

# **Influência do Comportamento Humano na eficiência da evacuação de edifícios: uma análise baseada em simulação com o software Pathfinder**

**TOMÁS ALVES DA SILVA**  
Junho de 2026

POLITÉCNICO DO PORTO  
INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO

---

# Influência do Comportamento Humano na eficiência da evacuação de edifícios: uma análise baseada em simulação com o software Pathfinder

---

Tomás Alves da Silva

Mestrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores  
Área de Especialização em Sistemas e Planeamento Industrial

**ISEP** INSTITUTO SUPERIOR  
DE ENGENHARIA DO PORTO

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELETROTÉCNICA  
Instituto Superior de Engenharia do Porto

Junho, 2026



*Esta dissertação satisfaz, parcialmente, os requisitos que constam da Ficha de  
Unidade Curricular de Tese/Dissertação, do 2º ano, do Mestrado em  
Engenharia Electrotécnica e de Computadores, Área de Especialização em  
Sistemas e Planeamento Industrial.*

**Candidato:** Tomás Alves da Silva, N.º 1211187, 1211187@isep.ipp.pt

**Orientação Científica:** Doutor Luís Carlos Ramos Nunes Pinto Ferreira,  
lpf@isep.ipp.pt

**ISEP** INSTITUTO SUPERIOR  
DE ENGENHARIA DO PORTO

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELETROTÉCNICA  
Instituto Superior de Engenharia do Porto  
Rua Dr. António Bernardino de Almeida, 431, 4200-072 Porto

Junho, 2026



# Agradecimentos

Ao Professor Doutor Luís Pinto Ferreira, do Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP), agradeço por toda a orientação e disponibilidade ao longo deste percurso, foram fundamentais para o sucesso deste trabalho.

À Chefe de Divisão de Arquivo Histórico e Património Cultural da Câmara Municipal de Gondomar, Dra. Inês Lino, gostaria de agradecer pela disponibilidade e ajuda prestada, que permitiu que este trabalho se desenrolasse com sucesso.

À minha família e à Beatriz Santos, o meu obrigado por todo o apoio dado ao longo deste percurso, pois sem ele, seria mais difícil alcançar os meus objetivos.

Por último, aos amigos que continuaram após a licenciatura e aos que surgiram ao longo destes dois anos, o meu muito obrigado pelo apoio, entreaajuda e momentos felizes que certamente irei recordar com muito orgulho.



# Resumo

A evacuação de edifícios em situações de emergência constitui um dos aspetos mais críticos para a segurança dos seus ocupantes. Ao contrário do que modelos tradicionais assumiam, os indivíduos não respondem de forma homogênea perante situações de perigo, sendo o seu comportamento influenciado por um conjunto complexo de fatores individuais, sociais, ambientais e organizacionais. Compreender de que forma estes fatores afetam o desempenho da evacuação é, por isso, fundamental para a conceção de planos de emergência eficazes e adaptados às necessidades reais dos ocupantes.

O objetivo principal desta dissertação é analisar e avaliar a influência do comportamento humano na eficiência da evacuação de edifícios, recorrendo ao software de simulação Pathfinder. Para o efeito, foi selecionada a Biblioteca Municipal de Gondomar como edifício de referência, um espaço público de três pisos com uma população heterogênea, composta por crianças, adultos e idosos. Foi desenvolvido e validado um modelo computacional tridimensional do edifício, com base nas plantas reais fornecidas pelos responsáveis da biblioteca, tendo sido obtido um erro percentual médio de 5,22 face aos tempos de evacuação cronometrados no local, o que confirma a validade do modelo para efeitos de análise.

Com base neste modelo, foram simulados cinco cenários de evacuação distintos, cada um representando uma dimensão comportamental diferente: o cenário base, a influência do tempo de pré-movimento, o comportamento de grupo, a liderança e o efeito de herding. Em cada cenário foram realizadas duas simulações, com e sem utilização do elevador, de forma a avaliar o contributo deste meio de acesso vertical para a eficiência da evacuação, considerando sempre uma lotação de 350 ocupantes e uma velocidade média de deslocamento de 1,4 m/s com distribuição normal.

De um modo geral, concluiu-se que a componente comportamental é determinante para o desempenho global da evacuação, não podendo ser dissociada da análise das características físicas do edifício.

**Palavras-Chave:** Comportamento Humano, Evacuação de Edifícios, Simulação, Software Pathfinder, Modelo Computacional, Tempo de Pré-Movimento, Comportamento de Grupo, Liderança, Efeito de Herding.



# Abstract

Building evacuation in emergency situations is one of the most critical aspects of occupant safety. Unlike what traditional models assumed, individuals do not respond homogeneously when faced with danger, as their behaviour is influenced by a complex set of individual, social, environmental and organisational factors. Understanding how these factors affect evacuation performance is therefore fundamental for the design of effective emergency plans adapted to the real needs of occupants.

The main objective of this dissertation is to analyse and evaluate the influence of human behaviour on the efficiency of building evacuation, using the Pathfinder simulation software. For this purpose, the Gondomar Municipal Library was selected as the reference building — a three-storey public space with a heterogeneous population comprising children, adults and elderly people. A three-dimensional computational model of the building was developed and validated based on the actual floor plans provided by the library's staff, achieving an average percentage error of 5.22 compared to evacuation times measured on-site, which confirms the model's validity for analysis purposes.

Based on this model, five distinct evacuation scenarios were simulated, each representing a different behavioural dimension: the baseline scenario, the influence of pre-movement time, group behaviour, leadership and the herding effect. In each scenario, two simulations were carried out, with and without elevator use, in order to assess the contribution of this vertical access means to evacuation efficiency, always considering an occupancy of 350 people and an average travel speed of 1.4 m/s with a normal distribution.

Overall, it was concluded that the behavioural component is a determining factor in overall evacuation performance and cannot be dissociated from the analysis of the building's physical characteristics.

**Keywords:** Human Behaviour, Building Evacuation, Simulation, Pathfinder Software, Computational Model, Pre-Movement Time, Group Behaviour, Leadership, Herding Effect.



# Índice

|                                                                                              |            |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>Resumo</b>                                                                                | <b>i</b>   |
| <b>Abstract</b>                                                                              | <b>iii</b> |
| <b>Lista de Figuras</b>                                                                      | <b>vii</b> |
| <b>Lista de Tabelas</b>                                                                      | <b>ix</b>  |
| <b>1 Introdução</b>                                                                          | <b>1</b>   |
| 1.1 Enquadramento do Trabalho . . . . .                                                      | 1          |
| 1.2 Objetivos da Dissertação . . . . .                                                       | 2          |
| 1.3 Metodologias de Investigação . . . . .                                                   | 2          |
| 1.4 Estrutura da Dissertação . . . . .                                                       | 3          |
| <b>2 Revisão da Literatura</b>                                                               | <b>5</b>   |
| 2.1 Introdução ao Comportamento Humano na Evacuação de Edifícios .                           | 5          |
| 2.2 Conceitos Fundamentais do Comportamento Humano na Evacuação<br>de Edifícios . . . . .    | 7          |
| 2.2.1 Tipos de Comportamento Humano na Evacuação de Edifícios                                | 7          |
| 2.2.2 Papel da Liderança em Cenários de Evacuação . . . . .                                  | 8          |
| 2.2.3 Teorias Psicológicas e Modelos do Comportamento Humano .                               | 10         |
| 2.2.4 Comportamentos emergentes na Evacuação de Edifícios . . .                              | 11         |
| 2.3 Representação do Comportamento Humano na Simulação . . . . .                             | 12         |
| 2.3.1 Evolução dos Modelos de Evacuação . . . . .                                            | 12         |
| 2.3.2 Modelação do Comportamento Humano através do Pathfinder                                | 13         |
| 2.4 Comportamento Humano na Evacuação de Edifícios - Casos de Estudo                         | 15         |
| 2.5 Estudo Bibliométrico sobre o Comportamento Humano na Evacuação<br>de Edifícios . . . . . | 20         |
| 2.6 Revisão da Literatura da Dissertação . . . . .                                           | 23         |
| <b>3 Métodos e Aplicações</b>                                                                | <b>25</b>  |
| 3.1 Estrutura da Biblioteca Municipal de Gondomar . . . . .                                  | 25         |
| 3.1.1 Piso 0 . . . . .                                                                       | 26         |
| 3.1.2 Piso 1 . . . . .                                                                       | 27         |

|          |                                                            |           |
|----------|------------------------------------------------------------|-----------|
| 3.1.3    | Piso 2 . . . . .                                           | 28        |
| 3.2      | Estudo da Simulação . . . . .                              | 29        |
| 3.2.1    | Modelo Computacional . . . . .                             | 29        |
| 3.2.2    | Validação do Modelo Computacional . . . . .                | 34        |
| 3.3      | Análise dos Cenários de Evacuação . . . . .                | 35        |
| 3.3.1    | Cenário 1 - Cenário Base . . . . .                         | 37        |
| 3.3.2    | Cenário 2 - Influência do tempo de pré-movimento . . . . . | 39        |
| 3.3.3    | Cenário 3 - Influência do comportamento de grupo . . . . . | 43        |
| 3.3.4    | Cenário 4 - Influência da Liderança . . . . .              | 46        |
| 3.3.5    | Cenário 5 - Influência do efeito de Herding . . . . .      | 50        |
| 3.4      | Discussão de Resultados . . . . .                          | 54        |
| <b>4</b> | <b>Conclusões</b>                                          | <b>57</b> |
| 4.1      | Conclusões Finais . . . . .                                | 57        |
| 4.2      | Limitações e Trabalho Futuro . . . . .                     | 59        |
|          | <b>Referências</b>                                         | <b>60</b> |

# Lista de Figuras

|    |                                                                        |    |
|----|------------------------------------------------------------------------|----|
| 1  | Número de publicações por ano . . . . .                                | 21 |
| 2  | Países com documentos publicados . . . . .                             | 21 |
| 3  | Top15 Países com mais documentos publicados . . . . .                  | 22 |
| 4  | Percentagem de documentos por tipo . . . . .                           | 22 |
| 5  | Número de documentos por área científica . . . . .                     | 23 |
| 6  | Localização - Biblioteca Municipal de Gondomar (Google, 2026) . .      | 26 |
| 7  | Piso 0 - Espaço dedicado para as crianças . . . . .                    | 27 |
| 8  | Entrada Principal do Edifício . . . . .                                | 27 |
| 9  | Piso 1 - Espaço dedicado para os adultos . . . . .                     | 28 |
| 10 | Piso 2 - Espaço dedicado para a multimédia . . . . .                   | 28 |
| 11 | Interface Pathfinder . . . . .                                         | 29 |
| 12 | Divisões do Piso 0 . . . . .                                           | 30 |
| 13 | Representação Computacional das Portas . . . . .                       | 30 |
| 14 | Criação das Escadas . . . . .                                          | 31 |
| 15 | Criação do Elevador . . . . .                                          | 32 |
| 16 | Criação do Perfil do Ocupante . . . . .                                | 33 |
| 17 | Criação do Comportamento dos Ocupantes . . . . .                       | 33 |
| 18 | Simulação Pathfinder . . . . .                                         | 34 |
| 19 | Velocidade dos ocupantes (Distribuição Normal) . . . . .               | 36 |
| 20 | Taxa de ocupantes no edifício - Cenário 1 sem elevador . . . . .       | 37 |
| 21 | Taxa de utilização das portas do edifício - Cenário 1 sem elevador . . | 38 |
| 22 | Taxa de ocupantes no edifício - Cenário 1 com elevador . . . . .       | 38 |
| 23 | Taxa de utilização das portas do edifício - Cenário 1 com elevador . . | 39 |
| 24 | Taxa de ocupantes no edifício - Cenário 2 sem elevador . . . . .       | 40 |
| 25 | Taxa de utilização das portas do edifício - Cenário 2 sem elevador . . | 41 |
| 26 | Taxa de ocupantes no edifício - Cenário 2 com elevador . . . . .       | 42 |
| 27 | Taxa de utilização das portas do edifício - Cenário 2 com elevador . . | 42 |
| 28 | Taxa de ocupantes no edifício - Cenário 3 sem elevador . . . . .       | 43 |
| 29 | Taxa de utilização das portas do edifício - Cenário 3 sem elevador . . | 44 |
| 30 | Taxa de ocupantes no edifício - Cenário 3 com elevador . . . . .       | 45 |
| 31 | Taxa de utilização das portas do edifício - Cenário 3 com elevador . . | 45 |
| 32 | Taxa de ocupantes no edifício - Cenário 4 sem elevador . . . . .       | 47 |

|    |                                                                        |    |
|----|------------------------------------------------------------------------|----|
| 33 | Taxa de utilização das portas do edifício - Cenário 4 sem elevador . . | 48 |
| 34 | Taxa de ocupantes no edifício - Cenário 4 com elevador . . . . .       | 49 |
| 35 | Taxa de utilização das portas do edifício - Cenário 4 com elevador .   | 50 |
| 36 | Taxa de ocupantes no edifício - Cenário 5 sem elevador . . . . .       | 51 |
| 37 | Taxa de utilização das portas do edifício - Cenário 5 sem elevador . . | 52 |
| 38 | Taxa de ocupantes no edifício - Cenário 5 com elevador . . . . .       | 53 |
| 39 | Taxa de utilização das portas do edifício - Cenário 5 com elevador .   | 54 |

# Lista de Tabelas

|   |                                                                     |    |
|---|---------------------------------------------------------------------|----|
| 1 | Erro percentual entre simulação real e simulação computacional. . . | 35 |
| 2 | Resultados Cenário 1 - Cenário Base . . . . .                       | 37 |
| 3 | Resultados Cenário 2 - Influência do tempo de pré-movimento . . . . | 40 |
| 4 | Resultados Cenário 3 - Influência do comportamento de grupo . . .   | 43 |
| 5 | Resultados Cenário 4 - Influência da Liderança . . . . .            | 46 |
| 6 | Resultados Cenário 5 - Influência do efeito de Herding . . . . .    | 51 |



## Capítulo 1

# Introdução

Neste capítulo é efetuada a introdução ao tema da dissertação, bem como o enquadramento, os objetivos propostos, as metodologias utilizadas e a estrutura do trabalho.

### 1.1 Enquadramento do Trabalho

Em situações de emergência, a evacuação de edifícios constitui-se num dos aspetos mais críticos para a segurança humana, exigindo que os ocupantes respondam rapidamente perante condições inesperadas. No entanto, este processo não depende apenas das características físicas do edifício, mas sobretudo da forma como as pessoas percebem o risco e decidem agir perante ele. Desta forma, compreender o comportamento humano é fundamental para garantir planos de evacuação eficazes e adequados às necessidades reais dos utilizadores [1].

Nos últimos anos, as investigações têm demonstrado que fatores psicológicos e cognitivos desempenham um papel determinante no modo como as evacuações decorrem. Ao contrário do que se assumia tradicionalmente, os indivíduos não respondem de forma homogênea, mas sim heterogênea. Esta variabilidade de comportamentos reforça a importância de integrar a componente humana nos estudos de evacuações [2].

