.);

<sup>3</sup>Inciso III do Art. 210, em Santa Catarina (1992, p. 43).

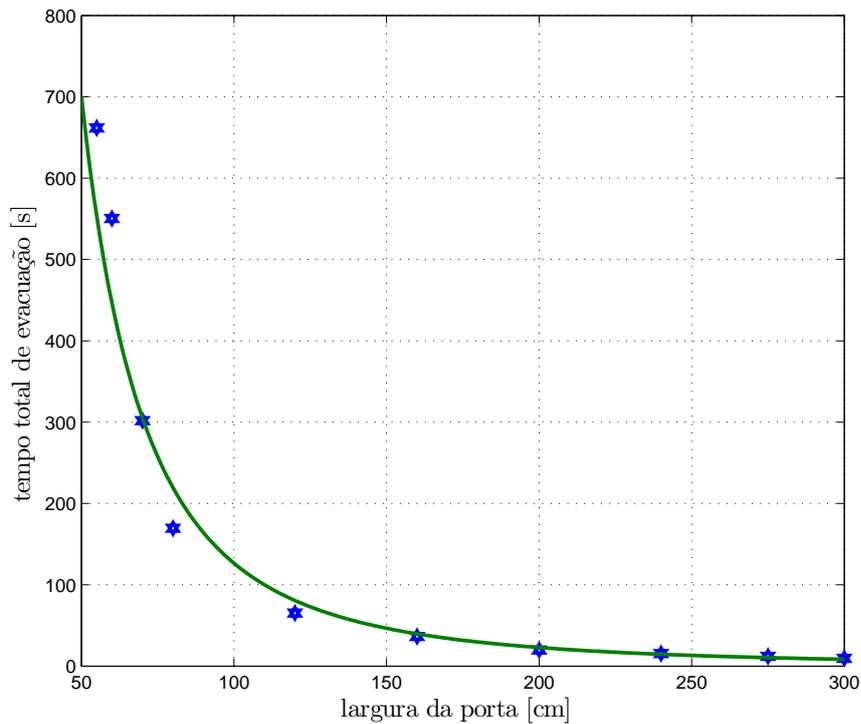
<sup>4</sup>Alínea i, inciso XI do Art. 23, em Santa Catarina (1992, p. 13).

<sup>5</sup>Inciso VII do Art. 204, em Santa Catarina (1992, p. 42).

g) 60, 70, 160 e 300 cm (usados para refinar a interpolação).

Simulando estes valores de aberturas da saída (resultados numéricos nas Tabelas 4 - 8), obtêm-se a influência desta variável sobre o tempo total de evacuação, conforme apresenta o Gráfico 3.

Gráfico 3: Tempo de evacuação simulado em função da larguras da saída



Fonte: do Autor.

A linha de tendência geométrica é a melhor interpolação existente para este resultado. O coeficiente de determinação ficou em torno de 0,99, o que significa uma ótima aproximação da curva com os dados. Seja a equação

$$t_{evac}(l) = \alpha l^{-\beta}, \quad (4)$$

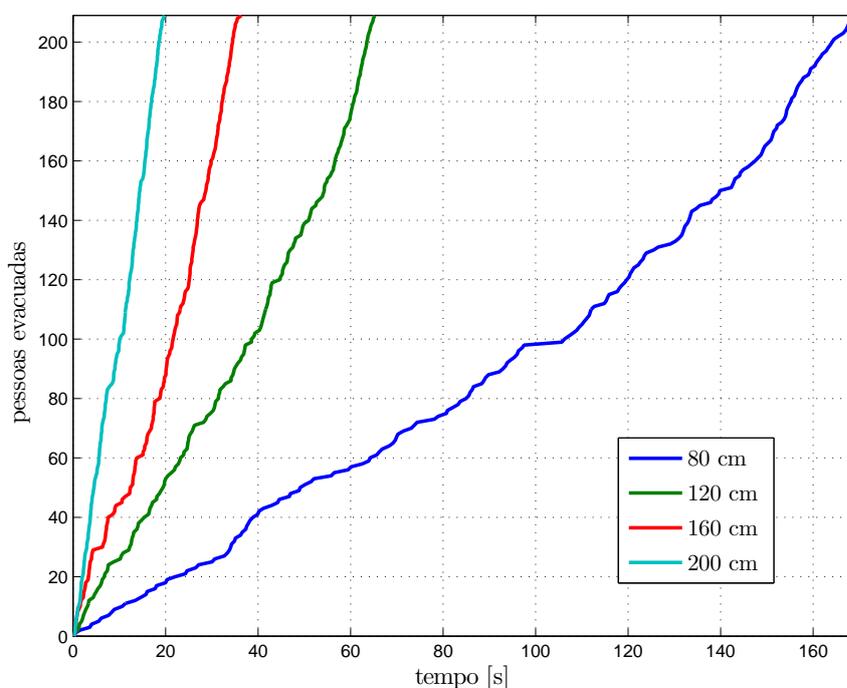
onde  $l$  é a variável largura da saída dada em centímetros;  $\alpha$  (10950689,7325174) e  $\beta$  (2,4686350305), são as constantes dadas pela linha de tendência do tipo geométrica. Os resultados apresentados não seguem uma relação linear como os valores esperados pelas normas. Dobrar a saída de emergência, segundo a NSCI/94, acarretaria dividir o tempo de evacuação pela metade. Todavia o que se observa na Figura 3 é uma variação descontínua. De acordo com as simulações, para uma porta com vão de 60 cm, seriam necessários em torno de 550,37 s para que 210 pessoas evacuem o ambiente. Duplicando-se o tamanho da abertura (120 cm), esta mesma população levaria 65,24 s para sair, ou seja, a evacuação seria em torno de 8,5 vezes mais rápida, quando na verdade foi acrescentado pouco mais

que uma unidade de passagem. Se dobrássemos mais uma vez a saída, chegando aos 240 cm de largura, a evacuação total dos mesmos 210 indivíduos se completaria em 15,5 s, ou seja, 4,2 mais rápida.

#### 4.2.2.1 Por que a relação entre abertura da saída e tempo de evacuação não é linear?

A abertura da saída e tempo de evacuação não segue uma sequência linear, portanto, deve-se aprofundar a análise em algumas das curvas de evacuação dos experimentos apresentados no Gráfico 3. Os quatro cenários escolhidos, portas de 80, 120, 160 e 200 centímetros, cujos resultados numéricos são dados no Anexo B.1, têm suas curvas de evacuação apresentadas no Gráfico 4.

Gráfico 4: Perfil da evacuação simulada para as aberturas de 80, 120, 160 e 200 cm

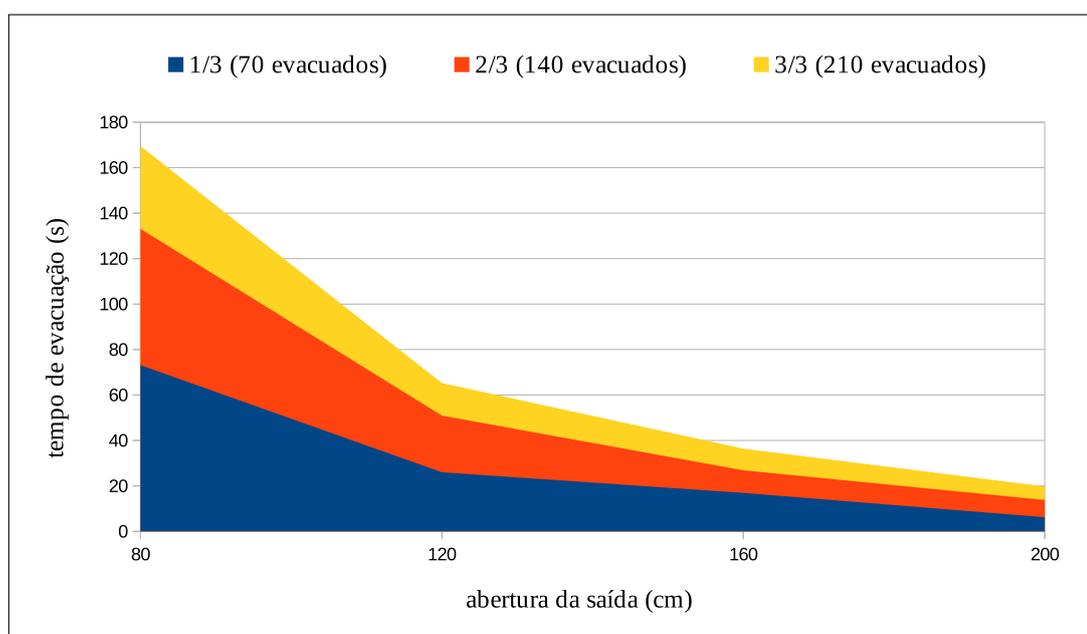


Fonte: do Autor.

Inicia-se a análise da Figura 4 pela direita, ou seja, do pior cenário, onde a abertura é de apenas 80 cm e o tempo de evacuação total aproxima-se de 169,53 s, para o melhor cenário. De acordo com os resultados, um primeiro incremento de 40 cm na largura da porta de saída causaria uma redução de 105,29 s no tempo de evacuação dos mesmos 210. Dois novos incrementos subsequentes ao tamanho da porta corresponderiam a deduções de 28,96 s e 16,62 s, respectivamente. Portanto, ao incrementar a largura das saídas em um dado valor constante, as maiores reduções no tempo de evacuação são observadas nas portas consideradas pequenas, por exemplo, aquelas cujo vão é de 80 cm, comuns em ambientes internos de residências, escolas, escritórios.

Os resultados da Seção 4.2 mostraram que a evacuação tende a acelerar com a saída das pessoas. A Figura 5 traz informações a respeito do perfil da evacuação, dividindo-a em três etapas (relacionadas aos indivíduos evacuados): primeira (0 a 70), segundo (70 a 140) e terceiro (140 a 210).

Gráfico 5: Tempo de evacuação em função da abertura, dividido em três etapas iguais: até a saída de 70, 140 e 210 pessoas.



Fonte: do Autor.

Por exemplo, para uma abertura de 80 cm, os 70 primeiros a sair, área em azul, levam pouco mais que o dobro do tempo para sair comparado aos 70 últimos, área amarela. Tal fato é decorrente da maior frequência e intensidade dos bloqueios na saída de emergência, os quais são reduzidos a medida que as pessoas vão saindo. Tal efeito se mostrou bem menos acentuado para maiores aberturas da porta. Para uma porta de 200 cm, praticamente não se observa diferenças entre os tempos nas três etapas.

Portanto, quanto maior a abertura, maior é o fluxo de pessoas através da saída, menores são as pressões exercidas no interior da multidão e mais contínua é a evacuação. Desta forma, os efeitos da pressão exercida pelos indivíduos à retaguarda, abordados na Subseção 4.1.2, são menos frequentes.

#### 4.2.2.2 Se existirem duas portas, como dimensioná-las?

Seja um caso hipotético onde está se projetando um local de reunião de público para ser o mais seguro possível. Dispõe-se de material suficiente para construir apenas 280 cm de aberturas distribuídas em duas saídas diametralmente opostas, as quais, não podem ser menor do que uma porta de 80 cm. O objeto é um salão de danças, sem obstáculos

internos para que as pessoas possam dançar livremente, com área útil de 140 m<sup>2</sup> e uma densidade populacional de 3 p/m<sup>2</sup>. Imaginando o projeto pronto com as 420 pessoas igualmente distribuídas pelo ambiente quando ocorre um evento (princípio de incêndio ou um atirador, por exemplo) a meio caminho entre as duas portas, o qual faz com que todos busquem a saída mais próxima. Qual combinação de portas traria mais segurança ao público para este caso? Uma porta grande e outra pequena (Cenário A), ou duas com tamanhos mais próximos (Cenário B)?

**Premissa I: público divide-se entre as portas.** Como discutido ao final da Subseção 2.4.2.1, o grau de pânico, segundo, Helbing, Farkas e Vicsek (2000), é um fator que indica a tendência dos indivíduos em escolher a saída por si ou seguir seus vizinhos próximos. Para um comportamento de multidão individualista, as duas saídas possuem uso praticamente iguais (vide Figura 4). Seguindo esta premissa, a hipótese acima considera que as pessoas, com comportamento individualistas, irão buscar a porta mais próxima da sua posição. Dada a distribuição igualitária no salão, a busca pelas saídas esquerda e direita, inicialmente, será equilibrada.

**Premissa II: composição de simulações individuais.** Propõe-se aqui analisar uma evacuação de emergência para cenários com duas portas, mesmo sem possuir o software que calcule a evacuação por duas saídas. Para tal, faz-se duas simulações individuais, ambas com metade da lotação e área do salão, e cada qual com uma largura de porta. Pode-se estimar o tempo de evacuação restante para uma determinada porta congestionada por  $N_p$  indivíduos<sup>6</sup>, por meio da Figura 4, ou da Tabela 7.

**Premissa III: sem visibilidade no local.** Nos casos onde as pessoas não enxergam a outra porta, permanecerão lutando para sair pela saída mesmo que congestionada.

**Premissa IV: visibilidade e não bloqueio da rota entre portas.** Nos casos onde sua saída está congestionada, o indivíduo, ao perceber a outra porta vazia, poderá tomar a decisão de atravessar o salão<sup>7</sup>. Será considerado que a metade final dos indivíduos em uma dada porta congestionada iniciará o deslocamento a uma velocidade média de 1,5 m/s (Subseção 2.4.2.1) e por uma distância de 18 m, assim que a outra porta for totalmente liberada. Portanto, quando houver uma travessia, será considerado que a metade dos

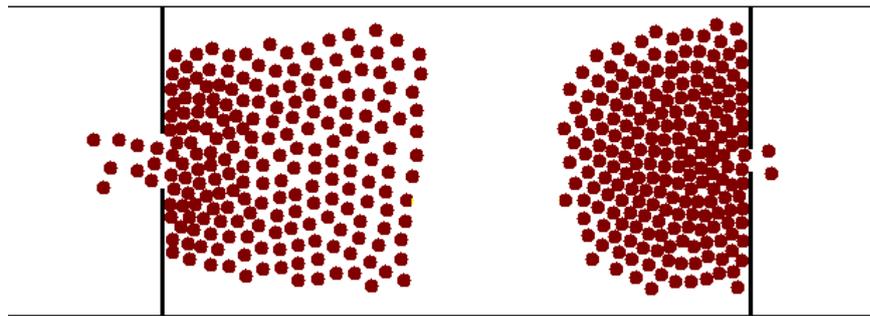
<sup>6</sup>Se existirem  $N_p$  pessoas a frente de uma porta, elas sairão conforme o mesmo perfil de apresentado pelos  $N_p$  últimos indivíduos da curva de evacuação na Figura 4. Por exemplo, se 30 indivíduos chegarem ao mesmo tempo à porta de 120 cm, a qual estava inicialmente vazia, o tempo de evacuação destas será calculado pelos últimos 30 indivíduos da Tabela 7, ou seja, será igual a diferença  $t_{120cm}(210) - t_{120cm}(180)$ .

<sup>7</sup>O deslocamento através do salão após constatado que a outra saída está liberada, é aqui denominada apenas **travessia**.

indivíduos que estavam a frente de uma porta congestionada estarão na outra porta após 12 s. Isso aumentará o fluxo da porta congestionada, pois o número de pessoas pressionando para sair caiu a metade.

**Cenário A.** Seja a primeira opção um cenário com uma porta de 200 cm à esquerda e outra de 80 cm à direita, conforme Figura 18.

Figura 18: Tela com simulação do Cenário A: portas de 200 cm e 80 cm.

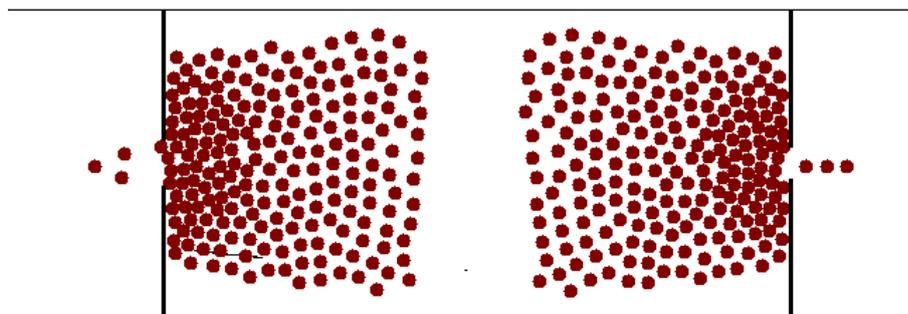


Fonte: do Autor.

No cenário da Figura 18 espera-se que em torno de 20 segundos, e sob um fluxo médio<sup>8</sup>  $\overline{J_{evac}} > 10$  p/s contendo os dados de fluxo médio e tempo de evacuação, todos aqueles que estavam mais à esquerda no local de reunião de público tenham evacuado o ambiente. As pessoas à direita, sofrem ao passar pela porta de 80 cm, a qual possui fluxo médio  $\overline{J_{evac}}$  em torno de 1 p/s, o que causa a formação de grandes pressões na multidão próximo a esta saída, desenvolvendo os fenômenos identificados na Seção 4.1.2. O último indivíduo sairá apenas após 169,53 s.

**Cenário B.** Seja a segunda opção um cenário com uma duas portas médias, uma de 160 cm à esquerda e outra de 120 cm à direita, conforme Figura 19.

Figura 19: Tela com simulação do Cenário B: portas de 160 cm e 120 cm.



Fonte: do Autor.

<sup>8</sup>Verificar Tabela 3

No cenário da Figura 19 a saída pelas duas portas é mais equilibrada, sendo o fluxo médio  $\overline{J_{evac}}$  igual a 5,8 e 3,2 p/s. Da mesma forma, o último indivíduo a sair neste cenário o fará pela porta de 120 cm, após passados 65,24 s do início do evento. O último a sair pela outra porta o faz em 36,38 s.

**Conclusão da hipótese: o projeto mais seguro.** Comparando os cenários A e B, sob a ótica dos resultados tabelados no Apêndice B.1, chega-se às seguintes conclusões a respeito da efetiva segurança que estes cenários podem proporcionar quanto a distribuição do tamanho das saídas de emergência:

- a) nas condições da Premissa III, no momento que o **cenário B** estiver totalmente evacuado, 149 pessoas estarão tentando sair pela porta de 80 cm do cenário A, e só o conseguirão 104,29 segundos mais tarde;
- b) nas condições da Premissa IV, a primeira travessia no cenário A ocorrerá a 19,76 s, quando 210 pessoas já saíram pela porta de 200 cm. Até então, apenas 18 indivíduos teriam saído pela porta de 80 cm. Portanto, 96 indivíduos permanecerão nesta porta e outros 96 levarão 12 s para atingir a outra porta e mais 8,05 s para sair por ela. Nestes 20,05 s, mais 32 conseguiram passar pela porta pequena. Passados 39,81 s após o início da evacuação, tem-se 64 pessoas defronte a porta pequena. Ocorre a segunda travessia, 32 pessoas permanecem no local, os quais levam 15,24 s para sair pela porta. Paralelamente, os 32 que empreitaram a segunda levam 12 s no deslocamento e 3,07 para sair. Portanto, nas condições da Premissa IV, o Cenário A seria evacuado em 55,05 s;
- c) nas condições da Premissa IV, o Cenário B terá a evacuação completa dos 210 indivíduos que inicialmente estavam mais próximos da porta de 160 cm após transcorridos 36,38 s. Em paralelo, 94 pessoas teriam saído pela porta de 120 cm. Após totalmente liberada a porta de 160 cm, dos 116 restantes a frente da porta de 120 cm, 58 empreendem a travessia, a qual leva 12 s, e saem pela porta de 160 cm após 7,56 s. Nesse ínterim, todos que continuaram a evacuação pela de 120 cm já haviam saído, pois fora necessário apenas 10,91 s. Portanto, nas condições da Premissa IV, o Cenário B seria evacuado em 43,94 s.

Seja em condições de visibilidade ou não, o cenário com os tamanhos de portas mais equilibrados, Cenário B, apresentou as melhores condições de evacuação. Portanto, o projetista deveria equalizar ao máximo as aberturas, utilizando para esta análise, uma de 160 cm e outra de 120 cm. Pode-se inferir diretamente que duas portas de tamanhos iguais trariam resultados ainda melhores.

**Cenário C** Para verificar esta afirmação, foi realizada uma simulação com porta de 140 cm, resultado adicionado às tabelas do Apêndice B. A evacuação se completa em 39,55 s, ou seja, em comparação ao Cenário B a redução no tempo total de evacuação foi de 65 % (Premissa III) e de 11% (Premissa IV).