Para analisar este fenómeno e antecipar potenciais ameaças, são desenvolvidas e utilizadas ferramentas de simulação que permitem reproduzir virtualmente estes cenários. Softwares como o *Pathfinder* possibilitam testar diferentes parâmetros e

condições, oferecendo uma visão mais realista da forma como as pessoas se movimentam e comportam em situações de emergência. Estas abordagens revelaram-se essenciais para apoiar decisões, validar estratégias e otimizar os processos de evacuação [3].

## 1.2 Objetivos da Dissertação

Este trabalho tem como objetivo principal analisar e avaliar a influência do comportamento humano durante o processo de evacuação de uma biblioteca, recorrendo a um *software* denominado *Pathfinder*. Através deste *software*, é possível gerar um modelo da estrutura de um edifício e simular o possível comportamento humano das pessoas que ocupam o edifício.

Deste modo, o trabalho visa desenvolver um modelo de simulação através do *Pathfinder* que permita analisar e avaliar o comportamento humano durante a evacuação da biblioteca municipal de Gondomar.

## 1.3 Metodologias de Investigação

A metodologia de investigação adotada para a realização desta dissertação foi o Caso de Estudo. Segundo (G. Huby, 2011) [4], um caso de estudo é uma abordagem de investigação que permite obter uma compreensão aprofundada e detalhada de situações da vida real. Posto isto, esta metodologia traduz-se num método de investigação altamente utilizado em diversas áreas, sendo o seu princípio central a necessidade de explorar um evento ou fenómeno de forma aprofundada e no seu contexto natural. Por este motivo, é que por vezes é chamado de método "naturalista", o que contrasta com o método experimental, no qual o investigador procura exercer controlo ao manipular as variáveis de interesse.

Segundo (Rashid et al.,2019) [5] , é possível definir a aplicação desta metodologia em quatro etapas distintas:

- Definição do problema - Nesta primeira etapa, é necessário definir o objetivo principal da investigação, de modo a obter informação centrada no problema em questão;
- Recolha de dados - Na segunda etapa, são identificadas as fontes de informação mais pertinentes para a investigação e são recolhidos os dados mais relevantes para o estudo em causa;
- Análise de dados - Numa terceira fase, é realizada uma análise e interpretação dos dados recolhidos, retirando como conclusão de resultados aqueles que melhor se enquadram com o objetivo de pesquisa.

- Elaboração do relatório - Por fim, na quarta etapa, toda a informação recolhida é organizada e integrada de forma clara num relatório.

## 1.4 Estrutura da Dissertação

A presente dissertação encontra-se dividida em 4 capítulos.

No capítulo 1, é realizada uma introdução à dissertação, na qual é realizado um enquadramento do trabalho, uma apresentação dos seus objetivos, a metodologia utilizada ao longo da sua elaboração e a sua estrutura.

No capítulo 2, é apresentada a revisão da literatura e a fundamentação teórica da dissertação, ou seja, é realizada uma introdução ao comportamento humano, bem como a importância que este tem durante a evacuação de edifícios. É também realizada uma análise de casos de estudos relacionados com o tema, bem como um estudo bibliométrico sobre o comportamento humano na evacuação de edifícios. Por último, é feita uma revisão geral do conteúdo do capítulo.

No capítulo 3, é apresentado o edifício em estudo, bem como a sua estrutura. Após esta apresentação, é feita uma explicação das várias funcionalidades necessárias para a implementação do modelo computacional no *Pathfinder*, o qual foi alvo de uma validação e, após esta validação, são apresentados e analisados os cenários de evacuação executados no software. Por último, ainda no capítulo 3, é feita uma discussão dos resultados obtidos ao longo dos 5 cenários de evacuação.

Já no capítulo 4, último desta dissertação, são apresentadas as conclusões do trabalho, bem como as limitações e trabalho futuro do mesmo.



## Capítulo 2

# Revisão da Literatura

Neste capítulo são abordados diversos conceitos relacionados com o tema da dissertação anteriormente mencionado.

### 2.1 Introdução ao Comportamento Humano na Evacuação de Edifícios

Em situações de emergência, o comportamento humano é determinado pela interação de um conjunto de fatores individuais, sociais, ambientais e organizacionais. A compreensão deste conjunto de fatores é fundamental para explicar de que forma os ocupantes dos edifícios percebem o risco, tomam decisões e se deslocam durante a evacuação, o que se torna determinante para o desempenho global deste processo.

Entre os fatores individuais, destacam-se a idade, o gênero e a experiência prévia na evacuação de edifícios. A idade influencia tanto a mobilidade física quanto a capacidade cognitiva, por isso, as crianças e os idosos tendem a apresentar velocidades de deslocamento mais lentas e maior vulnerabilidade a atrasos no reconhecimento do perigo [6]. Já o gênero pode afetar a tomada de decisão e a percepção do risco, a partir de diferenças comportamentais relacionadas com estratégias de ação e resposta emocional. A experiência prévia, adquirida através de treinos, simulacros ou até mesmo de experiências vividas anteriormente, permite uma maior familiaridade com procedimentos de evacuação, reduzindo a hesitação inicial e, por consequência, aumentando a prontidão para agir no momento [7].

Adicionalmente, a mobilidade física e a capacidade cognitiva assumem também um papel bastante importante. A mobilidade física irá facilitar ou limitar a capacidade dos indivíduos se deslocarem, enquanto que a capacidade cognitiva estará interligada com a rápida interpretação de sinais de perigo. Pessoas com limitações motoras, cognitivas ou sensoriais tendem a enfrentar maiores desafios durante a evacuação, enquanto que os indivíduos com capacidades elevadas respondem ao perigo com maior rapidez e precisão [8]. Por fim, a percepção do risco, que é fortemente influenciada por experiências anteriores ou pelas emoções momentâneas, determina se o indivíduo irá evacuar imediatamente ou se procurará confirmação da ameaça antes de agir, o que irá prolongar o tempo da tomada de decisão [9].

Os fatores sociais assumem também um papel decisivo na compreensão do comportamento humano, nomeadamente nas relações familiares ou em grupos de amigos. Neste contexto, é bastante comum que os indivíduos esperem por familiares ou que formem grupos durante a evacuação, o que pode alterar a velocidade de evacuação e a escolha de rotas de fuga [10]. Existem também normas sociais, como a tendência a seguir os outros ou esperar por instruções, que moldam a forma como as pessoas reagem em ambientes de emergência. O comportamento de imitação permite descrever situações em que os indivíduos tomam decisões baseadas nas ações dos outros, o que reforça o caráter coletivo da evacuação que, por sua vez, pode acelerar ou retardar o fluxo de evacuação [11].

Segundo (Kinkel et al., 2024) [12], os fatores ambientais, como a visibilidade, a iluminação e os obstáculos afetam a capacidade de percepção do perigo e da escolha de rotas, o que influencia o contexto físico da evacuação. A sinalização e a informação disponibilizada são também cruciais para guiar as pessoas para a saída, por isso, qualquer falha ou ambiguidade pode gerar confusão ou atrasos e, por consequência, comprometer a segurança dos ocupantes.

Por último, os fatores organizacionais, como por exemplo: os métodos de treino, os planos de emergência, a comunicação e a liderança institucional, condicionam a resposta individual e coletiva nas situações de emergência. A realização de exercícios de evacuação aumenta o conhecimento dos procedimentos a adotar nestas situações, o que permite reduzir a hesitação das pessoas num acontecimento real. A utilização de forma clara de alarmes e sistemas de comunicação facilita uma rápida disseminação da informação enquanto que a liderança institucional permite orientar os ocupantes, reforçando a cooperação e entreaajuda durante a evacuação. Desta forma, a ausência de treino, as falhas de comunicação ou uma liderança deficiente tendem a prolongar o tempo de resposta dos indivíduos e a probabilidade de tomarem decisões inadequadas aumenta [13].

## **2.2 Conceitos Fundamentais do Comportamento Humano na Evacuação de Edifícios**

A compreensão do comportamento humano em situações de emergência é um dos principais elementos para a análise da segurança de edifícios, uma vez que o desempenho global da evacuação do edifício não depende apenas das condições físicas do ambiente, mas também das decisões, percepções e interações dos ocupantes [14]. A evacuação é, assim, um processo essencialmente sociotécnico, no qual fatores psicológicos e sociais determinam a eficácia das respostas humanas face a ameaças imediatas [15].

Durante emergências, o comportamento humano pode ser entendido como uma sequência de três etapas fundamentais:

1. Percepção do estímulo ou reconhecimento do perigo;
2. Momento da decisão quanto à necessidade e à forma de evacuar o edifício;
3. Ação física de deslocamento para um local seguro;

Durante a primeira etapa, o indivíduo pode demorar no reconhecimento do estímulo de perigo e, em consequência, na resposta. A etapa da decisão a ser tomada é influenciada por diversas variáveis, algumas delas de natureza cognitiva (o conhecimento e a familiaridade prévia sobre o edifício) e, outras, sociais (a observação dos comportamentos dos ocupantes do edifício). Por último, a fase de movimento está sujeita a fatores físicos, tais como as opções de saída e a densidade de indivíduos presentes no edifício, mas também de fatores comportamentais, tais como a preocupação com familiares e a paragem para recolher objetos essenciais [16].

### **2.2.1 Tipos de Comportamento Humano na Evacuação de Edifícios**

Em situações de evacuação de edifícios, o comportamento dos indivíduos pode variar segundo diversos fatores, tais como os descritos no ponto anterior. Neste sentido, é fundamental distinguir vários tipos de comportamento, como por exemplo: comportamento racional, comportamento de pânico e comportamento de grupo. É também importante comparar, a nível individual, o comportamento altruísta com o comportamento egoísta. Cada um destes cinco tipos de comportamento tem consequências distintas durante o processo de evacuação.

O comportamento racional é o tipo de comportamento frequentemente utilizado em modelos tradicionais de evacuação. Neste tipo de comportamento, pressupõe-se que os indivíduos percebem todos os tipos de informação disponível, avaliam o risco presente e optam por decisões estruturadas, por isso, tendem a escolher rotas que minimizam o tempo de evacuação ou o congestionamento.

Por outro lado, o comportamento de pânico surge como um dos mais perceptíveis em contextos reais e pode-se caracterizar por uma reação emocional acelerada, que tanto se pode manifestar a nível individual como coletivo. Num plano individual, o indivíduo pode perder parcialmente o controlo, o que pode originar as reações momentâneas, agir de forma desordenada ou adotar comportamentos que o podem colocar em perigo. Já no plano coletivo, este comportamento é contagiado entre os ocupantes, aumentando a desordem no interior do edifício e colocando em causa a evacuação de todos os envolvidos. O comportamento de pânico tem como principais consequências as quedas de indivíduos e os bloqueios nas saídas [17]. Contudo, segundo (Lügering et al., 2023) [18], o pânico em massa é menos frequente do que muitas vezes se imagina, por isso, em muitos casos, a ocorrência de multidões em pânico não passa apenas de um mito.

Outro tipo de comportamento existente é o de grupo, que emerge quando pessoas com laços sociais (familiares ou amigos) decidem evacuar juntas, preservando uma coesão de grupo. Neste tipo de comportamento, os membros do grupo tendem a esperar uns pelos outros antes de evacuar, demonstrando proximidade emocional. Apesar de tornar a evacuação num processo mais demorado, permite que esta seja feita de forma mais organizada, reduzindo o risco de entraves repentinos [19].

Durante as evacuações, alguns indivíduos demonstram comportamentos altruístas, enquanto que outros adotam uma postura mais egoísta. No comportamento altruísta, os ocupantes dedicam tempo e esforço a ajudar os mais vulneráveis, como idosos ou crianças, mesmo que estas ações desacelerem a sua evacuação. Estudos recentes demonstraram que estas atitudes podem aumentar a eficiência da evacuação até um certo ponto, pois, quando este comportamento é excessivo, os tempos de evacuação podem sofrer variações consideráveis [20]. Em contrapartida, o comportamento egoísta caracteriza-se por uma evacuação individual, na qual o indivíduo não se preocupa com os restantes ocupantes e prioriza a rota mais rápida para si mesmo. A tensão existente entre estes dois tipos de comportamento não só reflete diferenças morais entre pessoas, mas também tem implicações estruturais no design das rotas de evacuação e dos planos de emergência [21].

### 2.2.2 Papel da Liderança em Cenários de Evacuação

A liderança desempenha um papel crucial durante as evacuações e influencia as decisões tomadas pelas pessoas, a organização dos fluxos de evacuação e ajuda na redução do pânico que, consequentemente, permite melhorar a eficiência de todo o processo. Nos contextos de evacuação, é natural surgirem diferentes tipos de líderes com estilos de liderança distintos. Ao longo deste ponto serão abordados conceitos relacionados com os diferentes tipos de líder, o papel que cada um tem e a eficácia que eles podem trazer nas evacuações.

Em situações de evacuação de edifícios, de forma geral, os líderes tanto podem surgir a partir de estruturas formais, como seguranças, bombeiros, polícias ou funcionários treinados, como de formas informais, que é o caso de indivíduos que tomam iniciativa no momento da emergência, sendo que estes dois tipos têm um impacto significativo no comportamento coletivo e nos tempos de evacuação [22].

Os líderes formais dispõem de autoridade, treino e conhecimento prévio sobre os planos de evacuação e o *layout* do edifício, o que lhes permite tomar decisões fundamentadas relativamente a rotas alternativas e a ajudar os mais vulneráveis. Estudos de evacuação em hospitais e em edifícios complexos demonstram que a presença de indivíduos treinados reduz a hesitação dos ocupantes e melhora a coordenação entre grupos, sobretudo em cenários em que a visibilidade é reduzida ou que a informação não é comunicada na íntegra. Por outro lado, os líderes informais emergem frequentemente em situações reais e podem ser eficazes quando a confiança formal é reduzida ou quando a estrutura organizacional não consegue responder rapidamente a todas as áreas afetadas [23, 24] .

Independentemente do tipo de liderança, o papel do líder durante a evacuação é multifacetado. Numa primeira etapa, estes são responsáveis por analisar e selecionar as rotas de saída, privilegiando as mais seguras, menos congestionadas e, se possível, orientar as pessoas para possíveis saídas alternativas (esta ação é fundamental em edifícios com múltiplas saídas ou em situações de bloqueio de algumas saídas). Numa segunda etapa, são fundamentais para reduzir o pânico através de informação clara, sinais de autoridade e comportamento calmo, permitindo que o pânico não se contagie no grupo de ocupantes. Por último, os líderes organizam os grupos que permitam aumentar a segurança de todos os envolvidos, mesmo que, por vezes, possa desacelerar a evacuação devido à assistência prestada durante todo o processo [25].

A eficácia da liderança na evacuação é comprovada através de estudos de modelação, no quais é demonstrado que uma liderança apropriada permite reduzir os tempos de evacuação e melhorar a segurança, porém estes efeitos dependem do número de líderes, da sua localização no edifício e do tipo de cenário em que se encontram. Investigações recentes sobre evacuações reais e simuladas, num contexto de edifícios de ensino e hospitalares, demonstram que líderes treinados reduzem a ocorrência de comportamentos de risco, diminuem o número de quedas durante a evacuação e melhoram a segurança dos mais vulneráveis [25, 26].

### 2.2.3 Teorias Psicológicas e Modelos do Comportamento Humano

Em situações de evacuação, modelos psicológicos e teóricos tornam-se fundamentais para a compreensão do comportamento humano, de modo a explicar como os indivíduos percebem o risco, tomam decisões e interagem com os restantes. Diferentes abordagens ajudam a interpretar padrões de cooperação, formação de grupos e respostas a sinais ambientais, por isso, são fundamentais para otimizar o plano de evacuação.

Um exemplo destes modelos é o *Social Identity Model*, proposto por (Drury et al., 2025) [27], que descreve como os indivíduos podem desenvolver uma identidade coletiva emergente em contexto de emergências. Em vez de agirem de forma individual ou desorganizada, as pessoas identificam-se com pessoas presentes no local, formando grupos e adotando comportamentos cooperativos, ajudando-se uns aos outros e seguindo líderes informais presentes no grupo. Esta teoria explica o motivo pelo qual o comportamento coletivo tende a ser organizado, apesar da pressão e do risco da evacuação, reforçando desta forma a importância da liderança e da coesão social.

Outro exemplo complementar é a teoria do apego social, a qual indica que os indivíduos permanecem juntos de pessoas com quem possuem vínculos afetivos durante as situações de emergência. Este comportamento de apego influencia todo o processo da evacuação, gerando subgrupos que se movem juntos, que potencialmente reduzem a velocidade de evacuação mas que permitem diminuir o pânico individual. Esta teoria ajuda a compreender fenómenos observados em contextos reais, onde os ocupantes aguardam pelos familiares ou amigos antes de evacuarem, priorizando a segurança coletiva em detrimento da velocidade individual de evacuação [14].

A *crowd dynamics* complementa as teorias anteriores ao fornecer modelos quantitativos do movimento coletivo, incorporando forças físicas e psicológicas para simular de que forma os indivíduos respondem à densidade, fluxo e proximidade com os outros ocupantes, bem como à presença do pânico ou dos líderes. Segundo (Ren et al., 2023) [28], através do ajuste destes modelos para incluir o contágio emocional, a variabilidade individual e as decisões sob stress/pressão, foi possível obter simulações mais realistas de evacuações em edifícios complexos ou com visibilidade reduzida.

Existem também teorias acerca do risco percebido, onde tratam da avaliação subjetiva do perigo e da tomada de decisão em função dessa percepção. O tempo de resposta, a escolha das rotas e a adesão a instruções de evacuação dependem da interpretação ao risco de cada indivíduo, que, como dito anteriormente, é influenciada por fatores pessoais, sociais, ambientais e organizacionais. Literatura recente demonstra que indivíduos que percentem alto risco tendem a reagir mais rapidamente, porém, podem também adotar comportamentos de imitação ou esperar por confirmações da informação por parte de líderes ou de autoridades [29].

Por último, os modelos de tomadas de decisão sob stress permitem explicar como a pressão temporal, a incerteza e o stress afetam o processo cognitivo dos ocupantes. Sob stress elevado, os indivíduos tendem a recorrer a heurísticas sociais, como seguir a maioria das pessoas, em vez de tomarem decisões racionais. Através de estudos de simulação é possível demonstrar que a combinação de fatores como o stress ambiental, informações limitadas e o pânico generalizado, podem gerar atrasos, congestionamentos e escolhas de rotas que não sejam as ótimas, impactando a eficiência da evacuação [30].

#### 2.2.4 Comportamentos emergentes na Evacuação de Edifícios

Fenómenos como *herding*, *arching*, *clogging* e o efeito *faster-is-slower* são manifestações típicas de comportamento emergente em multidões e constituem um ponto fundamental para compreender por que motivo as evacuações, mesmo quando são organizadas, podem-se tornar ineficazes e até mesmo perigosas. Estes fatores emergem da interação entre decisões individuais, influência social, *layout* do edifício em questão e das cargas emocionais. Ao longo deste subcapítulo serão apresentados cada um destes conceitos, destacando mecanismos, consequências e evidências empíricas.

O termo *herding* descreve a tendência que os indivíduos têm, em situações de incerteza, de copiar as ações dos outros em vez de basearem as suas decisões em informação interpretada por eles. Em contextos de evacuação, este fator é perceptível quando as pessoas escolhem rotas ou saídas apenas porque veem os outros a fazê-lo, mesmo quando existem alternativas mais seguras a seguir. Este fenómeno tem explicação cognitiva e social, pois não é necessário raciocionar sobre que opções adotar, visto que é um comportamento de imitação, adotado por um elevado número de pessoas e, como a informação individual é insuficiente, a informação social torna-se dominante face a esta. Estudos empíricos e de simulação recentes demonstram que o *herding* pode levar ao subaproveitamento de saídas alternativas e à formação de *clusters* que aumentam o tempo total de evacuação, sobretudo sob condições de baixa visibilidade ou quando a população apresenta diferentes níveis de experiência em contextos de evacuação [31].

*Archiving* é um padrão no qual os indivíduos se acumulam junto a um ponto de saída, formando um arco (ou semi-círculo), enquanto que *clogging* refere-se ao bloqueio intermitente que resulta da acumulação, reduzindo o fluxo no ponto de saída. Estes fenómenos são especialmente sensíveis à largura das saídas do edifício, à propensão de haver empurrões e às características físicas dos ocupantes, nomeadamente o tamanho e a mobilidade. Através de simulações é possível observar que o fenómeno de *arching* precede frequentemente episódios de bloqueios ou quedas, contribuindo para situações de risco por esmagamento. A partir de pequenas alterações arquitetónicas, como o alargamento dos locais e dos pontos de saída, e de medidas organizacionais, como o controlo do fluxo e a orientação prévia, é possível

reduzir estes dois fenómenos e, ao mesmo tempo, melhorar substancialmente o fluxo de saída [32].

O efeito *faster-is-slower* descreve uma contradição observada em muitas simulações, quando os indivíduos tentam aumentar a sua velocidade para saírem do edifício, quer seja a correr ou a empurrar os demais, o resultado obtido irá-se traduzir num aumento do tempo total de evacuação devido aos bloqueios, empurrões e instabilidades no fluxo de saída. Através de estudos recentes nos quais se identificaram este fenómeno foi possível demonstrar que a partir de parâmetros como a largura das portas de saída, a frequência de empurrões e a diversidade de comportamentos dos indivíduos, é possível determinar se o fenómeno de *faster-is-slower* se manifesta e em que intensidade [33].

Estes conceitos são todos interdependentes, pois o *herding* tende a concentrar as pessoas em rotas similares, o que faz aumentar a probabilidade de *arching* e *clogging* em pontos fundamentais para a evacuação. A presença destes dois fenómenos tende a aumentar a pressão e o stress local, criando condições para o *faster-is-slower* se manifestar. Por isso, para obter respostas eficazes é necessário soluções que integrem estes conceitos, como por exemplo: alargar as saídas, evitar barreiras, colocar sinalização e informação legível e clara, bem como adotar políticas que promovam o comportamento cooperativo.

## 2.3 Representação do Comportamento Humano na Simulação

### 2.3.1 Evolução dos Modelos de Evacuação

Ao longo dos anos, a investigação sobre evacuações em edifícios passou por uma evolução significativa. Esta evolução pode ser entendida como uma progressiva incorporação de fatores comportamentais, cognitivos e sociais, em vez de tratar a evacuação apenas como um problema de fluidez física dos indivíduos. Ao longo deste ponto serão distinguidas três grandes famílias de modelos: os modelos baseados em física, em agentes e os híbridos.

Os modelos baseados em física, especialmente aqueles inspirados em modelos de forças sociais, consideram os indivíduos como corpos submetidos a diferentes tipos de forças. Ocorre uma força "desejada" que impulsiona o agente para a saída, forças de repulsão que permitem que o indivíduo não colida com os restantes ocupantes ou com obstáculos e forças que afetam a velocidade dos indivíduos em função do fluxo presente. Esta formulação permite capturar fenómenos emergentes como congestionamentos e *arching*. Contudo, apesar da sua capacidade em reproduzir movimentos

coletivos, estes modelos não incorporam adequadamente processos cognitivos e sociais, tratando o comportamento humano apenas como um resultado exclusivo de interações mecânicas [34].

Os modelos baseados em agentes introduzem um nível mais elevado na autonomia individual, através da atribuição da capacidade de perceber o ambiente, avaliar as alternativas e a tomada de decisões por parte de cada um dos ocupantes. Nesta abordagem, cada agente possui atributos próprios, tais como a velocidade, a mobilidade, a familiaridade com o espaço ou a sensibilidade ao risco, bem como seguem um conjunto de regras comportamentais que podem incluir e incorporar fenômenos sociais, como seguir os outros, permanecer com os familiares, cooperar e adaptar a rota de fuga em função da informação disponível. Ao representar explicitamente a tomada de decisão e a variabilidade comportamental, estes modelos aproximam a simulação da realidade humana, pois incluem aspectos psicológicos e sociais que os modelos puramente físicos não conseguem capturar [14].

Por último, os modelos híbridos surgem como resposta à necessidade de combinar a precisão física dos modelos de forças sociais com a flexibilidade comportamental dos modelos baseados em agentes. Nestes sistemas, os agentes continuam a tomar decisões cognitivas mas o seu movimento espacial é regulado segundo princípios físicos que asseguram coerência no tratamento de colisões, acelerações e efeitos de densidade. Esta integração é teoricamente robusta, pois reconhece que as evacuações são processos cognitivos, influenciados por percepções e interações sociais, bem como por processos físicos, condicionados por limitações estruturais e pela dinâmica da multidão. No entanto, estes modelos apresentam desafios relacionados com a necessidade de calibrar adequadamente parâmetros físicos e comportamentais, de forma a garantir que as decisões individuais se traduzam em movimentos realistas [35].

### 2.3.2 Modelação do Comportamento Humano através do Pathfinder

A representação do comportamento humano através de simuladores de evacuação exige uma integração de mecanismos físicos, cognitivos e sociais que permitam aproximar o movimento dos ocupantes das dinâmicas observadas empiricamente. O *Pathfinder*, software desenvolvido pela *Thunderhead Engineering*, adota uma abordagem híbrida na qual os agentes incorporam características físicas, como a velocidade, aceleração ou limitações de movimento, bem como comportamentos decisivos, como a escolha da rota, a formação de grupos e a resposta ao alarme. Através desta combinação é possível obter uma modelação mais realista da evacuação, conciliando elementos da dinâmica de multidões com os princípios de tomada de decisão sob incerteza [36].

Um dos elementos fundamentais na modelação comportamental no *Pathfinder* é a utilização de diferentes perfis de velocidade que traduzem a variabilidade individual dos ocupantes [37]. É atribuído um perfil a cada agente, no qual se define a sua velocidade, aceleração, capacidade de adaptação ao congestionamento e limitações físicas específicas. Este mecanismo permite representar populações heterogêneas, de modo a incluir idosos, crianças, adultos treinados ou pessoas com mobilidade reduzida, reproduzindo a diversidade demográfica típica de edifícios públicos. Esta atribuição de perfis diferenciados é coerente com a literatura que destaca o impacto da heterogeneidade física e comportamental no fluxo de evacuação [36].

O *Pathfinder* incorpora comportamentos sociais simplificados, como o *follow-the-leader*, que representam a tendência observada de alguns indivíduos seguirem outros considerados mais experientes, mais informados ou simplesmente mais decididos. Este comportamento é consistente com teorias psicológicas de evacuação que descrevem a dependência de informação social em contextos de incerteza, particularmente quando os ocupantes não estão familiarizados com o edifício. No modelo, este mecanismo é operacionalizado através de propriedades de movimento, o que permite que os agentes adotem trajetórias semelhantes às de um líder formal ou informal [36].

Este *software* também permite criar grupos de indivíduos que se movem de forma coordenada, o que permite simular famílias, equipas de trabalho ou grupos escolares. Os agentes pertencentes ao mesmo grupo tendem a manter uma proximidade, a ajustar a sua velocidade ao membro mais lento e a resistir à separação durante a evacuação. A incorporação deste mecanismo permite representar um dos fenómenos sociais mais frequentes e empiricamente sustentados em contextos de pânico controlado [36].

O tempo de pré-movimento (intervalo entre o momento em que o alarme é percebido e o início do deslocamento) constitui um dos fatores mais determinantes na evacuação. O *Pathfinder* modela este aspeto através da atribuição de tempos de reação baseados em distribuições estatísticas, o que permite representar a hesitação, a avaliação do risco, a comunicação interpessoal, a procura por familiares ou a recolha de objetos que sejam considerados como importantes [36].

No *Pathfinder*, a tomada de decisão é gerida por um conjunto de algoritmos que ponderam fatores como a distância às saídas, a presença de obstáculos, os níveis de congestionamento e, quando aplicável, as preferências comportamentais definidas para cada agente. Estas prioridades determinam o modo como os ocupantes selecionam e reavaliam as rotas à medida que o ambiente se altera. A decisão pode ser dinâmica, permitindo que os agentes ajustem a sua trajetória quando se deparam com saturação de corredores ou alterações no fluxo [36].

## 2.4 Comportamento Humano na Evacuação de Edifícios - Casos de Estudo

Ao longo deste ponto são apresentados casos de estudo que relacionam o comportamento humano na evacuação de edifícios e a simulação como recurso para efetuar a análise.

- (Safari,M. et al. 2024) [38]
  - Este caso de estudo analisa a evacuação de uma escola no Irão com 522 ocupantes, dos quais 33 são professores/funcionários e os restantes 489 são estudantes. O objetivo principal consistiu em compreender como diferentes estratégias comportamentais influenciam o desempenho da evacuação e, por isso, através do *Pathfinder*, os autores criaram um modelo detalhado da infraestrutura da escola bem como das características dos ocupantes. Para tal, foram criados três cenários com diferentes comportamentos - No cenário 1, cada indivíduo dirige-se para qualquer saída, no cenário 2, os ocupantes dirigem-se para as saídas principais da escola e no cenário 3, os estudantes seguiram os professores até às saídas. Os resultados demonstraram que o comportamento de seguir os líderes, presente no cenário 3, reduz significativamente conflitos nas interseções e melhora o fluxo de saída, enquanto que a preferência pelas saídas principais (cenário 2) cria congestionamentos, refletindo o fenómeno real de *herding*. Portas estreitas e salas sobrelotadas agravam os tempos de espera e atrasam a evacuação, demonstrando assim a interação entre o comportamento humano e a geometria do edifício.
- (Fan, Y.,2024) [39]
  - Neste caso de estudo é utilizado o *Pathfinder* na evacuação de uma oficina industrial, com o objetivo de avaliar riscos, gargalos e possíveis melhorias no *layout*. É também dada atenção aos tempos de reação, às velocidades individuais e às variações dos perfis comportamentais dos trabalhadores, tais como: trabalhadores experientes com conhecimento prévio das saídas, trabalhadores novos com pouca familiaridade com o espaço e indivíduos com diferentes níveis de mobilidade. Esta simulação inclui tempos de pré-movimentação, permitindo reproduzir a hesitação, o reconhecimento do alarme, a procura por colegas e compara cenários com orientação fornecida por supervisores, ilustrando a liderança, com cenários sem qualquer coordenação e supervisão. Os principais resultados indicam que a pré-movimentação é um dos fatores mais críticos, pois, atrasos de 10 a 20 segundos tendem a aumentar o tempo total de evacuação em mais de 40%, os trabalhadores que seguem rotas principais provocam congestionamentos e a introdução de liderança formal, dada pelos

supervisores, diminui significativamente os conflitos nas portas e reduz o tempo total de evacuação.