### 4.3 ANÁLISE DA NORMATIZAÇÃO

Esta seção traz uma análise da NSCI/94, norma vigente no Estado de Santa Catarina para prevenção e contra incêndio e pânico, com fulcro nos resultados deste trabalho. As questões normativas serão tratadas nas seguintes subseções:

- a) previsibilidade do tempo de evacuação (Subseção 4.3.1);
- b) controle de lotação (Subseção 4.3.2);
- c) ordenamento de público (Subseção 4.3.3);
- d) largura das saídas de emergência (Subseção 4.3.4);
- e) análise normativa de um caso real, a boate Kiss (Subseção 4.3.5).

#### 4.3.1 Previsibilidade do tempo de evacuação

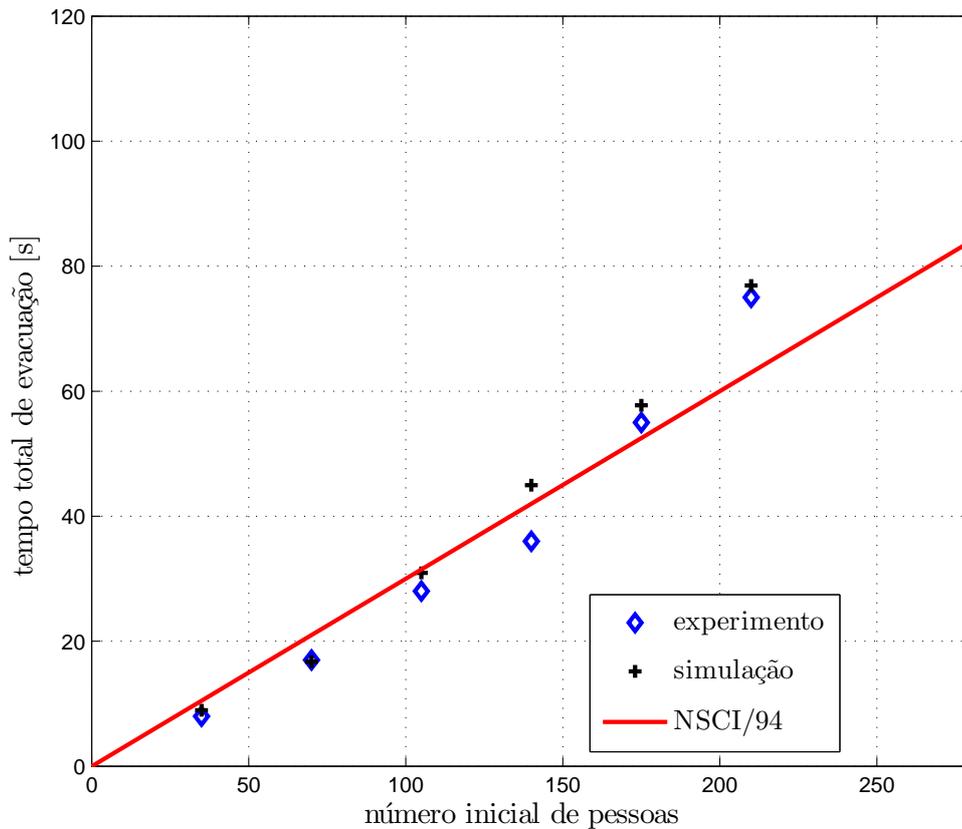
Imaginando o hall do ginásio do Centro de Ensino Bombeiro Militar como uma casa noturna com sua área útil de  $70 \text{ m}^2$ , a norma catarinense vigente (Seção 2.2.1) considera a saída disponível (1,12 m de largura) igual a duas unidades de passagem e define a lotação máxima, pelo critério da largura total das saídas disponíveis, conforme a Equação 1, a qual pode ser reordenada como

$$P = N.Ca = 2.100 = 200 \text{ pessoas.} \quad (5)$$

Portanto, o número 200 significa mais que a lotação máxima permitida para este local; significa que, a cada minuto, 200 pessoas são capazes de sair ordenadamente pela saída. Este resultado é baseado na premissa que para saídas de emergência de locais de reunião de público uma dada fila de 100 pessoas, as quais se deslocam a uma média de 1,25 m/s e estão separadas uma da outra por 1 m de distância, terá ultrapassado a saída de emergência ao término de um minuto. Tal evacuação é imaginada como ordenada, com ameaça iminente a vida e as pessoas em suas condições fisiológicas e psico-sociais dentro da normalidade. Seria esta a realidade?

Para responder a esta pergunta, o Gráfico 6 compara o tempo total de evacuação (em função da lotação) calculado pela Equação 5 com os resultados da Figura 2.

Gráfico 6: NSCI e os tempos de evacuação em função da lotação.



Fonte: do Autor.

Para densidades inferiores a 2 pessoas por unidade de área, o Gráfico 6 demonstra como a norma (reta vermelha) prevê um tempo de evacuação maior daquele obtido nos experimentos e simulação. Para maiores densidades, o tempo de evacuação está acima da linha vermelha.

Já o fluxo médio  $\overline{J_{evac}}$  esperado é igual a 2,5 pessoas passando pela saída a cada segundo. O pior dos resultados experimentais para o fluxo, no ensaio F, foi de 3,33 p/s.

Resultados de tempo de evacuação total e fluxo médio melhores que o previsto pela NSCI indicam que a evacuação apressada é mais rápida que a ordenada, se esta última ocorrer nas condições definidas acima pela norma. Para discutir este aspecto mais profundamente, é necessário realizar experimentos com pessoas saindo ordenadamente por uma dada saída, o que é recomendado para trabalhos futuros.

#### 4.3.2 Controle de lotação

Um critério complementar, relacionado ao Sistema de Saída de Emergência, define que locais de reunião de público como bares, restaurantes, boates e assimilados, não

podem ter lotação superior ao correspondente à densidade populacional de 1 p/m<sup>2</sup> <sup>9</sup>.

Na prática, uma festa com menos de 2 p/m<sup>2</sup> é considerada "fraca", e portanto, tem pouco apelo comercial. Atualmente é difícil controlar se as casas noturnas limitam o número de indivíduos dentro de suas dependências. Este trabalho mostrou que densidade superiores a 2 p/m<sup>2</sup> já apresentam grande ocorrência dos fenômenos de multidão, que no mínimo, podem ser responsáveis por lesões nas pessoas durante evacuações desordenadas.

Relacionado ao controle de público, o Art. 4º, parágrafo 2º, traz em seus incisos X e XI duas novas exigências conforme Santa Catarina (2013, p. 2):

**Planta de emergência.** Mapa com a localização das saídas e quais devem ser acessadas a partir da posição dentro do local; podem conter dicas de como proceder em caso de emergência tais como tentar permanecer calmo e não empurrar as pessoas à frente, ações estas que ajudam a evitar os problemas relacionados a evacuação urgente.

**Sistema informatizado de controle e registro de público.** Permitirá ao Corpo de Bombeiros Militar de Santa Catarina fiscalizar os locais de reunião de público verificando, seja em tempo real para evitar tragédias, ou *offline* para servir como norte para campanhas informativas ou até mesmo gerar sanções às casas que rotineiramente ultrapassarem a lotação para qual foram liberadas.

#### 4.3.3 Ordenamento de público

A adição de um obstáculo à frente da saída de emergência, o qual reduz as pressões sobre a multidão, conflita com o Art. 8 inciso II da NSCI, que, conforme discutido na Subseção 2.2.1, afirma que as passagens e devem permanecer desobstruídas. A rota de fuga livre permite aos usuários deslocarem-se até a saída sem os riscos de quedas e aprisionamentos durante a saída urgente. Sob este aspecto, deve-se prever um obstáculo que seja capaz de evitar a formação de elevadas pressões sem comprometer a segurança e visibilidade das pessoas durante a saída urgente. Relembrando que a inserção do obstáculo nas simulações trouxe reduções na ordem de 12 % no tempo de evacuação para um local de reunião de público com lotação de 280 pessoas e saída única de 1,12 m.

#### 4.3.4 Larguras das saídas de emergência

Quanto a determinação do tamanho da saída de emergência a ser adotado, faz-se a seguinte análise:

---

<sup>9</sup>Vide destaque no Anexo F da NSCI, o qual está replicada no Quadro 4

**Tamanho da unidade de passagem.** A unidade de passagem, fixada em 55 cm pela NSCI (Subseção 2.2.1), é adequada para saídas ordenadas. O valor de 50 cm para a largura ombro a ombro, média dos indivíduos do experimento (vide Apêndice A), foi utilizado como o diâmetro das partículas que representam as pessoas nas simulações, apresentando trouxe pequenos erros. Desta forma, propõe-se um estudo mais aprofundado a respeito do melhor valor para unidade de passagem.

**Distribuição das aberturas.** O inciso XI do Art. 23 da NSCI exige uma saída de 2,00 m e outra com tamanho calculado de acordo com o número de unidades de passagens, sem definir uma distribuição equilibrada de aberturas entre as duas portas. Em alguns casos, pode-se ter condições semelhantes às aquelas discutidas nos resultados do Cenário A (ao término da Seção 4.2.2), onde os tempos de evacuação foram muito maiores comparados ao Cenário B, onde a largura das duas saídas de emergência era mais equilibrada. Para a segurança do público é importante que se tenha duas saídas bem afastadas, porém todas as duas devem ser dimensionadas para dar uma boa vazão à multidão em fuga.

#### 4.3.5 Análise normativa de um caso real, a boate Kiss

Segundo o Projeto de Segurança Contra Incêndio 3106/1, de 26 de junho de 2009, a boate Kiss possui uma área útil de  $615 \text{ m}^2$  (CREA-RS, 2013, p. 10). Pelo anexo I do relatório descrito em Rio Grande do Sul (2013), 125 testemunhas afirmaram que certamente havia mais de mil pessoas no local no momento do incêndio. Para fins desta análise será considerado que mil indivíduos estavam no local no início do incêndio. Conforme descrito na Seção 2.1.1, a saída disponível correspondia a dois vãos (175 cm e 160 cm) separados por uma divisória central fixa de 100 cm.