- (Selim, 2024) [40]
  - Neste caso de estudo é abordada a evacuação em edifícios altos e super-altos, dando ênfase no impacto de diferentes tipos comportamentais e estratégias de evacuação. O autor utiliza o *Pathfinder* para modelar os perfis dos indivíduos com diferentes velocidades, idades e níveis de mobilidade, evacuações com e sem a utilização de elevadores, cenários com informação clara e organizada e para comparar os modos SFPE e *Steerign* presentes no *Pathfinder*. Através da análise profunda de como cada modo de simulação reproduz diferentes aspetos do comportamento humano, conclui-se que o modo SFPE apresenta fluxos mais rápidos mas menos realistas, pois ignora micro-interações humanas enquanto que o modo *Steering* gera comportamentos emergentes, que são fundamentais para reproduzir evacuações reais.
- (Lyu et al., 2023) [41]
  - Embora não dependa exclusivamente do *Pathfinder*, este caso de estudo combina dados empíricos de observação humana com simulações de evacuação computacional em grandes recintos públicos. O foco principal deste caso de estudo consiste em compreender como fatores como a familiaridade com o local, a escolha de rotas preferenciais, a tendência do efeito *herding*, a densidade inicial da multidão e a visibilidade e o stress alteram o desempenho da evacuação. Para isso, os autores comparam três modelos de decisão humana: o primeiro modelo consiste na escolha racional da rota, o segundo na escolha baseada em tendências sociais, como seguir a maioria dos ocupantes, e o terceiro na escolha probabilística condicionada pela perceção do risco. Os resultados mostram que o efeito de seguir multidões pode reduzir tempos de evacuação quando a densidade é baixa, mas causa bloqueios severos quando a densidade é alta. A falta de familiaridade com as saídas alternativas é uma das principais causas de congestionamento em recintos grandes.
- (Li et al., 2020) [42]
  - Este caso de estudo desenvolve um simulador baseado em agentes para analisar evacuações em edifícios fechados, incorporando três dimensões fundamentais: a localização do incêndio, os atrasos de pré-movimentação e os modelos comportamentais heterogêneos. Através da comparação com outros estudos, este estudo demonstrou que pequenas mudanças no comportamento, como por exemplo: 20% dos indivíduos seguirem a maioria, permite alterar completamente os padrões de congestionamento, atrasos de pré-movimentação têm maior impacto que a velocidade de deslocação, o comportamento de grupo

aumenta a segurança local mas diminui a eficiência global e rotações improvisadas de agentes, ou seja, não seguirem a rota ideal, tende a aumentar significativamente os tempos de evacuação, aproximando desta forma, o modelo da realidade observada.

- (Ronchi & Nilsson 2013) [15]
  - Neste caso de estudo são aplicados diferentes modelos de evacuação com a finalidade de estudar estratégias de evacuação total em edifícios altos, analisando em particular o impacto de comportamentos humanos complexos nas fases iniciais da emergência. Os autores simulam vários cenários que incluem hesitação, decisões influenciadas por informação incompleta, comportamento de grupo e improvisação de rotas. Os resultados demonstram que a inclusão destes fatores comportamentais aumentam significativamente os tempos de evacuação e modificam os fluxos nas escadas, especialmente quando existe dependência de sistemas de comunicação ou de guias durante a evacuação.
- (Bode & Codling 2013) [43]
  - Este caso de estudo utiliza ambientes virtuais imersivos para investigar como os ocupantes escolhem rotas de evacuação em situações de emergência. Os autores analisam de que forma fatores como a familiaridade com o edifício, a visibilidade das saídas, a confiança na sinalização e o comportamento dos outros ocupantes moldam a decisão da rota a percorrer. Os resultados demonstram que a maioria dos indivíduos não escolhe a saída mais próxima, mas sim a mais familiar, mesmo que essa escolha aumente o tempo total de evacuação. Em contextos de pouca visibilidade, os participantes tendem a seguir a multidão, reforçando o fenômeno de *herding*.
- (Kong et al., 2023) [44]
  - Este caso de estudo aborda a eficiência da evacuação em edifícios de ensino superior, onde a elevada densidade populacional e a diversidade de perfis dos ocupantes tornam o processo mais complexo. Através da modelação de um edifício de uma universidade chinesa, foram simulados cenários de incêndio e diferentes tipos de comportamento humano. Para tal, foi utilizado o *Pathfinder* para criar um modelo tridimensional do edifício e para parametrizar os ocupantes com diferentes velocidades de deslocamento, hesitação inicial e escolha de rotas, onde foram testados cenários com bloqueio parcial das escadas e diferentes níveis de familiaridade dos ocupantes com o edifício. Os resultados demonstraram que a familiaridade com o edifício reduz significativamente os tempos de evacuação, o bloqueio das escadas aumentou o risco de congestionamentos e atrasos e o comportamento de grupo atrasou a evacuação, mas reduziu o pânico individual.

- (Nilsson & Johansson 2009) [45]
  - Este caso de estudo concentra-se na fase de pré-movimentação, de forma a analisar como a influência social condiciona a decisão inicial de evacuar. Os autores realizaram testes controlados em edifícios, nos quais simulam cenários de alarme de incêndio e não só monitorizam o tempo até ao início do movimento, mas sobretudo o modo como as pessoas procuram a confirmação social antes de agir. Os autores concluíram que, em mais de 70% dos casos, os indivíduos não tomam decisões autónomas, ou seja, esperam pela reação dos outros, procuram sinais de autoridade ou observam explicitamente o comportamento de pares próximos.
- (Sharma et al., 2018) [46]
  - Neste caso de estudo, os autores desenvolvem um modelo computacional de evacuação baseado em agentes inteligentes. Cada agente é dotado de atributos como o nível de stress, perceção do perigo, intenção de evacuar, aversão ao risco, familiaridade com o edifício e capacidade de seguir ou influenciar outros agentes. Os autores introduziram um mecanismo de propagação de informação e comportamento, permitindo que os agentes respondam uns aos outros de forma semelhante ao que acontece em multidões humanas. Este mecanismo inclui aspetos como a imitação de decisões, hesitação antes do início da evacuação, influência do grupo, formação de subgrupos e procura por líderes informais. Este estudo demonstra que agentes com perceção limitada e maior ansiedade tendem a originar congestionamento mais cedo, contribuindo para fenómenos de *faster-is-slower*. Já os agentes mais racionais, ou com experiência prévia, conseguem suavizar o fluxo, orientar os outros e reduzir a formação de *bottlenecks*.
- (Chen et al., 2024) [47]
  - Neste caso de estudo foi avaliado o processo de evacuação de passageiros em estações de metro com grande fluxo de pessoas. Para tal, foi criado um modelo detalhado de uma estação de metro em Shenzhen, incorporando dados reais de densidade populacional e de fluxos de passageiros e, através do *Pathfinder*, simularam-se diferentes cenários de emergência, incluindo incêndios em plataformas e bloqueio de escadas rolantes. Os agentes foram parametrizados com diferentes perfis de comportamento. Os principais resultados demonstraram que a presença de líderes treinados reduziu os tempos de evacuação em mais de 15% e a densidade elevada de passageiros aumentou significativamente o risco de congestionamento.

- (Şahin et al., 2019) [48]
  - Neste caso de estudo, o modelo proposto pelos autores combina algoritmos de decisão inspirados em teorias psicológicas com um sistema multiagente capaz de capturar interdependências entre indivíduos. Para tal, cada agente é representado como uma entidade com capacidade de percepção de estímulos ambientais, avaliação do risco, memória das saídas conhecidas e comportamento adaptativo que muda ao longo da simulação. Este estudo integra fatores como o pânico, a confiança, a liderança e o comportamento altruísta, permitindo que os agentes reajam de forma diferente à mesma situação. Agentes com elevado nível de ansiedade tendem a seguir os outros mais rapidamente, reproduzindo o fenómeno de *herding*; agentes líderes influenciam positivamente o fluxo ao dispersar multidões para saídas alternativas enquanto que os agentes altruístas reduzem temporariamente a sua velocidade, podendo criar pequenas perturbações locais no fluxo.
- (M. Rismanian et al. 2021) [49]
  - Este caso de estudo tem como principal objetivo compreender como é que diferentes padrões de comportamento coletivo influenciam o desempenho global das evacuações. Neste caso, os autores analisaram particularmente a forma como a dinâmica social afeta a distribuição dos ocupantes pelas rotas e a formação de congestionamentos. Para tal, começaram por realizar testes reais em ambientes controlados, de modo a registar tempos de pré-movimento, tomada de decisão e escolha de rotas. Posteriormente, parametrizaram estes comportamentos no *Pathfinder* de forma a criar diferentes cenários. Os resultados demonstraram que fenómenos de *herding* e imitação aumentam rapidamente os congestionamentos e levam à subutilização de rotas alternativas, a presença de líderes informados reduz os tempos totais e os pequenos grupos tendem a sacrificar a eficiência para manter a coesão entre o grupo.
- (P. Wang et al. 2022) [30]
  - Neste caso de estudo, os autores tiveram como objetivo investigar de que forma os fatores ambientais adversos (fumo, ruído, pouca visibilidade) influenciam os aspetos psicológicos e sociais do comportamento humano. Os autores procuraram determinar de que modo o stress ambiental altera a tomada de decisão, a velocidade, a imitação de comportamentos e a dependência de líderes. Para atingirem este objetivo, começaram por desenvolver um modelo teórico que relaciona os níveis de stress com as mudanças comportamentais e posteriormente, implementaram esse modelo no *Pathfinder*, ajustando parâmetros como o pré-movimento, as taxas de hesitação e a probabilidade de seguir outros agentes. Os resultados das simulações indicaram que a presença

de fatores de stress ambiental intensificam comportamentos sociais como o *herding*, aumentam o tempo de pré-movimento, reduzem a exploração de rotas alternativas e provocam fluxos irregulares.

- (J. Wei et al. 2022) [50]
  - O objetivo deste caso de estudo consiste em analisar de que forma as características psicológicas e sociais influenciam evacuações em sistemas subterrâneos urbanos, visto que são ambientes com pouca familiaridade e a orientação limitada aumenta os comportamentos coletivos, como a imitação. Este estudo utiliza o *Pathfinder* para simular evacuações em redes subterrâneas, através da variação de diversos parâmetros. Os autores também analisam o efeito que o fumo e outras limitações visuais têm nas decisões dos ocupantes. Os resultados demonstram que a falta de familiaridade leva à concentração excessiva de pessoas nas saídas mais óbvias, enquanto que agentes com conhecimento prévio do local distribuem melhor os fluxos para outras saídas. A má sinalização aumenta significativamente o comportamento de *herding*, o que gera congestionamentos severos. Através da introdução de líderes, é possível reduzir estes efeitos, mesmo que a percentagem de agentes que desempenham esse papel seja pequena.

## 2.5 Estudo Bibliométrico sobre o Comportamento Humano na Evacuação de Edifícios

Ao longo desta secção é realizada uma análise da evolução das publicações científicas e dos conceitos associados ao comportamento humano nas evacuações, bem como do papel da simulação na sua compreensão. Para tal, recorre-se aos dados bibliográficos disponíveis na base de dados Scopus, utilizando a seguinte combinação de palavras-chave: "human behaviour"AND "Evacuation"AND "Simulation", de forma a identificar as tendências, os padrões de investigação e o crescimento do interesse científico nesta área ao longo dos anos. Para os efeitos desta investigação, foram utilizados os seguintes critérios:

Data da Pesquisa: 6 de dezembro de 2025

Campos de Pesquisa: "Article tittle, Abstract, Keywords"

Período: 2010 a 2024

Idioma: Inglês

Tipo de Documento: "Article, Conference Paper and Book Chapter"

Critério de Exclusão: Apenas documentos ingleses

Após a definição destes critérios, o resultado obtido consistiu num conjunto de 326 documentos encontrados. Ao longo desta secção são demonstrados e analisados gráficos acerca deste resultados.

### Documentos por ano

A evolução do número de documentos publicados ao longo do período analisado, mediante a combinação de palavras-chave, encontra-se demonstrada na Figura 1.



Figura 1: Número de publicações por ano

A Figura 1 demonstra uma evolução nos primeiros 5 anos, porém, após esse período, não se manteve nos restantes anos. De salientar os anos de 2019 e de 2021 como os anos com mais documentos publicados.

### Documentos por País

Na Figura 2 está representada a contribuição de cada país para o número de documentos publicados. É possível observar uma maior contribuição do continente americano, nomeadamente na América do Norte, e no continente asiático.

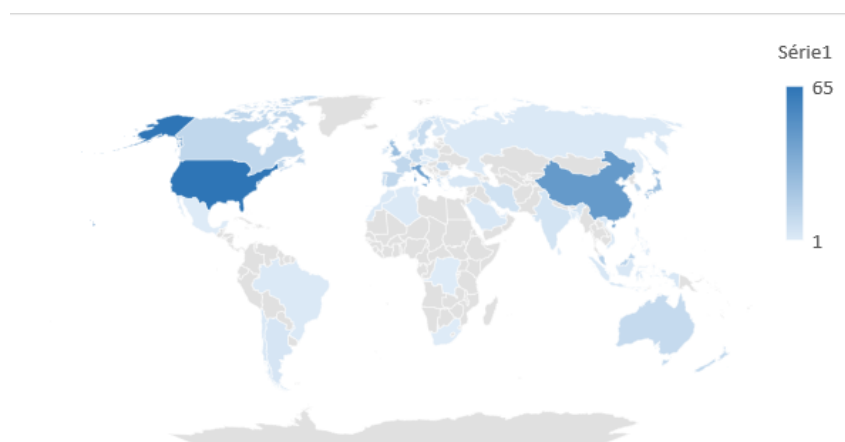


Figura 2: Países com documentos publicados

Na Figura 3 estão representados os 15 países com maior número de publicações, destacando-se os Estados Unidos com 65, a China com 45 e a Itália com 41.

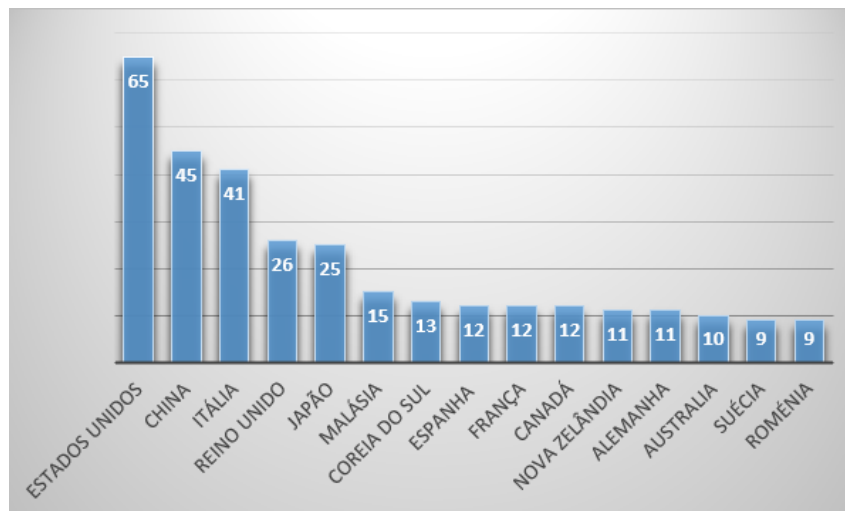


Figura 3: Top15 Países com mais documentos publicados

#### Documentos por Tipo

Na Figura 4 estão representadas as percentagens de cada tipo de documento obtido nesta análise. A figura ilustra que dos 326 documentos, 54% são artigos, 34% são artigos de conferência e os restantes 12% são capítulos retirados de livros.

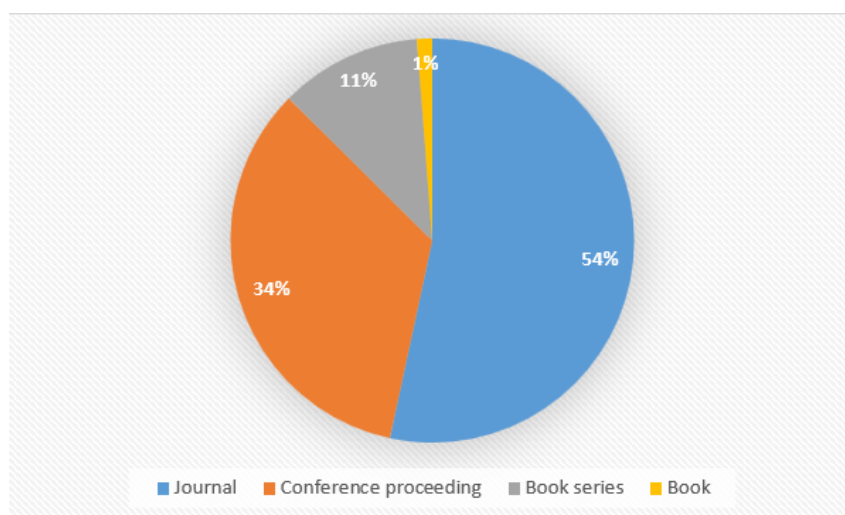


Figura 4: Percentagem de documentos por tipo

### Documentos por área científica

Na Figura 5 estão representadas as áreas científicas com maior número de artigos publicados. As áreas da Ciência da Computação e da Engenharia são as mais predominantes, com 164 e 158 documentos publicados, respetivamente.

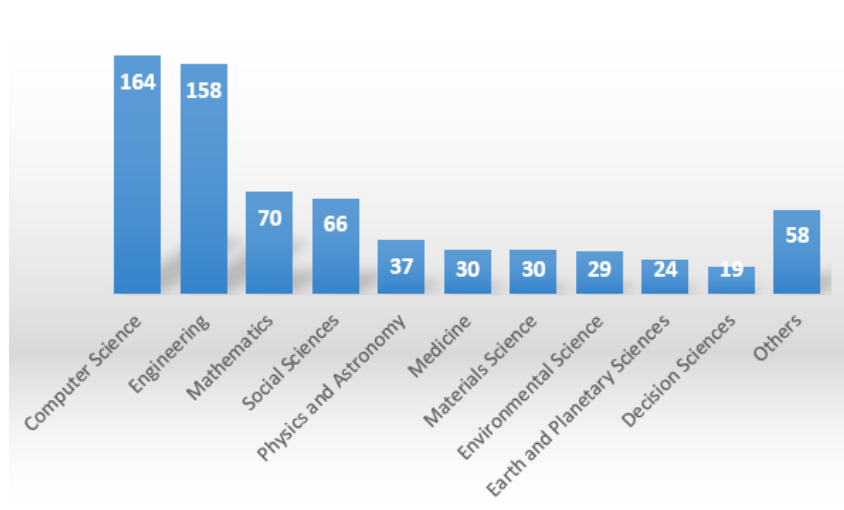


Figura 5: Número de documentos por área científica

## 2.6 Revisão da Literatura da Dissertação

A revisão da literatura realizada ao longo deste capítulo permitiu consolidar os principais conceitos relacionados com o comportamento humano durante a evacuação de edifícios, bem como compreender de que modo estes fenómenos influenciam a eficiência deste processo. Este conjunto de contributos teóricos e empíricos constitui a base da dissertação, permitindo enquadrar os fatores que condicionam as ações dos ocupantes perante situações de emergência.

A análise efetuada demonstrou que a evacuação é um processo complexo, dependente das características físicas do edifício e das perceções, decisões e interações entre indivíduos. Fatores como a idade, a mobilidade, a experiência prévia, a perceção ao risco e as limitações cognitivas revelam-se essenciais para explicar a variabilidade dos comportamentos individuais. A dimensão social da evacuação, expressa através da formação de grupos, da procura por familiares, da imitação do comportamento dos restantes ocupantes e da dependência de informação, permitiu demonstrar um papel determinante na organização ou desorganização dos fluxos de saída. Os comportamentos emergentes evidenciam de que forma pequenas interações locais podem desencadear padrões coletivos que afetam significativamente o desempenho global da evacuação.

A liderança também se revelou importante, quer seja formal ou informal, como elemento de orientação durante a evacuação. Os estudos analisados mostraram que líderes treinados reduzem o pânico, facilitam a dispersão dos agentes pelas rotas alternativas e diminuem o congestionamento. As dinâmicas de grupo e o comportamento altruísta reforçam a importância de incorporar aspetos sociais e emocionais nos modelos de simulação.

No que toca à representação computacional destes fenómenos, verificou-se que a evolução dos modelos de evacuação tem seguido uma tendência clara para a incorporação de fatores cognitivos, sociais e comportamentais. Nesta perspetiva, o *Pathfinder* destaca-se por permitir representar perfis de velocidade diferenciados, tempo de pré-movimento, formação de grupos, tomadas de decisão dinâmicas e comportamentos sociais como o *follow-the-leader*. Estas características tornam o *Pathfinder* numa ferramenta adequada para a análise de cenários realistas de forma a avaliar a influência do comportamento humano nas evacuações.

Por último, os casos de estudo analisados permitiram reforçar esta conclusão, visto que a inclusão de aspetos comportamentais nos modelos de evacuação altera substancialmente os resultados obtidos. Estes estudos evidenciam que a modelação do comportamento humano não pode ser dissociada da análise da evacuação, sendo essencial para a compreensão das dinâmicas reais e para formular propostas de melhoria nos planos de emergência dos edifícios.

## Capítulo 3

# Métodos e Aplicações

Após a revisão da literatura apresentada no capítulo anterior, torna-se necessário aplicar os fundamentos teóricos a um contexto prático. Neste sentido, o presente capítulo apresenta o caso de estudo utilizado nesta dissertação.

Para a realização desta análise foi selecionada a Biblioteca Municipal de Gondomar como edifício de referência. A escolha deste edifício deve-se ao facto de se tratar de um espaço público com uma ocupação diversificada, no qual coexistem diferentes perfis de utilizadores, como crianças, estudantes, adultos e idosos.

### 3.1 Estrutura da Biblioteca Municipal de Gondomar

A Biblioteca Municipal de Gondomar está localizada na Avenida 25 de Abril, 82, 4420-354 Gondomar, tal como está representado na Figura 6, na qual podemos observar a localização do edifício no *Google Maps*. Este edifício foi projetado pelo arquiteto Luís Miranda e abriu portas a 1 de outubro de 2005, sendo composto por 3 pisos com uma área superior a  $3000\text{ m}^2$ .



Figura 6: Localização - Biblioteca Municipal de Gondomar (Google, 2026)

Ao longo destes 3 pisos estão distribuídos o bar, a receção, os escritórios administrativos, o auditório, as casas de banho, o espaço dedicado às crianças, aos adultos e um espaço multimédia. A biblioteca possui 1 elevador com capacidade para 8 pessoas (600Kg), 2 lances de escadas que interligam o piso 0 com o piso 1, 1 lances de escadas que interliga o piso 1 ao piso 2 e as escadas de emergência, na zona lateral da biblioteca, que interligam os 3 pisos. Relativamente aos acessos, a biblioteca possui a saída principal, por onde é realizada a entrada no edifício, uma saída nas traseiras do edifício, que está associada às cargas e descargas de materiais para uso da biblioteca e a saída de emergência, que tal como referido anteriormente, está localizada na lateral do edifício.

Já ao número máximo de ocupantes presentes na biblioteca, não foi possível obter essa informação, visto que nem os responsáveis pelo edifício tinham acesso à mesma. Porém, após um levantamento efetuado pelas duas partes, chegou-se a uma conclusão de que o número a adotar para este estudo seria de 350 pessoas, assumindo este valor como máximo da capacidade do edifício.

### 3.1.1 Piso 0

O piso 0 é o piso onde está localizada a receção, o bar, os escritórios administrativos e o auditório. Este é o piso dedicado para as crianças, as quais têm acesso a duas salas dedicadas para as mesmas e a uma área repleta de livros e mesas, representada na figura 7.



Figura 7: Piso 0 - Espaço dedicado para as crianças

O piso 0 também conta com casas de banho, um elevador, dois lances de escadas que permitem aceder ao piso 1 e a saída de emergência. Este é o piso que os ocupantes se devem deslocar, em situação de evacuação de emergência, sendo estritamente importante o cumprimento com todas as normas de segurança e de evacuação, de modo a evitar congestionamentos. Na Figura 8 está representada a entrada principal do edifício.



Figura 8: Entrada Principal do Edifício

### 3.1.2 Piso 1

Visto que o piso 0 é dedicado às crianças, o piso 1 é dedicado ao espaço dos adultos. No que toca ao espaço dedicado aos adultos, representando na Figura 9, este conta com uma área dedicada a pedidos de informação acerca dos livros presentes neste piso, bem como uma área comum a este balcão, na qual é possível ler livros, revistas, jornais ou até mesmo estudar. Relativamente aos acessos, é possível aceder ao piso

0 através dos acessos mencionados anteriormente e é possível aceder ao piso 2 numa zona de escadas diferente das mencionadas no piso 0, visível na figura 9.



Figura 9: Piso 1 - Espaço dedicado para os adultos

### 3.1.3 Piso 2

Por último, o piso 2 está dedicado ao espaço multimédia, visível na Figura 10, no qual é possível ter acesso a computadores, nos quais podemos realizar atividades relacionadas com a escola ou universidade, quer seja na realização de pequenas tarefas ou de trabalhos, e também atividades mais voltadas para a área do lazer, como aceder a redes sociais ou ver vídeos e filmes. No que toca à evacuação deste piso, tal como referido na apresentação dos outros 2 pisos, é possível através de um lanço de escadas que dá acesso ao piso 1, através das escadas de emergência que fazem a interligação entre os 3 pisos e através do elevador presente no edifício.



Figura 10: Piso 2 - Espaço dedicado para a multimédia

## 3.2 Estudo da Simulação

### 3.2.1 Modelo Computacional

Tal como referido ao longo da dissertação, o software a utilizar para a realização do estudo é o *Pathfinder*. Este software é ideal para a criação de modelos de simulação 3D que permitem analisar o comportamento humano de forma detalhada. Por isso, visto que o intuito é realizar o estudo de diversos tipos de comportamentos, é necessário explorar primeiro o software, de forma a garantir que todos os requisitos do estudo são cumpridos.

A interface do *Pathfinder* é bastante intuitiva, o que permite obter uma experiência fluída e com poucos entraves ao utilizador. Através da página web oficial do programa, é possível ter contacto com tutoriais e documentos que possibilitam que um utilizador com pouca ou nenhuma experiência, tenha suporte e apoio na construção do seu modelo 3D e na resolução de possíveis problemas. Na figura 11, está representada a interface inicial do programa.

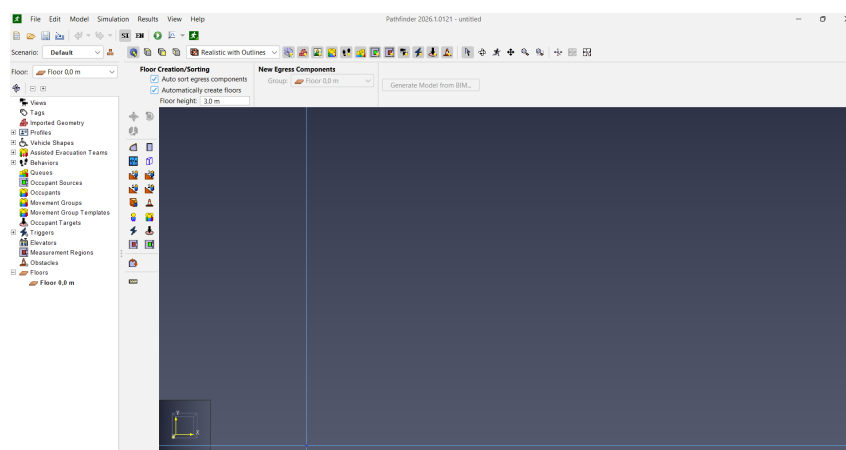


Figura 11: Interface Pathfinder

De modo a criar o modelo computacional, foi necessário utilizar a funcionalidade "*Import*" para obter a planta do edifício através dos ficheiros .DWG de cada um dos pisos.

Para a criação das várias divisões e corredores, foram utilizadas as ferramentas "*Add a Rectangular Room*" e "*Add a Polygonal Room*" conforme as necessidades de cada uma das divisões. Através da Figura 12, é possível observar o resultado final das divisões do piso 0.

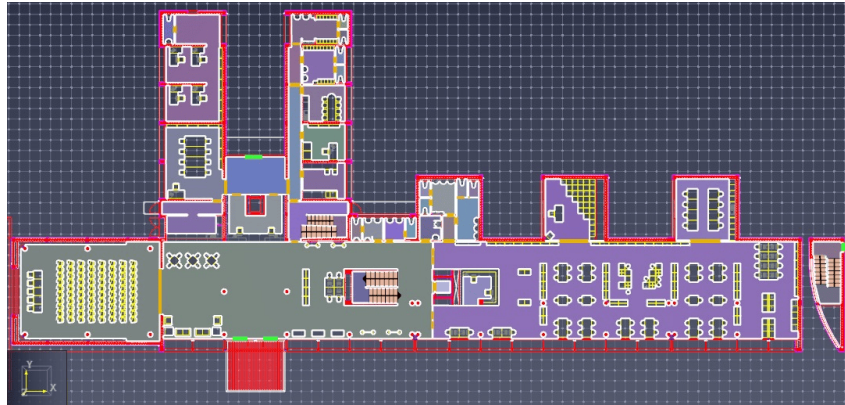


Figura 12: Divisões do Piso 0

Após a criação de todas as divisões do modelo, foram criadas as portas que serviram para interligar as diferentes zonas do edifício. Para o fazer, recorreu-se à ferramenta "*Add a New Door*", que permitiu criar de forma bastante simples as entradas e saídas dentro do próprio edifício bem como para o exterior deste. O próprio *Pathfinder* permite configurar as portas de diversas formas, desde o estado em que a porta se encontra (aberta/fechada), o taxa máxima de fluxo de pessoas e o sentido de passagem. As portas criadas entre uma divisão e o "exterior" são automaticamente configuradas como saídas do edifício. Na Figura 13, estão representados os dois tipos de portas, estando o amarelo associado a uma porta que conecta duas divisões e o verde a uma porta que simboliza a saída para o exterior do edifício.