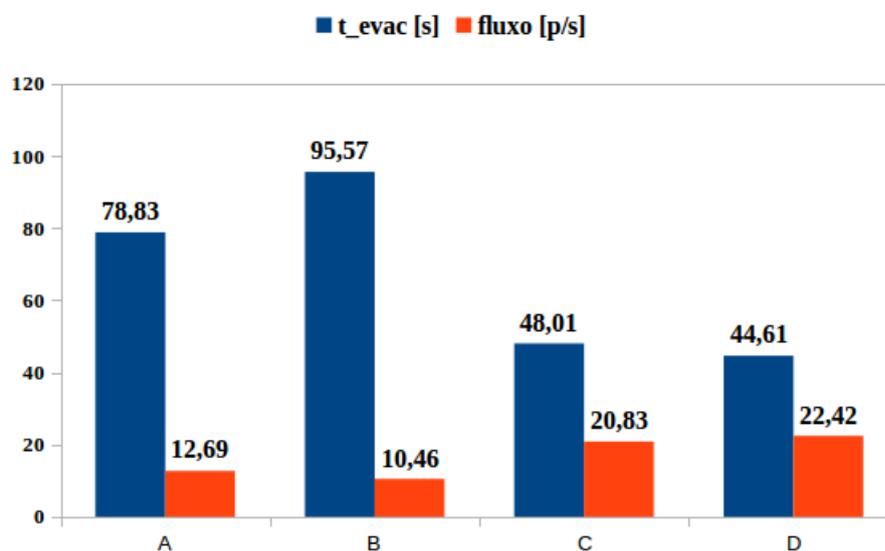
A NSCI consideraria tal configuração das saídas, de 1,75 m e outra de 1,60 m, como sendo de seis unidades de passagens no total. Portanto, pela Equação 5, a boate Kiss teria uma lotação máxima de 600 pessoas.

Considerando um cenário de simulação similar à boate Kiss quanto sua lotação, área útil e saídas, esta subseção analisa como as normas vigentes em Santa Catarina poderiam melhorar a evacuação. Para cumprir este objetivo realizam-se oito simulações, cujos parâmetros estão representados no Quadro 3.

A Simulação A é a configuração real da boate Kiss: 1000 pessoas, saída de emergência com dois vãos (175 cm e 160 cm) distante 1 m entre si (Figura 20a). A Simulação B traz duas portas de mesmo tamanho, porém dispostas nos extremos do local (Figura 20b). A Simulação C une os dois vãos em única saída de 335 cm (Figura 20c). Finalmente, a Simulação D, repete a simulação C acrescentando um obstáculo a frente da saída (Figura 20d). As simulações E, F, G e H seguem a mesma sequência, alterando-se



Gráfico 7: Resultados de simulações similares ao cenário da boate Kiss com 1000 pessoas.



Fonte: do Autor.

Este é o resultado da porta menor, 160 cm, que limita a evacuação. Por estarem as duas portas próximas na Simulação A, os indivíduos puderam se direcionar preferencialmente para a porta de 175 cm. Isso não significa que duas portas próximas é a melhor solução. Pelo contrário, o motivo principal de possuir saídas diametralmente opostas é reduzir o risco de ficar sem nenhum meio de escape.

A Simulação C, onde há apenas uma porta com abertura de 335 cm, completou a evacuação em 48,01 s, quase a metade da Simulação A. Portanto, se é para ter duas portas praticamente coladas, que se tenha logo uma única cujo vão é a soma total das aberturas.

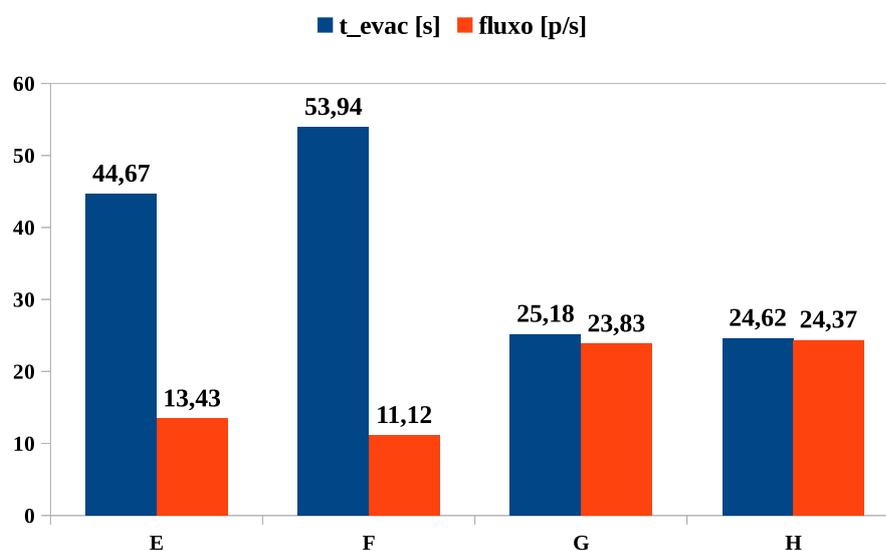
A Simulação D, na qual foi colocada um obstáculo a frente da porta, apresentou o melhor resultado de fluxo médio, mais de 22 pessoas saíam a cada segundo, ou seja, perto de 7,6 % melhor que com o caminho livre.

Os resultados das simulações listadas de E a G na Tabela 3 estão apresentados no Gráfico 8.

Para as simulações E, F, G e H houve um incremento relativo no fluxo médio de 5,6 %, 5,9 %, 12,6 % e 8,0 % comparado aos ensaio A, B, C e D, respectivamente. A redução da lotação de 1000 para 600 pessoas nas simulações, foi a responsável pela saída mais rápida.

O melhor cenário de evacuação para um local de público como a boate Kiss quanto ao critério tempo de evacuação é o H, onde uma porta única com vão de 335 cm e

Gráfico 8: Resultados de simulações similares ao cenário da boate Kiss com 600 pessoas.



Fonte: do Autor.

com o anteparo a sua frente é capaz de evacuar 600 pessoas em 24,62 s. Entretanto, dentre os cenários superlotados com 1000 pessoas, o melhor resultado é o D, onde a presença do anteparo é decisiva.

#### 4.4 SÍNTESE DOS RESULTADOS

Dos experimentos realizados em um local de reunião de público com uma única saída de 1,12 m, conclui-se que:

- o tempo de evacuação cresce geometricamente com o aumento da lotação inicial, sendo calculado pela Equação 1;
- o fluxo médio de pessoas através da saída decresce linearmente com o aumento da lotação inicial, sendo calculado através da Equação 2;
- a razão para não se ter um aumento linear no tempo de evacuação está nas pressões dentro da multidão, as quais se elevam sobremaneira com a densidade populacional; elas não foram medidas, apenas estimadas pelas fotografias.
- dos Ensaio D e G, nos quais as pessoas exerceram menor pressão, perdeu-se informação para a composição das linhas de tendência nos Gráficos 10a e 10b; porém, através destes Ensaios e de simulações subsequentes, foi possível estimar a influência da pressão sobre o tempo de evacuação; ficou caracterizado que a ausência de pressão reduziu o tempo de evacuação na ordem de 20 %;

- e) foi possível visualizar nos vídeos os fenômenos de multidão, formação de arcos de sustentação, turbulência e ondas; os quais já eram previstos para elevadas densidades conforme descrito na Subseção 2.3.2.
- f) a partir da turbulência, foi analisado como podem ocorrer separações de pessoas que formavam um grupo durante a evacuação e, como consequência, a reentrada em busca de entes queridos;
- g) na formação de arcos de sustentação, foi constatado o aprisionamento dos indivíduos junto às paredes, os quais podem ser esmagados caso as pressões sobre os arcos se elevem sem que ele se desfaça.

Das simulações conclui-se que:

- a) os erros entre os resultados simulados e o experimento, ficaram abaixo de 5 % nos ensaios B, E e F, pouco acima de 10 % nos ensaios A e C, e 25 % nos ensaios D e G;
- b) acrescentar um pilar próximo a saída de emergência, em condições de elevada densidade populacional, permite reduzir as pressões sobre as pessoas a frente da saída de emergência, reduzindo a ocorrência de obstruções. Para 280 pessoas, densidade de 4 p/m<sup>2</sup>, o tempo de evacuação foi reduzido em 12 %;
- c) o aumento da largura da saída de emergência implica na redução geométrica do tempo de evacuação nos moldes da Equação 4; as maiores reduções no tempo de evacuação para um dado incremento na abertura, são observadas nas portas consideradas pequenas; em outras palavras, se for escolher aumentar uma das portas, escolha invariavelmente a menor delas;
- d) através de uma análise hipotética de um local de reunião de público com duas saídas, chegou-se a conclusão que é melhor possuir duas portas médias a uma porta larga e outra estreita; em condições de visibilidade, a evacuação do Cenário A (200 cm e 80 cm) foi 25 % mais lenta que a do Cenário B (160 cm e 120 cm); sem visibilidade, onde as pessoas ao escolherem uma porta não voltam atrás, o Cenário B foi totalmente evacuado em 65,24 s enquanto que o Cenário A necessitou de 169,53 s, ou seja, 160 % maior;
- e) no limite, verificou-se que para um Cenário C composto por duas portas de mesma abertura (140 cm), a redução no tempo de evacuação, em comparação ao Cenário B, foi de 65 % (Premissa III) e de 11% (Premissa IV).

Da análise da norma Catarinense relacionada ao tema, e com fulcro nos resultados acima, conclui-se que:

- a) a norma não é capaz de prever, a partir da Equação 1, qual será o tempo de evacuação e o fluxo em evacuações urgentes sob elevada densidade;
- b) a superlotação, a qual é uma das responsáveis pela formação dos bloqueios da saída durante uma evacuação urgente, deve ser constantemente fiscalizada pelas autoridades; o controle automatizado da lotação em casas noturnas e assimilados, o qual está previsto na lei do Poder de Polícia do CBMSC, pode ser a solução para coibir os excessos, pois o bombeiro será alertado em tempo real sobre locais que estejam perigosamente superlotados; na prática, hoje tal aviso só seria possível por meio de denúncia;
- c) nas simulações simplificadas da boate Kiss, foi verificado que a redução da lotação de 1000 para 600 pessoas, nas mesmas condições das saídas de emergência existentes à época, o fluxo de pessoas saindo aumenta em 5,6 %;
- d) o ordenamento de público deve ser melhor explorado em estudos futuros, pois foi comprovado via simulação que um obstáculo a frente da saída de emergência ajuda a reduzir as pressões dentro da multidão, dando maior segurança e fluidez à evacuação; deve-se ter em mente que estes obstáculos devem ser projetados para não aprisionar ou derrubar os indivíduos durante a fuga;
- e) nos casos de maior concentração de público, quando não é possível evitar tais aglomerações, recomenda-se o uso do ordenador de público com fulcro nos resultados obtidos com o modelo simplificado da boate Kiss (Simulação D), onde mesmo com a existência de uma porta larga como a de 335 cm, o obstáculo à frente da saída aumentou o fluxo de pessoas em 7 %;
- f) as saídas de locais de reunião de público, devem ter seus tamanhos o mais equilibrado possível, lembrando que os ganhos expressivos no tempo total de evacuação estão no aumento da abertura de portas ainda estreitas, as quais constituem-se nos gargalos da evacuação; Isto deve ser considerado, principalmente, quando da elaboração de termos de ajustes de edificações antigas que queiram ser regularizadas;

## 5 CONCLUSÃO

A conclusão do trabalho é subdividida em três partes: retomada dos objetivos, respostas ao problema de pesquisa e considerações finais.