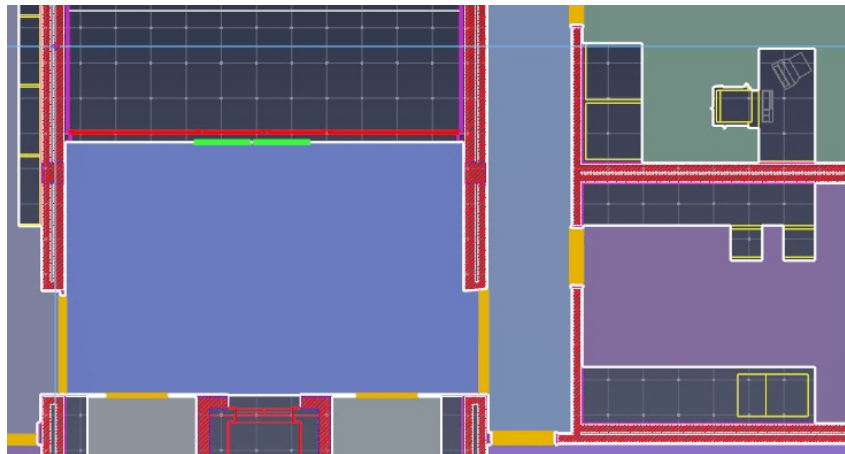


Figura 13: Representação Computacional das Portas

De forma a tornar possível todos os ocupantes se dirigirem até ao piso 0, foi necessário criar as escadas e o elevador no modelo computacional. Relativamente à criação das escadas, é possível utilizar duas funções presente no *software*, a opção "*Create stairs by choosing one point on an edge*" ou a "*Create stairs between two edges by choosing a point on each*". Na primeira opção, é apenas necessário escolher um ponto da aresta pretendida de um piso e o *Pathfinder* vai criar a escada, enquanto que na segunda opção, é possível ter mais controlo na criação da escada, visto que é necessário seleccionar o local de início e fim do lanço de escadas. Através da Figura 14, é possível observar o resultado final implementado através da segunda opção.

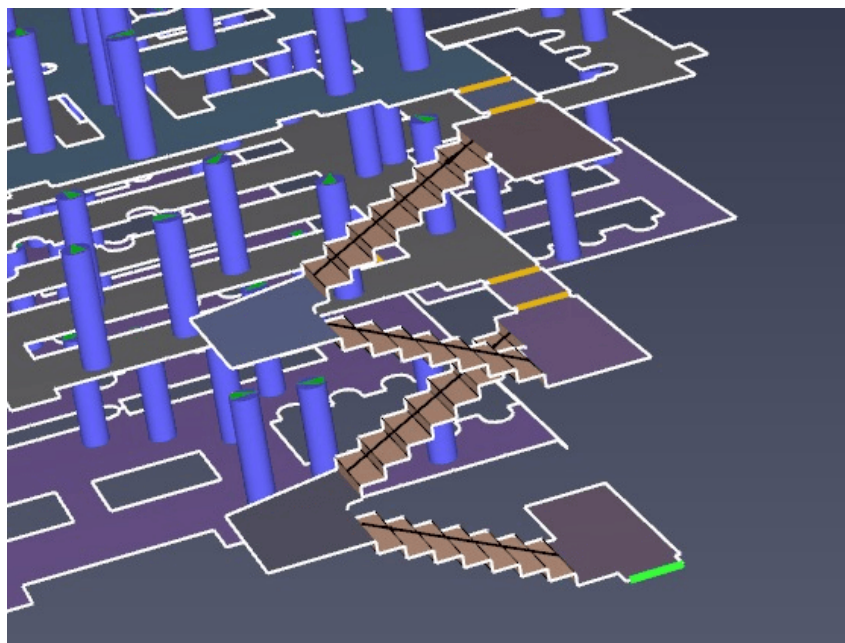
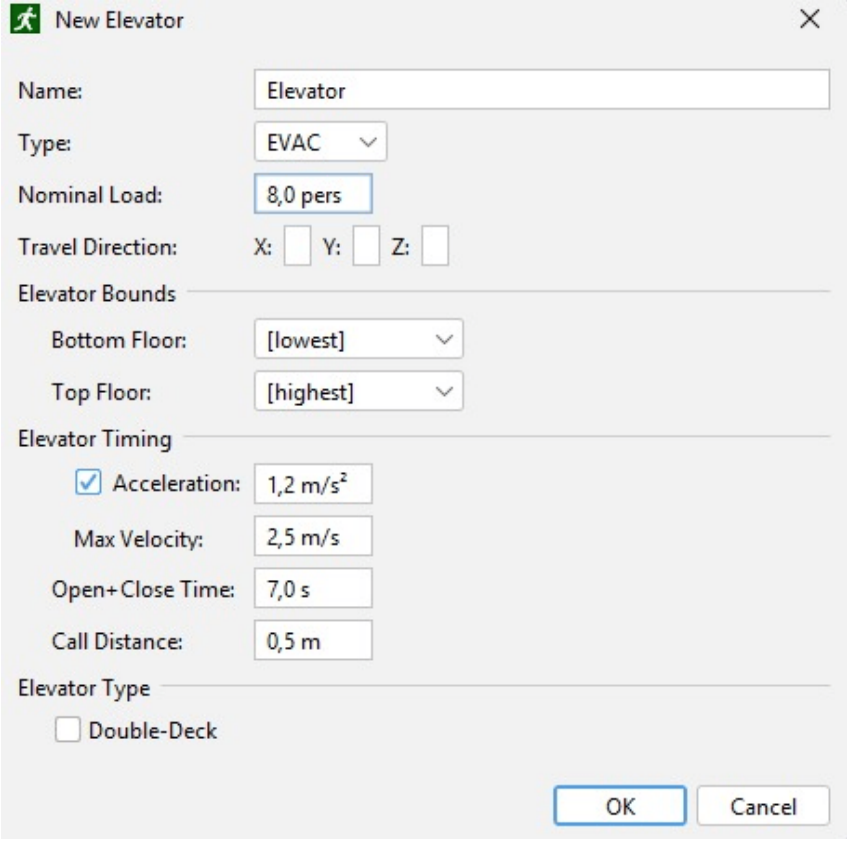


Figura 14: Criação das Escadas

No caso dos elevadores, é necessário aplicar as funcionalidades de criação de divisões e de portas, sendo criada uma divisão com a dimensão do elevador e a porta que conecta com o respetivo piso. Após a criação destes elementos, utiliza-se a opção "*Create elevator*", de forma a definir a nova divisão como sendo um elevador, onde é possível alterar as configurações, tal como é apresentado na figura 15.



The image shows a 'New Elevator' dialog box with the following fields and options:

- Name:** Elevator
- Type:** EVAC
- Nominal Load:** 8,0 pers
- Travel Direction:** X: ☐ Y: ☐ Z: ☐
- Elevator Bounds:**
  - Bottom Floor:** [lowest]
  - Top Floor:** [highest]
- Elevator Timing:**
  - ☒ **Acceleration:** 1,2 m/s<sup>2</sup>
  - Max Velocity:** 2,5 m/s
  - Open+Close Time:** 7,0 s
  - Call Distance:** 0,5 m
- Elevator Type:**
  - ☐ Double-Deck

Buttons: OK, Cancel

Figura 15: Criação do Elevador

Com a estrutura do modelo de simulação criada, é necessário passar para a criação do modelo de ocupantes. Para tal, é necessário utilizar a ferramenta "*Add an Occupant*" para adicionar ocupantes ao edifício. Após adicionar ocupantes ao modelo, é possível utilizar duas configurações que têm influência no compartimento de cada ocupante: a configuração do perfil de ocupante e a configuração do seu próprio comportamento. Todos os ocupantes têm um perfil, sendo possível aos utilizadores criar e configurá-lo de acordo com as necessidades da simulação. Na figura 16 está representada a janela que permite criar e configurar um perfil.

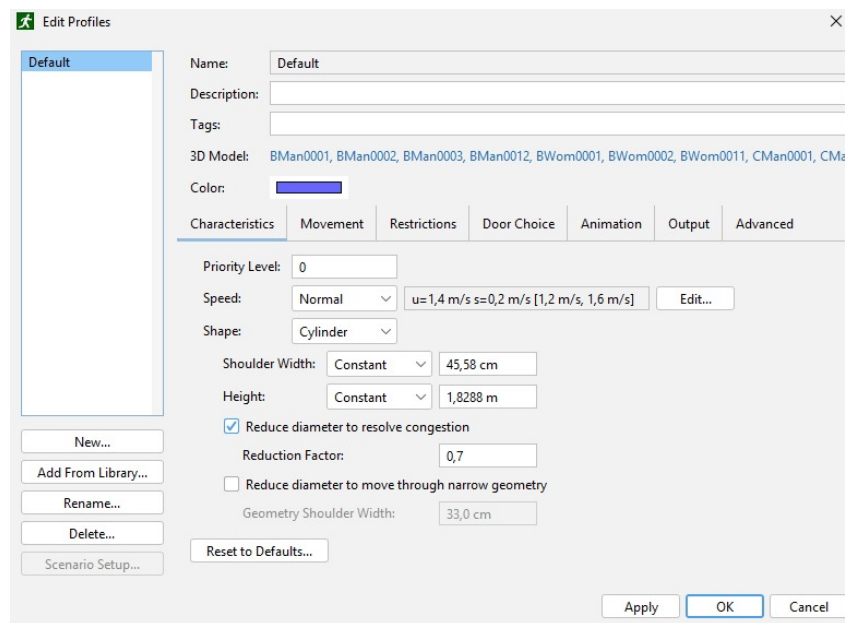


Figura 16: Criação do Perfil do Ocupante

No que toca à configuração do comportamento de um ocupante, apenas é necessário selecionar a opção "*Behaviors*" e utilizar a opção "*New Behavior*". Através desta opção, o utilizador pode definir uma série de comportamentos que o ocupante irá adotar ao longo da simulação. Na figura 17 estão apresentadas as diversas opções de comportamento passíveis de configuração própria.

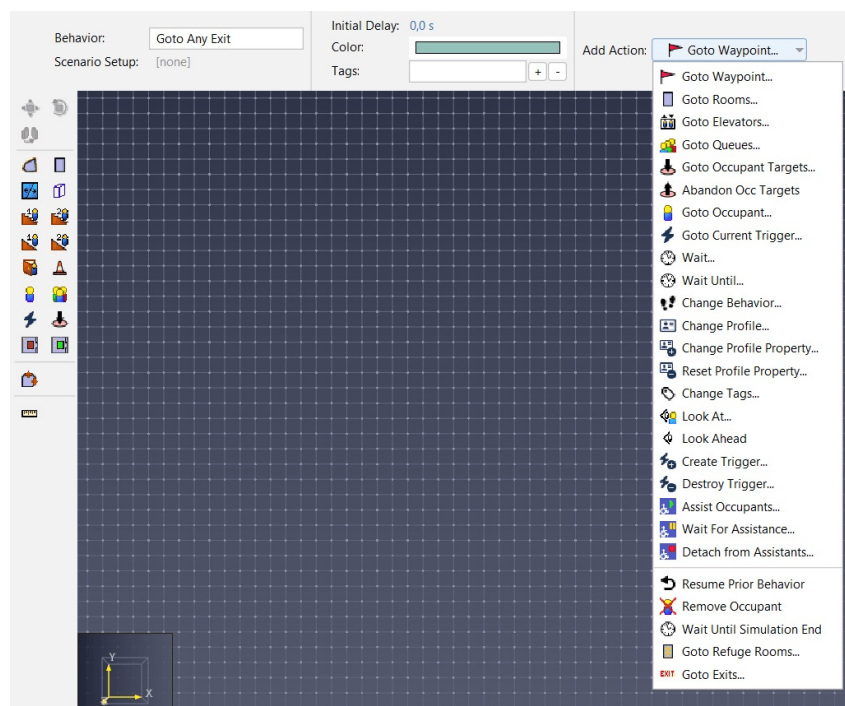


Figura 17: Criação do Comportamento dos Ocupantes

Por fim, relativamente à simulação da evacuação, o *Pathfinder* inicia este processo após o utilizador escolher a opção "*Run Simulation*", gerando um vídeo da simulação em 3D, numa nova janela, onde é possível observar os ocupantes a deslocarem-se para as saídas, mediante o comportamento configurado pelo utilizador. A par do vídeo, também é possível interpretar os resultados da simulação através de gráficos que analisam o fluxo de saída de ocupantes ao longo do tempo e a taxa de utilização das portas por parte destes. Na Figura 18 está representado um *frame* da simulação.

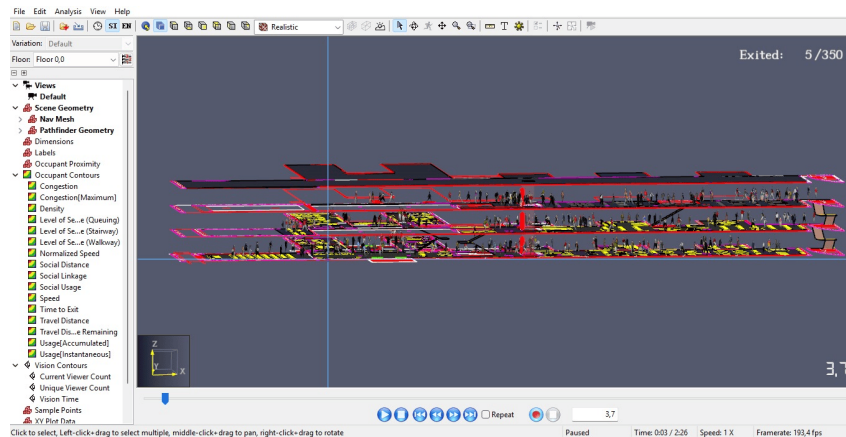


Figura 18: Simulação Pathfinder

### 3.2.2 Validação do Modelo Computacional

Para garantir que o modelo computacional representa de forma adequada o comportamento real dos ocupantes do edifício, foi necessário simular os tempos reais de evacuação, de modo a comparar os valores reais com os valores simulados obtidos a partir da simulação no *Pathfinder*. Desta forma, foi cronometrado o tempo entre um ponto de um piso e as saídas da biblioteca, seguindo sempre as indicações e sinalizações de emergência. Este processo foi repetido para os 3 pisos do edifício, tendo em conta que foi escolhido um ponto de partida que é comum tanto a colaboradores da biblioteca como a utilizadores do espaço. Para os pisos 1 e 2, foram cronometrados os tempos de evacuação através do recurso às escadas e, no caso do piso 2, também foram cronometrados os tempos de evacuação utilizando o elevador. Desprezou-se a utilização do elevador na cronometragem dos tempos de evacuação para o piso 1, devido à proximidade dos lances de escadas, que dão acesso ao piso 0, com o elevador. Através da tabela 1, é possível observar os tempos registados para os dois tipos de simulação.

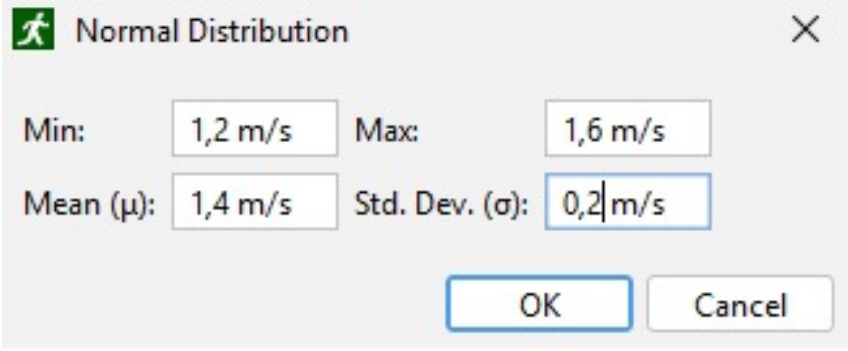
Tabela 1: Erro percentual entre simulação real e simulação computacional.

| Local de partida  | Local de saída         | Simulação real (s) | Simulação computacional (s) | Erro percentual (%) |
|-------------------|------------------------|--------------------|-----------------------------|---------------------|
| Piso 0            | Saída Principal        | 17                 | 18,8                        | 10,59               |
| Piso 0            | Saída Cargas/Descargas | 23,0               | 24,0                        | 4,35                |
| Piso 1            | Saída Principal        | 31,0               | 29,0                        | 6,45                |
| Piso 1            | Saída Cargas/Descargas | 37                 | 35,8                        | 4,86                |
| Piso 1            | Saída Emergência       | 34                 | 32,8                        | 3,53                |
| Piso 1            | Saída Principal        | 33                 | 31,3                        | 5,15                |
| Piso 1            | Saída Cargas/Descargas | 30                 | 28,5                        | 5                   |
| Piso 1            | Saída Emergência       | 63                 | 60,8                        | 3,49                |
| Piso 2            | Saída Principal        | 51                 | 48,3                        | 5,29                |
| Piso 2            | Saída Cargas/Descargas | 58                 | 55,0                        | 5,17                |
| Piso 2            | Saída Emergência       | 38                 | 36,3                        | 4,47                |
| Piso 2 c/elevador | Saída Principal        | 47                 | 44,8                        | 4,68                |
| Piso 2 c/elevador | Saída Cargas/Descargas | 48                 | 45,7                        | 4,79                |

Após comparação dos tempos nos diversos cenários apresentados acima, foi calculado o erro percentual de cada um destes para, no final, obter uma média ponderada destes mesmos erros, que se traduziu num erro médio de 5,22%, o que permite concluir que o modelo desenvolvido se encontra válido para prosseguir o estudo.

### 3.3 Análise dos Cenários de Evacuação

Após a validação do modelo desenvolvido, é necessário proceder-se à análise das estratégias de evacuação que permitirão estudar o comportamento humano em diversos cenários distintos. Para tal, foram efetuadas simulações computacionais, utilizando sempre a lotação máxima definida para o edifício, ou seja, 400 pessoas. A velocidade média dos ocupantes foi definida através de uma distribuição normal, apresentada na figura 19, considerando o valor médio de 1,4 m/s, com um desvio padrão de 0,2 m/s, o que permite obter um intervalo de valores em que o mínimo é 1,2 m/s e o máximo é 1,6 m/s.



The image shows a software dialog box titled "Normal Distribution". It has a green icon with a person walking on the left and a close button (X) on the top right. Inside the dialog, there are four input fields arranged in a 2x2 grid. The top row contains "Min:" followed by a text box with "1,2 m/s" and "Max:" followed by a text box with "1,6 m/s". The bottom row contains "Mean ( $\mu$ ):" followed by a text box with "1,4 m/s" and "Std. Dev. ( $\sigma$ ):" followed by a text box with "0,2 m/s". At the bottom right of the dialog, there are two buttons: "OK" and "Cancel".

Figura 19: Velocidade dos ocupantes (Distribuição Normal)

Nesta análise foram definidos 5 cenários, representados abaixo, onde se variam os comportamentos adotados por parte dos ocupantes.

1. Cenário Base

- Cenário que servirá de comparação para os restantes.
- Todas as saídas disponíveis, sendo utilizada a mais próxima para cada ocupante.

2. Influência do tempo de pré-movimento

- Estudar comportamentos como a hesitação e a baixa percepção de risco
- Todas as saídas disponíveis, sendo utilizada a mais próxima para cada ocupante.

3. Comportamento de grupo

- Estudar a dependência dos ocupantes em se deslocarem em pequenos grupos (família e amigos).
- Todas as saídas disponíveis, sendo utilizada a mais próxima para cada ocupante.

4. Comportamento de Liderança

- Estudar o impacto que a existência de líderes tem nos restantes ocupantes.
- Todas as saídas disponíveis, sendo utilizada a mais próxima para cada ocupante.

5. Efeito de Herding

- Estudar a tendência dos ocupantes seguirem os outros ou os fluxos de evacuação mais dominantes.
- Todas as saídas disponíveis.

### 3.3.1 Cenário 1 - Cenário Base

Neste primeiro cenário, todas as saídas do edifício estão acessíveis e não é implementada qualquer alteração no comportamento do ocupantes. Desta forma, o objetivo desta simulação é averiguar o tempo total necessário para a evacuação dos 350 indivíduos e, através dos resultados obtidos, estes servirão de base para a comparação com os resultados resultantes dos próximos cenários. Nesta análise foram realizadas duas simulações, com e sem elevador, com o intuito de comparar os tempos de evacuação em cenários em que este meio não está disponível.

Na tabela 2 estão representados os valores, em segundos, dos tempos de evacuação registados nestas duas simulações.

Tabela 2: Resultados Cenário 1 - Cenário Base

| <b>Estratégia 1 - Cenário Base</b> | <b>Tempo Evacuação<br/><i>Pathfinder</i></b> |
|------------------------------------|----------------------------------------------|
| Saídas disponíveis s/elevador      | 143 s                                        |
| Saídas disponíveis c/elevador      | 146 s                                        |

Analisando os tempos de evacuação registados nestas duas simulações, com todas as saídas disponíveis, é possível concluir que os resultados obtidos nestas são bastante próximos. Porém, os gráficos gerados para cada uma das simulações ajudam a interpretar de forma diferente estes resultados.

Nas figuras 20 e 21 estão representados os gráficos obtidos a partir do *Pathfinder*, relativamente aos resultados registados durante a simulação com todas as saídas disponíveis e sem elevador. Nestas figuras são apresentadas a relação entre o número de ocupantes e o tempo em segundos, bem como a taxa de utilização das saídas ao longo do tempo.

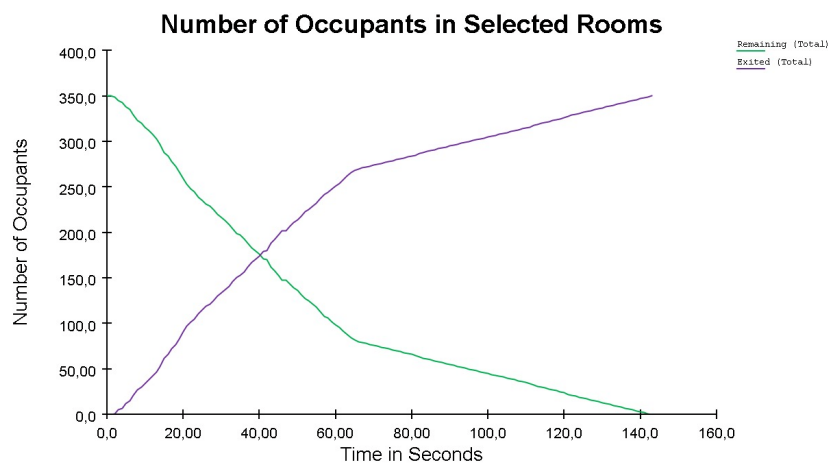


Figura 20: Taxa de ocupantes no edifício - Cenário 1 sem elevador

Após a análise deste gráfico, é possível observar, que entre os 40 e os 60 segundos de simulação, as duas curvas se intercetam, o que significa que metade dos ocupantes já evacuaram o edifício. A evacuação é mais fluída nos instantes iniciais e torna-se mais lenta na fase final, até que, por volta dos 140 segundos, todos os ocupantes já tinham abandonado o edifício.

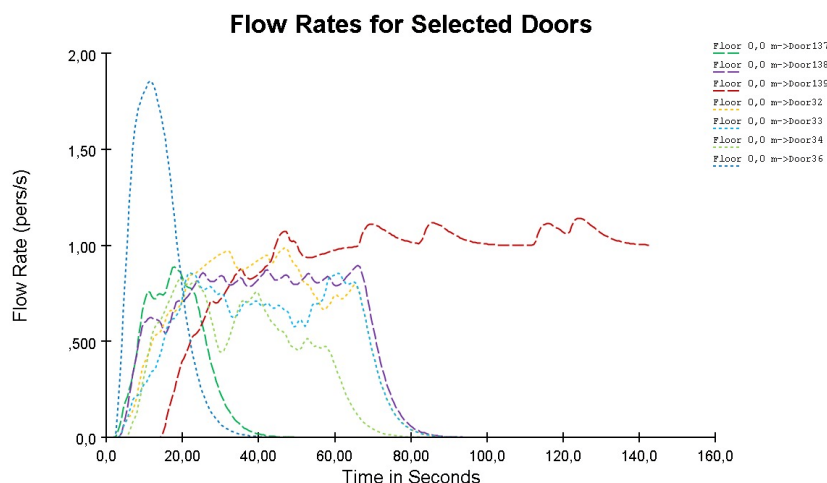


Figura 21: Taxa de utilização das portas do edifício - Cenário 1 sem elevador

Através do gráfico da figura 21, é perceptível que nos primeiros 20 segundos, todas as portas são utilizadas para a evacuação da biblioteca. Porém, a curva vermelha, associada à saída de emergência, é a que apresenta uma maior taxa de utilização ao longo do tempo, o que pode significar que os ocupantes do piso 1 e do piso 2, optam por esta saída em detrimento das outras.

Já as figuras 22 e 23, demonstram, respetivamente, o fluxo de saída dos ocupantes e o fluxo de saída em cada porta, no cenário base com a utilização do elevador.

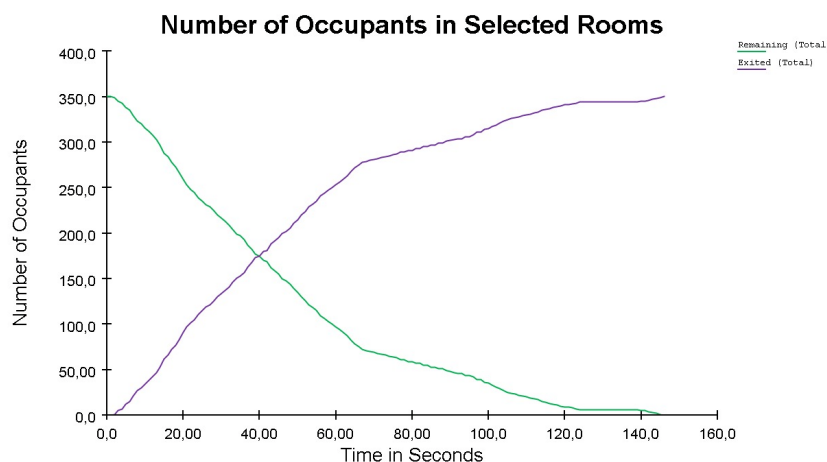


Figura 22: Taxa de ocupantes no edifício - Cenário 1 com elevador

A figura 22 demonstra que, à semelhança da simulação sem elevador, cerca de metade dos ocupantes evacuam o edifício entre os 40 e os 60 segundos. A evacuação é praticamente concluída por volta dos 145-150 segundos, o que indica a eficácia global do processo, embora com uma fase final mais lenta, que está associada à saída dos últimos ocupantes, que utilizaram o elevador para evacuarem.

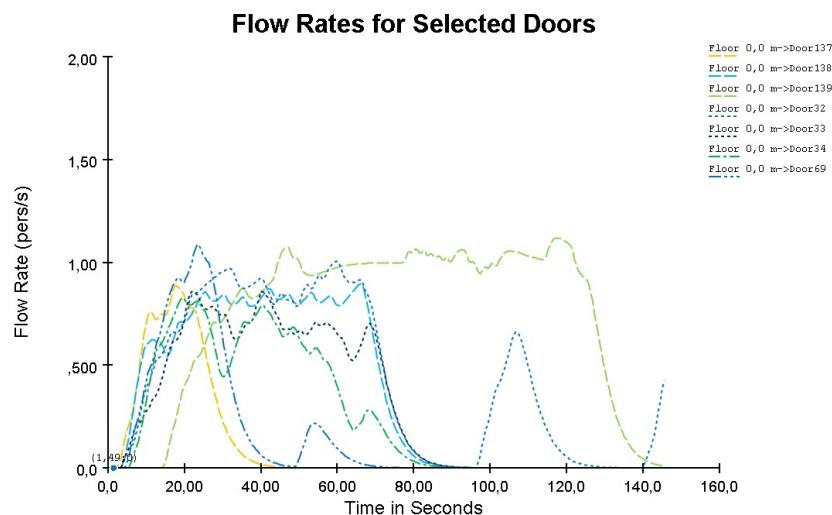


Figura 23: Taxa de utilização das portas do edifício - Cenário 1 com elevador

O gráfico da figura 23 evidencia que, durante a fase inicial e intermédia da evacuação, todas as saídas são utilizadas. A saída que mais se destaca é a saída de emergência, porém, é a saída principal que apresenta o registo de saída dos últimos ocupantes, visto se tratar da saída mais próxima do elevador.

Em resumo, e após a análise dos resultados obtidos através destas duas simulações, é possível concluir, que tanto o cenário com a utilização do elevador como o cenário sem a utilização deste, apresentam tempos de evacuação semelhantes, o que significa que o elevador não apresenta um papel tão preponderante na evacuação e que, através da utilização única das escadas, é possível realizar uma evacuação com valores aceitáveis.

### 3.3.2 Cenário 2 - Influência do tempo de pré-movimento

Neste cenário pretende-se avaliar de que forma diferentes tempos de reação influenciam parâmetros como o tempo total de evacuação, o início do movimento dos ocupantes e a distribuição temporal do fluxo de evacuação.