### 5.1 RETOMADA DOS OBJETIVOS

Com relação à pesquisa bibliográfica, a Seção 2.1 compilou diversos cenários catastróficos relacionados ao tema em estudo, em especial, a boate Kiss, tragédia que por um longo período servirá de norte para as regulamentações de sistema de saídas de emergência, cujo histórico e situação atual foram descritas na Seção 2.2. As seções 2.3 e 2.4, trouxeram a visão de pesquisadores sobre temas como comportamento humano, dinâmica de multidões e alguns dos métodos já empregados para estudar esta temática.

Os experimentos, os quais seguiram o procedimento metodológico dado na Seção 3.1, permitiram: calcular curvas de tendência para o tempo de evacuação total (aumento geométrico) e fluxo médio (redução linear), ambos em função da lotação de um local de reunião de público (Subseção 4.1.1); identificar nas filmagens a ocorrência dos arcos de sustentação e da turbulência, inferindo sobre algumas consequências que podem advir destes fenômenos (Subseção 4.1.1).

As simulações, as quais seguiram o procedimento metodológico dado na Seção 3.2, possibilitaram: recriar o experimento no computador, permitindo simular maiores aberturas nas saídas e a inclusão de obstáculos em frente a porta, verificando seus benefícios sobre o tempo de evacuação (Seção 4.2). A potencialidade do software foi aplicado para verificar se, e como, a aplicação de alguns elementos normativos da NSCI, poderia melhorar a evacuação de um cenário similar ao da boate Kiss (Subseção 4.3.5).

### 5.2 RESPONDENDO O PROBLEMA DE PESQUISA

**Quais fatores causam a obstrução das saídas de emergência e retardam a evacuação de pessoas em condições extremas?** Os clássicos, quantidade e disposição das saídas de emergência e a superpopulação dos locais de reunião de público, acrescido da pressão interna dentro da multidão próximo a uma saída de emergência, a qual é uma consequência destes fatores e do ordenamento interno do público. A escalada da pressão, do surgimento da necessidade de evacuação às condições que causam danos físicos às pessoas, pode ser ordenada como:

- a) os indivíduos deslocam-se para a saída com uma velocidade desejada, a qual tende a diminuir próximo a porta;
- b) pessoas atrás empurram, aumentando a densidade populacional próximo da porta e, conseqüentemente, a pressão;
- c) ocorre a formação de arcos de sustentação que bloqueiam a saída; eventualmente estes são quebrados permitindo a saída de grande quantidade de pessoas ao mesmo tempo, até que um novo arco se forme e bloqueie novamente a porta;
- d) as pessoas à retaguarda não percebem a dinâmica próximo a porta, apenas sentem a multidão à frente parada, e então, pressionam mais para sair;
- e) as pressões atingem níveis críticos, surgem os efeitos de ondas e de turbulência;
- f) a multidão se desloca involuntariamente de um lado a outro, como ondas, e sem direção definida, como em um turbilhão; os indivíduos perdem o controle de seu deslocamento, sendo apenas arrastados pela multidão;
- g) pessoas podem se esmagadas, aprisionadas contra obstáculos, cair e ser pisoteadas, tornando-se estas mesmas, obstáculos à saída dos demais.

**Existe algum remédio alternativo ao aumento das saídas de emergência?** Primeiro, há a possibilidade de se adicionar um obstáculo próximo a saída de emergência, o qual absorve a carga impressa pela multidão à retaguarda, diminuindo as pressões aplicadas sobre os indivíduos próximos a porta. Isso evita a formação dos arcos de sustentação, os bloqueios na saída e torna a evacuação mais contínua. Integrar este obstáculo à arquitetura do local é outra questão, que não foi foco deste trabalho. Segundo, se for aumentar a largura das saídas de emergência, se possível, deve-se fazê-lo visando equalizar a largura das saídas existentes, garantindo assim, que a multidão seja bem distribuída durante a evacuação. Terceiro, se o local de reunião de público for aprovado pelos bombeiros para receber uma certa quantidade de pessoas e contiver o dobro, o ordenamento de público ou saídas equidimensionadas servirão apenas como paliativo, pois mesmo antes de uma suposta evacuação, as pessoas já se encontram em um nível elevado de compactação, o que aceleraria momentos antes do início da evacuação.

### 5.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A maior parte dos trabalhos já publicados sobre a obstrução das saídas de emergência por pessoas em pânico concentrou-se nos modelos de simulação, os quais buscam representar informações de vídeos e depoimentos de sobreviventes de tragédias como a descrita na Seção 2.1.3, por exemplo. Todavia, a maioria das filmagens é precária em informações, pois não raro, o câmara é uma vítima em potencial. Da mesma forma,

utilizar um exemplo específico para validar uma simulação pode torná-la inapropriada para representar casos gerais. O diferencial deste trabalho foi a possibilidade de reunir um grande grupo de pessoas, com características físicas e psicológicas bastante homogêneas, e realizar ensaios de evacuação urgente.

Fenômenos relacionados à dinâmica de multidão foram observados nos ensaios com mais de uma pessoa por unidade de área. A formação de arcos de sustentação que bloqueiam as saídas é intensificada com o aumento da densidade e tem como consequência a redução do tempo total de evacuação e o aumento das pressões exercida sobre os indivíduos pela própria multidão. A turbulência, caracterizada nos ensaios experimentais pelos deslocamentos involuntários dos indivíduos, pode fazer com que alguns destes tomem a decisão de buscar por pessoas queridas que estavam ao seu lado mas foram separadas durante a evacuação.

Neste trabalho foi demonstrado, como o fez Helbing, Farkas e Vicsek (2000), que a aplicação de um obstáculo próximo à saída de emergência melhora o tempo de evacuação e reduz as pressões exercidas sobre os indivíduos na multidão. Sua implementação, na prática, retira a visibilidade das saídas e constituem obstáculos físicos nas rotas de fuga, o que contraria a definição: caminho livre a ser percorrido até um local seguro. Para trabalhos futuros recomenda-se o estudo de formas de ordenamento de público, incluindo este requisito nos projetos arquitetônicos dos locais de reunião de público ou propondo dispositivos cuja instalação seja viável aos locais já existentes e que necessitem regularização.

Em todos os ensaios experimentais e nas simulações, os tempos de evacuação ficaram abaixo dos valores previstos pela norma do Estado de Santa Catarina. Mesmo com a ocorrência de obstruções instantâneas, o tempo de evacuação foi menor do que se encontraria em um ensaio de evacuação ordenada através da mesma porta de 1,12 m. Evidentemente, por se tratar de um teste sem fumaça, foram minimizados os riscos de esmagamento e pisoteamento fatores que, nos casos reais, levam pessoas ao solo, dificultando ou até mesmo impossibilitando a evacuação por uma determinada saída.

A tragédias nas casas noturnas Kiss, Cromagnón e Station, descritas na Seção 2.1, foram elencadas neste trabalho por apresentarem problemas na evacuação de público. Uma característica comum a todos estes eventos foi a rápida propagação da fumaça tóxica após o incêndio iniciado pelo uso de artefatos pirotécnicos em ambientes internamente revestidos por materiais acústicos inadequados. Santa Catarina modernizou sua norma ao proibir o uso de fogos em ambientes fechados e ao aumentar a fiscalização sobre as casas noturnas exigindo laudos técnicos dos revestimentos internos.

Todavia, um incêndio pode iniciar por diversos outros meios como, por exemplo, um curto circuito ou um ato criminoso. Nestes tipos de tragédias onde a evolução é aguda, quando as equipes de resposta chegam os ambientes já estão tomados por fumaça.

Recomenda-se o estudo de viabilidade da inclusão de dispositivos que retirem a fumaça do ambiente, permitindo que a evacuação ocorra com certa segurança por um maior intervalo de tempo.

Para reduzir o risco relacionado ao desconhecimento do local, a exemplo das pessoas que tomaram a decisão incorreta ao se alojarem no banheiro da Boate Kiss, a lei que instituiu o Poder de Polícia ao CBMSC prevê a obrigatoriedade das plantas de emergências, croquis que indicam as rotas de fuga. Faz-se necessário implantar uma cultura de segurança nas pessoas para que estas ao entrarem em qualquer ambiente de reunião de público, ao menos verifiquem a localização das rotas de fuga existentes. A realização rotineira de simulados de evacuação é uma medida simples de conscientização que já é adotada em muitos países Europeus.

## REFERÊNCIAS

ARGENTINA. **Sentença do Caso 2517 - República Cromañón**. Buenos Aires, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9077**: Saídas de emergência em edifícios. Rio de Janeiro, 1993.

BALL, P. Panicking mice find flaws in exit routes. In: \_\_\_\_\_. **Nature**. Nature, 2013. Disponível em: <http://pt.wikipedia.org/wiki/R%C2%B2http://www.nature.com/news/2003/030923/full/news030922-3.html>. Acesso em: 06 jan 2014.

COEFICIENTE de determinação. In: WIKIPÉDIA: a enciclopédia livre. Wikipedia, 2014. Disponível em: <http://pt.wikipedia.org/wiki/R%C2%B2>. Acesso em: 05 abr 2014.

COELHO, A. L. **Modelação matemática da evacuação de edifícios sujeitos à acção de um incêndio**. Tese (Doutorado) — Faculdade de Engenharia. Universidade do Porto, 1997.

CONSELHO REGIONAL DE ENGENHARIA E AGRONOMIA DO RIO GRANDE DO SUL. **Relatório Técnico: Análise do sinistro na boate Kiss, em Santa Maria, RS**. Porto Alegre, fevereiro 2013.

COSTA, B. R. d. C. E. Aplicação de um modelo numérico na avaliação da evacuação de um edifício. 2009. 2009.

DRURY, J. Collective resilience in mass emergencies and disasters. **The social cure: Identity, health and well-being**, 2012. Psychology Press, p. 195, 2012.

DRURY, J.; NOVELLI, D.; STOTT, C. Representing crowd behaviour in emergency planning guidance: mass or collective resilience? **Resilience**, 2013. Taylor & Francis, v. 1, n. 1, p. 18–37, 2013.

FAHY, R. F.; PROULX, G.; AIMAN, L. Panic and human behaviour in fire. In: **Proceedings of the 4th International Symposium on Human Behaviour in Fire**. Proceedings of the 4th International Symposium on Human Behaviour in Fire, 2009. p. 387–398. Disponível em: <http://archive.nrc-cnrc.gc.ca/obj/irc/doc/pubs/nrcc51384.pdf>. Acesso em: 11 jan 2014.

GEZGER, R. O holocausto de santa maria. **Revista Emergência**, 2013. Proteção Publicações, v. 47, n. 1, p. 22–31, 2013.

GROSSHANDLER, W. L.; BRYNER, N.; MADRZYKOWSKI, D.; KUNTZ, K. **Report of the technical investigation of the station nightclub fire**. [S.l.]: National Institute of Standards and Technology, 2005.

\_\_\_\_\_. **Report of the Technical Investigation of The Station Nightclub Fire: Appendices**. [S.l.]: National Institute of Standards and Technology, 2005.

HELBING, D.; FARKAS, I.; VICSEK, T. Simulating dynamical features of escape panic. **Nature**, 2000. Nature Publishing Group, v. 407, n. 6803, p. 487–490, 2000.

HELBING, D.; JOHANSSON, A.; AL-ABIDEEN, H. Z. Dynamics of crowd disasters: An empirical study. **Physical review E**, 2007. APS, v. 75, n. 4, p. 046109, 2007.

HENDERSON, L. On the fluid mechanics of human crowd motion. **Transportation research**, 1974. Elsevier, v. 8, n. 6, p. 509–515, 1974.

JOHNSON, N. R. Panic at the who concert stampede: An empirical assessment. **Social Problems**, 1987. JSTOR, v. 34, n. 4, p. 362–373, 1987.

KULIGOWSKI, E. D. **The process of human behavior in fires**. [S.l.]: US Department of Commerce, National Institute of Standards and Technology, 2009.

NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION. **NFPA 101**: Life safety code. Quincy, Massachusetts, 2000.

OLTMANN, T. F.; EMERY, R. E. **Abnormal psychology**. [S.l.]: Prentice-Hall, Inc, 1995.

RIO GRANDE DO SUL. Secretaria de Segurança Pública. Polícia Civil. **Relatório Final: Inquérito Policial 94/2013/150501**. Santa Maria, 2013.

SABOIA, P. C. Mestrado, **Simulação de multidões com agentes brownianos e modelo de forças sociais modificado**. Campinas: Biblioteca Digital da Unicamp, 2010.

SANTA CATARINA. **Lei 16.157, de 7 de novembro de 2013**. Florianópolis, 2013.

SANTA CATARINA. Polícia Militar. Corpo de Bombeiros. **Normas de segurança contra incêndios/Corpo de Bombeiros**.: 2. ed. rev. ampl. Florianópolis, 1992. 144 p.

SILVA, J. M. P. **Análise de factores condicionantes da evacuação de trabalhadores numa unidade industrial**. Tese (Doutorado) — Universidade do Porto, 2007.

STEINBERG, J. G. Mestrado, **Desenvolvimento de modelo para simulação de situações de evacuação de multidões**. Campinas: Biblioteca Digital da Unicamp, 2005.

STERNBERG, R. J. **In search of the human mind**. [S.l.]: Harcourt Brace College Publishers, 1995.

STILL, G. K. **Crowd dynamics**. Tese (Doutorado) — Universidade de Warwick, Coventry, Inglaterra, 2000.

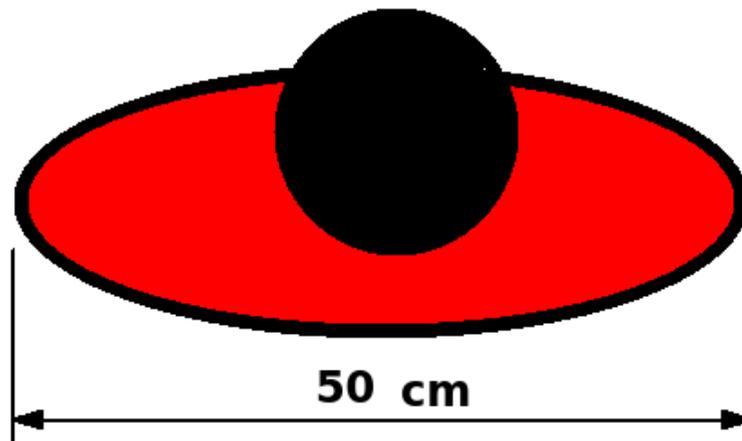
VALENTIN, M. V.; ONO, R. Saídas de emergência e comportamento humano: uma abordagem histórica e o estado atual da arte no brasil. **NUTAU**, 2006. 2006.

VENTURA, M. M. O estudo de caso como modalidade de pesquisa. **Revista SoCERJ**, 2007. v. 20, n. 5, p. 383–386, 2007.

## APÊNDICE A – Definição da largura dos indivíduos

Para definir a largura do elemento de simulação, foi feita a medição de largura ombro a ombro dos vinte e um cadetes da turma Capitão Pedro Bruno Gimenez Coste da ABM/CEBM, cuja média e método de medição são dados na Figura 21. Portanto foi escolhido o elemento de simulação circular com diâmetro de 50 cm.

Figura 21: Medição da largura dos ombros.



Fonte: do Autor.

## APÊNDICE B – Resultados de simulação

A Tabela 3 apresenta o tempo de evacuação transcorrido para diversos cenários de larguras da saída em um dado local de reunião de público. Os valores estão relacionados aos gráficos e análises da Subseção 4.2.2

Tabela 3: Tempo de evacuação e fluxo em função da abertura da saída  $l$ .

variável	evacuados	$l=80\text{cm}$	$l=120\text{cm}$	$l=160\text{cm}$	$l=200\text{cm}$
$t_{evac}$ [s]	70	73,1	26	16,9	6,2
	140	133,1	50,9	26,9	13,8
	210	169,53	65,24	36,38	19,76
$\overline{J_{evac,1}}$ [p/s]	[0, 70]	0,957	2,692	4,135	11,254
	[70, 140]	1,167	2,809	7,042	9,211
	[140, 210]	1,922	4,888	7,361	11,785

Fonte: do Autor.

### B.1 Tamanho de porta

As Tabelas 4 a 8 apresentam os resultados discutidos na Seção 4.2.2, os quais retratam a influência da abertura da saída de emergência para o tempo de evacuação.

Tabela 4: Tempo de evacuação [s] em função do tamanho da porta [cm]: indivíduos de 1 a 50.

<b>N<sub>e</sub></b>	<b>55</b>	<b>80</b>	<b>112</b>	<b>120</b>	<b>140</b>	<b>160</b>	<b>200</b>	<b>240</b>	<b>275</b>	<b>300</b>
1	0,92	0,34	0,29	0,28	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27
2	3,98	0,48	0,42	0,41	0,40	0,39	0,40	0,35	0,31	0,27
3	6,66	1,48	0,86	1,01	0,66	0,52	0,47	0,42	0,42	0,40
4	7,26	3,68	1,25	1,31	0,74	0,54	0,47	0,45	0,43	0,41
5	9,19	3,98	1,70	1,36	0,88	0,66	0,60	0,53	0,48	0,45
6	10,21	5,60	2,31	1,87	1,34	0,67	0,62	0,57	0,55	0,55
7	12,11	6,05	2,69	2,11	1,62	0,77	0,76	0,64	0,60	0,59
8	23,19	7,70	3,69	2,26	1,65	0,86	0,89	0,70	0,62	0,63
9	24,15	8,33	4,25	2,52	1,95	0,97	0,99	0,78	0,67	0,64
10	26,79	8,92	4,38	2,77	2,39	1,24	0,99	0,78	0,72	0,72
11	45,49	10,64	4,53	3,11	2,42	1,55	1,16	0,80	0,73	0,72
12	49,84	11,36	4,59	3,36	2,63	1,64	1,41	0,84	0,77	0,76
13	56,16	13,43	6,06	3,42	2,79	1,72	1,54	0,90	0,79	0,78
14	56,83	14,57	6,43	4,35	3,96	2,23	1,58	0,91	0,84	0,80
15	61,97	15,79	6,63	4,66	4,31	2,30	1,62	0,98	0,87	0,87
16	64,10	16,00	6,77	5,03	4,40	2,37	1,69	1,06	0,90	0,90
17	67,74	17,79	9,15	5,40	4,68	2,59	1,76	1,06	0,93	0,90
18	68,39	18,01	9,33	5,92	5,08	2,68	1,79	1,18	0,95	0,91
19	70,90	20,02	9,51	6,16	5,32	2,72	1,79	1,33	1,06	1,04
20	72,38	20,32	9,72	6,33	5,35	3,29	1,92	1,37	1,11	1,09
21	75,14	22,08	9,81	6,76	6,24	3,32	2,05	1,46	1,12	1,10
22	94,13	24,31	10,06	6,89	6,69	3,43	2,21	1,48	1,12	1,12
23	95,22	24,64	10,19	7,40	6,71	3,46	2,23	1,56	1,21	1,21
24	96,98	26,55	10,32	7,53	6,86	3,56	2,32	1,58	1,24	1,26
25	119,65	27,14	12,67	7,64	7,38	3,63	2,39	1,73	1,27	1,33
26	122,13	30,05	12,67	8,77	7,42	3,74	2,40	1,79	1,36	1,37
27	125,86	30,63	12,95	10,23	7,63	3,97	2,52	1,80	1,38	1,38
28	134,37	32,68	13,66	10,42	7,76	4,03	2,56	1,89	1,49	1,49
29	135,23	33,39	13,90	10,84	7,77	4,16	2,68	1,96	1,49	1,60
30	138,14	33,83	14,09	12,09	7,93	4,34	2,86	2,01	1,55	1,60
31	158,32	34,10	14,33	12,23	8,17	6,40	2,98	2,12	1,61	1,64
32	159,98	34,30	16,01	12,55	8,24	6,54	2,99	2,18	1,67	1,67
33	162,97	34,92	17,42	12,66	8,44	6,83	3,13	2,24	1,74	1,72
34	174,09	35,13	17,46	12,77	8,64	6,96	3,27	2,27	1,75	1,72
35	175,27	36,23	17,72	13,00	8,64	7,03	3,28	2,32	1,88	1,73
36	177,89	36,60	17,99	13,14	8,78	7,10	3,33	2,33	1,91	1,78
37	187,55	37,36	18,82	13,81	8,97	7,20	3,44	2,44	2,16	1,80
38	188,68	37,55	19,00	14,02	9,14	7,25	3,49	2,46	2,25	1,86
39	191,47	37,94	19,51	14,13	9,50	7,40	3,64	2,50	2,29	1,89
40	202,95	38,28	19,83	14,80	9,64	7,55	3,68	2,52	2,38	1,91
41	204,19	38,91	20,04	15,36	9,81	7,58	3,74	2,63	2,38	2,00
42	207,06	39,94	20,38	16,34	9,99	8,64	3,78	2,65	2,39	2,02
43	217,06	40,18	20,55	16,48	10,05	8,99	3,84	2,65	2,45	2,03
44	218,24	41,14	20,58	16,61	10,31	9,04	3,92	2,69	2,48	2,14
45	220,73	42,94	21,48	16,98	10,42	9,26	3,93	2,79	2,50	2,14
46	232,30	44,28	22,84	17,16	10,54	10,59	4,06	2,80	2,55	2,15
47	233,55	44,56	23,01	18,07	10,60	10,60	4,10	2,91	2,60	2,15
48	236,57	46,78	24,52	18,12	10,78	11,27	4,19	2,97	2,68	2,25
49	245,96	46,97	25,15	18,67	11,00	12,24	4,32	3,10	2,69	2,27
50	247,02	48,88	25,37	19,03	11,56	12,31	4,40	3,14	2,71	2,28

Fonte: do Autor.

Tabela 5: Tempo de evacuação [s] em função do tamanho da porta [cm]: indivíduos de 51 a 100.

<b>N<sub>e</sub></b>	<b>55</b>	<b>80</b>	<b>112</b>	<b>120</b>	<b>140</b>	<b>160</b>	<b>200</b>	<b>240</b>	<b>275</b>	<b>300</b>
51	249,34	49,11	25,45	19,45	11,57	12,37	4,54	3,14	2,75	2,39
52	263,62	50,17	25,80	19,71	11,89	12,87	4,59	3,25	2,80	2,39
53	265,87	51,46	26,00	19,79	12,21	12,90	4,65	3,27	2,85	2,42
54	270,97	52,08	26,13	20,01	12,30	12,97	4,79	3,36	2,86	2,51
55	276,94	55,81	26,25	20,51	12,76	13,04	4,98	3,39	2,87	2,52
56	277,66	56,44	26,35	21,25	12,95	13,25	5,17	3,49	2,97	2,56
57	279,66	59,49	26,45	21,95	13,07	13,37	5,18	3,60	3,00	2,68
58	291,69	60,06	26,62	22,11	13,32	13,40	5,33	3,62	3,01	2,69
59	293,62	62,51	26,81	22,77	13,46	13,52	5,51	3,73	3,09	2,72
60	297,33	63,93	27,88	23,04	13,46	13,56	5,55	3,77	3,17	2,82
61	304,31	64,22	27,92	23,22	13,62	13,77	5,58	3,86	3,23	2,89
62	305,35	65,64	29,17	23,91	13,74	15,11	5,69	3,92	3,25	2,89
63	307,13	66,20	29,50	23,98	14,13	15,14	5,72	3,97	3,27	2,92
64	317,87	66,83	29,89	24,64	14,28	15,46	5,75	4,05	3,30	3,04
65	319,05	68,34	30,03	24,74	14,45	15,51	5,85	4,11	3,32	3,07
66	321,90	69,21	30,62	24,80	14,60	15,85	5,87	4,22	3,41	3,07
67	328,10	69,67	30,83	24,96	14,61	15,96	6,03	4,22	3,42	3,10
68	329,14	69,92	31,01	25,04	14,93	15,99	6,05	4,23	3,45	3,18
69	331,02	70,21	31,29	25,33	15,05	16,17	6,11	4,35	3,50	3,21
70	339,94	71,36	31,59	25,77	15,15	16,55	6,21	4,38	3,56	3,25
71	341,10	73,13	31,78	26,01	15,32	16,93	6,22	4,43	3,60	3,30
72	343,61	73,77	31,80	26,25	15,56	16,98	6,28	4,50	3,64	3,32
73	350,61	74,39	32,86	28,25	16,23	17,17	6,42	4,66	3,72	3,37
74	351,67	78,09	33,07	28,73	16,51	17,33	6,56	4,67	3,76	3,43
75	353,70	78,96	33,19	28,94	16,57	17,33	6,75	4,67	3,82	3,43
76	362,12	80,74	34,68	29,71	16,77	17,47	6,76	4,77	3,91	3,43
77	363,31	80,95	34,70	30,32	16,86	17,50	6,91	4,79	3,93	3,49
78	366,16	82,12	34,94	30,57	16,87	17,56	6,95	4,83	3,95	3,57
79	372,50	83,26	35,40	30,71	17,00	17,64	6,97	5,01	3,97	3,59
80	373,71	83,68	35,66	30,84	17,02	17,69	7,10	5,01	4,04	3,63
81	376,29	84,96	35,92	31,43	17,18	18,70	7,17	5,01	4,05	3,65
82	382,47	85,57	36,48	31,48	17,33	18,89	7,22	5,06	4,09	3,66
83	383,54	85,82	37,27	31,70	17,73	18,96	7,36	5,15	4,15	3,73
84	385,29	86,30	37,50	31,79	17,81	19,05	7,44	5,19	4,15	3,77
85	393,02	86,57	37,67	32,46	18,34	19,50	7,86	5,23	4,16	3,83
86	394,24	88,37	38,46	32,94	18,45	19,57	8,44	5,25	4,16	3,89
87	397,26	88,82	38,93	34,15	18,58	19,72	8,73	5,30	4,27	3,96
88	403,63	89,21	39,06	34,19	18,69	19,75	8,77	5,39	4,32	3,97
89	405,55	89,80	40,43	34,58	19,11	20,07	8,80	5,40	4,33	4,07
90	410,28	92,18	40,89	34,73	19,22	20,09	8,86	5,51	4,36	4,14
91	410,92	92,95	41,08	34,88	19,41	20,14	9,06	5,69	4,56	4,15
92	413,12	93,55	41,70	35,28	19,60	20,25	9,07	5,82	4,60	4,20
93	422,59	93,82	41,88	35,68	19,73	20,31	9,20	5,83	4,69	4,31
94	425,53	94,65	42,32	36,24	19,95	20,38	9,27	5,87	4,73	4,36
95	429,32	95,51	42,79	36,44	20,47	20,52	9,40	5,91	4,97	4,43
96	430,32	96,04	42,94	36,91	21,01	20,87	9,51	6,22	5,12	4,45
97	432,36	96,27	43,09	37,03	21,28	20,95	9,86	6,30	5,21	4,46
98	437,96	97,07	43,83	37,15	21,30	21,32	9,90	6,30	5,35	4,51
99	439,03	97,50	43,89	37,25	21,43	21,40	9,92	6,33	5,35	4,57
100	440,95	105,68	44,11	38,56	21,60	21,50	10,02	6,39	5,37	4,64

Fonte: do Autor.

Tabela 6: Tempo de evacuação [s] em função do tamanho da porta [cm]: indivíduos de 101 a 150.

<b>N<sub>e</sub></b>	<b>55</b>	<b>80</b>	<b>112</b>	<b>120</b>	<b>140</b>	<b>160</b>	<b>200</b>	<b>240</b>	<b>275</b>	<b>300</b>
101	446,32	106,25	44,26	38,59	21,79	21,62	10,10	6,48	5,41	4,67
102	447,49	107,17	44,78	39,14	21,93	21,75	10,39	6,95	5,52	4,68
103	450,42	108,07	45,06	39,30	22,17	21,91	10,89	6,96	5,56	4,71
104	454,50	108,92	45,40	40,31	22,37	21,99	10,98	6,97	5,57	4,78
105	455,55	109,37	45,55	40,59	22,39	22,16	11,00	7,08	5,58	4,79
106	457,69	110,05	45,81	40,77	23,37	22,41	11,05	7,27	5,64	4,86
107	462,79	110,52	45,99	40,93	23,98	22,49	11,16	7,39	5,69	4,92
108	464,08	111,06	46,09	41,11	24,17	22,50	11,19	7,52	5,75	4,92
109	469,87	111,59	46,26	41,28	24,26	22,57	11,28	7,57	5,81	4,96
110	470,80	111,77	46,46	41,46	24,41	23,02	11,29	7,64	5,81	5,00
111	472,13	112,01	46,74	41,65	24,84	23,15	11,34	7,65	5,83	5,06
112	478,05	112,67	47,38	41,87	25,04	23,27	11,49	7,77	5,91	5,14
113	479,50	114,85	47,68	42,05	25,23	23,76	11,49	7,81	5,93	5,16
114	484,04	115,31	47,71	42,14	25,25	23,93	11,71	7,88	5,99	5,16
115	484,83	115,55	47,87	42,25	25,44	24,07	11,76	7,90	6,07	5,21
116	486,78	115,86	48,14	42,61	25,46	24,16	11,96	7,99	6,09	5,23
117	492,31	117,67	48,47	42,62	26,12	24,28	11,98	8,00	6,11	5,29
118	493,64	118,04	48,60	42,81	26,23	24,81	12,10	8,03	6,26	5,30
119	497,88	118,57	50,23	42,84	26,61	24,98	12,12	8,08	6,32	5,33
120	498,89	119,25	50,32	43,04	26,72	25,04	12,13	8,13	6,35	5,37
121	501,14	119,71	50,45	44,70	26,77	25,14	12,25	8,17	6,40	5,39
122	508,10	120,22	50,67	44,87	26,95	25,21	12,29	8,19	6,43	5,45
123	510,63	120,47	50,93	45,25	27,05	25,30	12,41	8,25	6,46	5,45
124	512,35	120,86	51,14	45,30	27,10	25,30	12,54	8,28	6,51	5,52
125	516,79	121,26	51,31	45,47	27,26	25,33	12,68	8,33	6,56	5,52
126	517,96	122,20	51,50	45,75	27,38	25,46	12,74	8,43	6,58	5,55
127	522,06	122,65	51,99	46,28	27,57	25,66	12,80	8,44	6,60	5,60
128	523,00	123,23	52,51	46,33	28,00	25,68	12,82	8,50	6,61	5,66
129	524,11	123,51	52,67	46,47	28,10	25,77	12,87	8,56	6,68	5,66
130	527,53	123,93	53,00	46,54	28,26	25,86	12,96	8,62	6,71	5,70
131	528,70	125,51	53,75	46,91	28,46	25,95	12,99	8,72	6,76	5,71
132	532,89	126,49	53,91	47,56	28,47	25,97	13,12	8,74	6,76	5,78
133	533,97	129,12	54,47	47,71	29,07	26,16	13,14	8,83	6,82	5,81
134	536,75	130,29	54,61	48,03	29,51	26,25	13,25	8,85	6,89	5,82
135	539,38	131,01	54,79	48,11	29,51	26,38	13,31	8,96	6,93	5,84
136	542,60	131,58	55,13	49,23	29,68	26,53	13,45	9,00	6,94	5,87
137	543,70	131,85	55,46	49,40	29,71	26,63	13,50	9,17	6,97	5,92
138	547,08	132,05	55,54	49,55	29,86	26,69	13,66	9,22	7,10	5,97
139	548,16	132,29	55,71	49,69	30,05	26,79	13,66	9,41	7,12	6,02
140	551,53	132,80	55,82	50,04	30,18	26,85	13,69	9,82	7,19	6,03
141	554,37	133,11	55,95	50,92	30,37	26,87	13,82	9,85	7,25	6,11
142	556,96	133,33	56,42	51,13	30,39	27,00	13,85	9,89	7,30	6,11
143	558,05	133,53	56,63	51,30	30,56	27,02	13,92	9,92	7,31	6,19
144	560,79	133,75	57,25	51,43	30,59	27,16	14,00	10,06	7,44	6,23
145	561,82	134,80	57,64	51,64	30,79	27,22	14,08	10,16	7,58	6,25
146	564,13	135,49	57,67	52,49	30,96	27,35	14,09	10,17	7,63	6,29
147	564,93	137,86	58,10	52,62	31,58	27,66	14,18	10,19	7,71	6,33
148	567,90	138,16	58,18	53,30	31,90	28,28	14,19	10,21	7,73	6,38
149	571,22	139,05	58,55	53,89	32,23	28,37	14,30	10,43	7,74	6,41
150	574,65	139,61	58,80	54,10	32,50	28,51	14,33	10,44	7,85	6,47

Fonte: do Autor.

Tabela 7: Tempo de evacuação [s] em função do tamanho da porta [cm]: indivíduos de 151 a 200.

<b>N<sub>e</sub></b>	<b>55</b>	<b>80</b>	<b>112</b>	<b>120</b>	<b>140</b>	<b>160</b>	<b>200</b>	<b>240</b>	<b>275</b>	<b>300</b>
151	576,02	139,84	58,95	54,32	32,57	28,72	14,44	10,59	7,86	6,50
152	580,42	142,30	59,25	54,33	32,72	28,82	14,49	10,71	7,88	6,52
153	582,14	142,61	59,65	54,45	32,90	28,87	14,62	10,77	7,96	6,55
154	585,49	142,88	59,83	54,85	33,28	29,11	14,65	10,87	7,97	6,58
155	587,50	143,11	60,23	55,00	33,29	29,23	15,05	10,99	7,99	6,65
156	588,19	144,10	60,34	55,64	33,35	29,24	15,23	11,26	8,05	6,66
157	590,97	144,25	61,12	55,89	33,80	29,38	15,32	11,31	8,08	6,79
158	594,10	144,84	61,24	56,28	33,91	29,43	15,38	11,41	8,14	6,81
159	595,57	145,88	61,37	56,33	33,94	29,61	15,42	11,44	8,15	6,89
160	596,61	146,66	61,57	56,53	34,09	29,84	15,47	11,54	8,17	6,89
161	598,79	147,47	61,74	56,62	34,15	29,85	15,53	11,55	8,22	6,89
162	599,55	148,06	62,10	56,77	34,20	30,23	15,64	11,60	8,25	7,06
163	602,00	148,69	62,20	56,97	34,31	30,34	15,72	11,63	8,27	7,13
164	605,41	148,98	62,92	57,25	34,49	30,49	15,72	11,67	8,28	7,17
165	607,76	149,24	62,95	57,43	34,61	30,73	15,88	11,78	8,29	7,18
166	610,37	149,56	63,17	57,77	34,64	30,82	15,91	11,79	8,39	7,20
167	614,21	150,25	63,45	57,93	34,74	30,90	15,96	11,87	8,40	7,29
168	616,22	150,85	64,16	58,12	34,75	31,00	15,96	11,90	8,45	7,31
169	618,97	151,10	64,23	58,31	34,86	31,09	16,06	12,10	8,52	7,34
170	620,22	151,29	64,41	58,54	35,03	31,25	16,13	12,15	8,56	7,42
171	623,51	151,51	64,52	58,58	35,05	31,28	16,23	12,16	8,57	7,44
172	624,83	152,10	64,89	58,69	35,19	31,38	16,36	12,24	8,57	7,44
173	625,29	152,24	65,06	59,14	35,20	31,39	16,39	12,30	8,64	7,45
174	626,84	153,17	65,17	59,49	35,43	31,59	16,46	12,37	8,68	7,55
175	628,01	153,69	65,91	59,83	35,59	31,75	16,47	12,38	8,72	7,57
176	628,79	154,03	66,04	59,92	35,64	31,77	16,59	12,44	8,79	7,57
177	631,14	154,19	66,17	60,05	35,76	31,90	16,66	12,49	8,80	7,62
178	633,29	154,29	66,52	60,16	35,77	32,08	16,69	12,59	8,85	7,71
179	633,96	154,53	66,68	60,33	35,86	32,09	16,81	12,61	8,92	7,71
180	634,73	154,84	66,99	60,47	36,03	32,15	16,84	12,61	8,98	7,74
181	635,77	155,16	67,18	60,67	36,12	32,25	16,99	12,62	9,03	7,75
182	636,51	155,37	67,21	60,78	36,16	32,40	17,02	12,74	9,12	7,84
183	637,26	155,96	67,38	60,94	36,25	32,42	17,11	12,75	9,13	7,85
184	638,53	156,15	67,51	61,26	36,29	32,63	17,25	12,87	9,19	7,91
185	639,28	156,39	67,53	61,39	36,38	32,66	17,32	12,87	9,22	7,92
186	640,38	156,64	67,73	61,44	36,47	32,80	17,48	12,89	9,22	7,99
187	641,62	157,01	68,34	61,57	36,61	33,01	17,57	12,99	9,26	8,00
188	642,76	157,53	68,55	61,67	36,62	33,22	17,60	13,01	9,28	8,01
189	643,59	157,90	68,71	61,82	36,74	33,24	17,77	13,06	9,34	8,03
190	645,26	158,97	68,90	62,08	36,90	33,37	17,77	13,11	9,35	8,08
191	646,99	159,25	69,07	62,11	36,98	33,55	17,88	13,21	9,43	8,15
192	647,93	159,47	69,19	62,24	37,12	33,59	17,90	13,31	9,44	8,15
193	649,53	160,39	69,26	62,37	37,21	33,76	18,07	13,32	9,49	8,24
194	650,56	160,63	69,55	62,53	37,30	33,81	18,08	13,35	9,56	8,24
195	651,01	161,08	69,57	62,61	37,35	33,94	18,22	13,50	9,57	8,37
196	652,05	161,62	69,71	62,80	37,49	34,05	18,23	13,51	9,62	8,41
197	652,93	162,02	69,85	63,03	37,52	34,12	18,31	13,54	9,69	8,45
198	653,93	162,81	69,95	63,11	37,65	34,19	18,31	13,65	9,80	8,45
199	654,54	163,21	70,19	63,30	37,86	34,28	18,42	13,69	9,86	8,57
200	655,14	163,69	70,34	63,45	38,03	34,35	18,52	13,79	9,98	8,58

Fonte: do Autor.

Tabela 8: Resultado de simulação: tempo de evacuação em função das aberturas, indivíduos de 201 a 210

<b>N<sub>e</sub></b>	<b>55</b>	<b>80</b>	<b>112</b>	<b>120</b>	<b>140</b>	<b>160</b>	<b>200</b>	<b>240</b>	<b>275</b>	<b>300</b>
<b>201</b>	655,61	164,11	70,49	63,51	38,24	34,49	18,54	13,84	10,00	8,63
<b>202</b>	655,89	164,55	70,62	63,67	38,35	34,50	18,73	13,93	10,05	8,69
<b>203</b>	656,30	165,47	70,77	63,74	38,40	34,69	18,73	14,01	10,15	8,78
<b>204</b>	657,41	166,49	70,93	63,93	38,44	34,72	18,89	14,09	10,18	8,78
<b>205</b>	657,74	167,03	71,10	64,16	38,61	34,85	18,94	14,22	10,20	8,82
<b>206</b>	657,89	167,40	71,29	64,31	38,82	35,05	19,16	14,22	10,32	8,91
<b>207</b>	658,66	167,64	71,51	64,53	38,93	35,10	19,18	14,38	10,34	9,17
<b>208</b>	659,57	168,48	71,77	64,80	39,20	35,40	19,22	14,44	10,45	9,21
<b>209</b>	661,76	168,89	71,79	64,95	39,29	35,54	19,49	14,77	10,82	9,43
<b>210</b>	663,12	169,53	72,49	65,24	39,55	36,38	19,76	15,48	11,96	9,54

Fonte: do Autor.

## ANEXO A – Capacidade de acesso

A Tabela 4, cópia do Anexo F da NSCI, Santa Catarina (1992, Anexo F), apresenta os valores de capacidade de acesso para diversas classes de ocupação. Além disso ela limita a densidade populacional máxima. Os círculos na Tabela 4 destacam os valores que são aplicados para o cálculo da lotação máxima em um local de reunião de público como um bar e restaurante, por exemplo.

Quadro 4: Saída de emergência em edificações

Classe de Ocupação	Cálculo da População	Capacidade N° de Pessoas/Unidade de Passagem			Distância máxima para alcançar a saída	
		Acessos	Saídas	Portas		
Escritórios em geral e Consultório	1 Pessoa p/ 9.00 m2 de área bruta	100	60	100	35	
Apartamentos	2 Pessoas/ dormitórios de serviço	60	45	100		
Hotéis	1.5 Pessoas dormitório	60	45	100		
Hospitais	1.5 Pessoas/ leito	30	22	30		
L o c a l i s  d e r e u n i õ e s	Restaurantes, Bares, boates, etc	1 pessoa/m2 de área bruta	100	75		100
	Templos, cinemas e teatros					
	Ginásio de Esportes	2 pessoas/m2 de área para assistentes	100	75		100
Salas de Aula	1 Aluno/m2	100	60	100		
Lojas e Centros de Compras	1 Pessoa/ 5.00m2 de área bruta	60	60	100		

Fonte: Anexo F da NSCI/94