Para a implementação deste cenário, foram mantidas todas as características geométricas e funcionais definidas no cenário base, incluindo a distribuição dos ocupantes pelos três pisos, perfis de velocidade, saídas disponíveis e restantes condições

de circulação. A única variável alterada correspondeu ao tempo de pré-movimento atribuído aos ocupantes.

Foram definidos diferentes intervalos de pré-movimento para os ocupantes, simulando a variabilidade natural do comportamento humano em contexto de emergência. Esta abordagem permitiu representar indivíduos com respostas imediatas, bem como ocupantes que apresentam tempos de decisão mais prolongados antes de iniciarem a evacuação.

Na tabela 3 estão representados os valores, em segundos, dos tempos de evacuação registados nestas duas simulações.

Tabela 3: Resultados Cenário 2 - Influência do tempo de pré-movimento

| Cenário 2                     | Tempo Evacuação<br><i>Pathfinder</i> |
|-------------------------------|--------------------------------------|
| Saídas disponíveis s/elevador | 172,3 s                              |
| Saídas disponíveis c/elevador | 164,8 s                              |

Nas figuras 24 e 25 são apresentados os gráficos dos resultados obtidos, relativos à taxa de ocupantes no edifício e à taxa de utilização das portas, para a simulação com todas as saídas disponíveis mas sem a utilização do elevador.

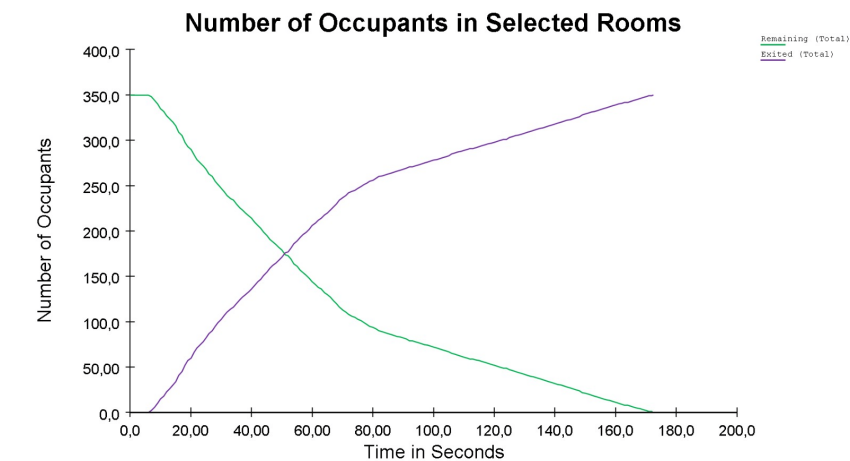


Figura 24: Taxa de ocupantes no edifício - Cenário 2 sem elevador

Através da figura 24, é possível observar que numa fase inicial, aproximadamente entre os 10 e os 80 segundos, ocorre uma redução mais acentuada do número de ocupantes no edifício, indicando um fluxo de evacuação elevado durante este intervalo. Esta tendência permite inferir que, após o período de pré-movimento, uma parte significativa dos ocupantes iniciou a evacuação. A partir dos 80 segundos, a redução torna-se menos acentuada, o que poderá estar associado à existência de congestionamentos localizados ou permanência prolongada de indivíduos provenientes de

pisos superiores. A evacuação é concluída aproximadamente aos 172 segundos, no momento em que o número total de evacuados corresponde à capacidade total do edifício.

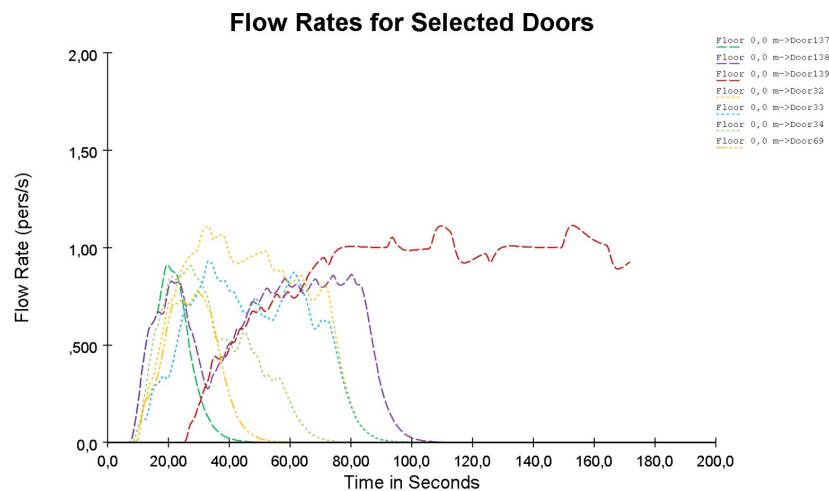


Figura 25: Taxa de utilização das portas do edifício - Cenário 2 sem elevador

Relativamente à figura 25, que representa as taxas de fluxo nas diferentes saídas, observa-se que algumas saídas apresentam atividade mais precoce, iniciando o fluxo aproximadamente entre os 10 e os 20 segundos, enquanto que outras começam a ser utilizadas após cerca de 30 segundos. Este comportamento pode estar relacionado com diferenças nas proximidades às saídas por parte do ocupantes.

A saída de emergência (representada pela linha vermelha) destaca-se por apresentar uma utilização mais prolongada e consistente ao longo da evacuação, enquanto que as restantes apresentam fluxos mais irregulares e de menor duração, caracterizados por picos iniciais, seguidos de reduções progressivas até cessarem completamente.

As figuras 26 e 27, demonstram, respetivamente, o fluxo de saída dos ocupantes e o fluxo de saída em cada porta, na simulação com todas as saídas disponíveis e com a utilização do elevador.

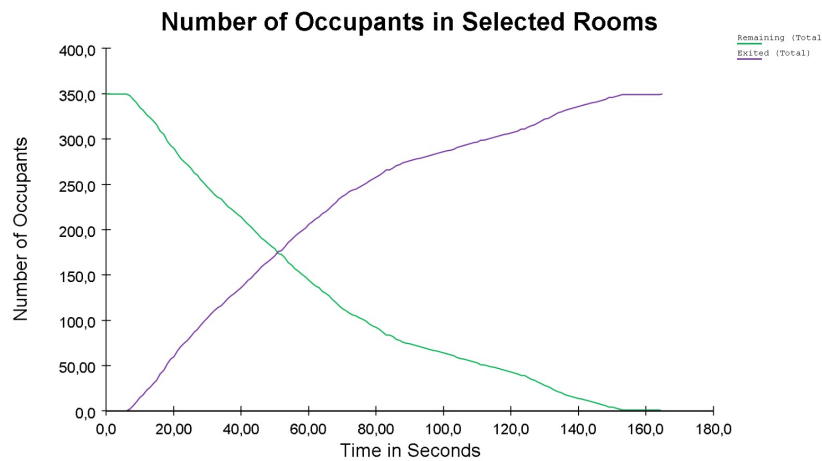


Figura 26: Taxa de ocupantes no edifício - Cenário 2 com elevador

Na figura 26, é possível observar uma redução mais acentuada da taxa de ocupantes no interior do edifício, visto que metade dos indivíduos evacua logo no primeiro minuto. Após os 80 segundos de evacuação, é notável que esta taxa se torna mais gradual, até atingir um ponto (por volta dos 160 segundos), onde é possível inferir que o último grupo a utilizar o elevador está a evacuar o edifício, dando esta por terminada mal o último membro deste grupo abandona o interior da biblioteca.

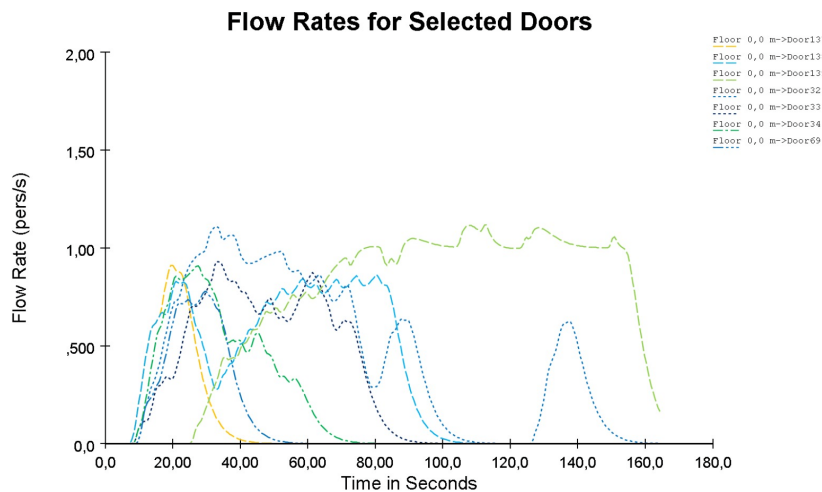


Figura 27: Taxa de utilização das portas do edifício - Cenário 2 com elevador

Já na figura 27, tal como na simulação sem a utilização do elevador, o fluxo de evacuação em algumas das portas inicia-se entre os 10 e os 20 primeiros segundos, enquanto que na saída de emergência, o primeiro ocupante a evacuar é registado após esse tempo. Tanto a saída de emergência como a saída principal apresentam taxas de utilização ao longo de toda a evacuação, sendo a saída de emergência a que apresenta valores mais consistentes.

### 3.3.3 Cenário 3 - Influência do comportamento de grupo

Neste cenário pretende-se analisar de que forma a existência de grupos sociais influencia parâmetros como o tempo total de evacuação, a formação de congestionamentos e a utilização das diferentes saídas disponíveis.

Para a implementação deste cenário, os ocupantes foram organizados em grupos, através da funcionalidade "*Movement Groups*", de modo a representar diferentes tipos de interações sociais e funcionais existentes no edifício. No piso 0, foram definidos grupos com elevada coesão, simulando a presença de crianças acompanhadas por supervisores ou professores. Nos pisos 1 e 2, foram criados grupos com menor grau de coesão, representando pequenos grupos sociais como colegas ou familiares.

Na tabela 4 estão apresentados os resultados obtidos para este cenário.

Tabela 4: Resultados Cenário 3 - Influência do comportamento de grupo

| Cenário 3                     | Tempo Evacuação<br><i>Pathfinder</i> |
|-------------------------------|--------------------------------------|
| Saídas disponíveis s/elevador | 149,5 s                              |
| Saídas disponíveis c/elevador | 144,3 s                              |

Nas figuras 28 e 29 estão representados os gráficos dos resultados obtidos, relativos à taxa de ocupantes no edifício e à taxa de utilização das portas, para a simulação com todas as saídas disponíveis mas sem a utilização do elevador.

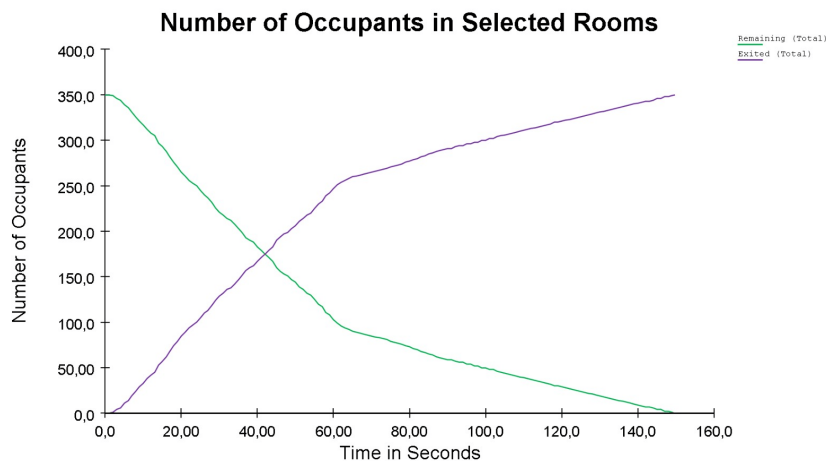


Figura 28: Taxa de ocupantes no edifício - Cenário 3 sem elevador

Na figura 28 é possível observar que a evacuação se inicia nos primeiros segundos da simulação, verificando-se uma descida relativamente acentuada do número de ocupantes entre os 5 e os 65 segundos. É durante este intervalo que se desenrola a fase de maior intensidade de evacuação, ou seja, ocorre a saída da maioria dos ocupantes do edifício.

Aproximadamente após os 65 segundos, observa-se uma redução mais gradual do número de ocupantes restantes, indicando uma desaceleração da evacuação. Esta alteração poderá estar associada ao comportamento de grupo implementado, nomeadamente à adaptação da velocidade dos ocupantes ao ritmo coletivo ou eventuais esperas e reagrupamentos. A evacuação é concluída aproximadamente aos 150 segundos, momento em que o número de ocupantes atinge o valor zero.

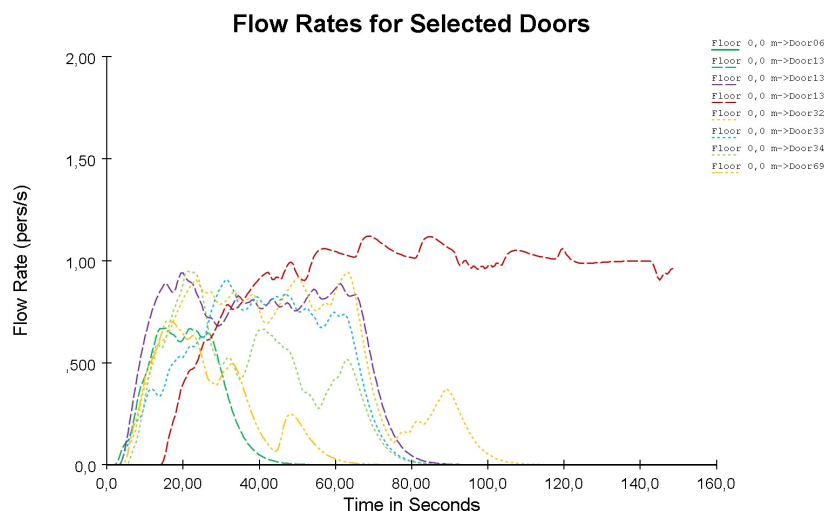


Figura 29: Taxa de utilização das portas do edifício - Cenário 3 sem elevador

Na figura 29 demonstra que algumas saídas apresentam atividade logo nos instantes iniciais, registando aumentos rápidos das taxas de fluxo. Porém, várias destas saídas apresentam também reduções acentuadas após curtos períodos de utilização.

Destaca-se novamente a saída de emergência (representada pela linha vermelha), que mantém uma utilização mais prolongada e estável ao longo de praticamente toda a evacuação, com taxas de fluxo próximas ou superiores a 1 ocupante por segundo. Este comportamento indica uma concentração significativa de ocupantes numa rota preferencial, que possivelmente resulta da tendência dos membros dos grupos seguirem trajetórias comuns e evitarem separações.

Por outro lado, observa-se maior irregularidade em algumas curvas de fluxo, com oscilações mais pronunciadas ao longo do tempo. Estas oscilações são compatíveis com o comportamento de grupo modelado, uma vez que a necessidade de manter a proximidade entre os membros pode originizar pequenas interrupções, desacelerações e reagrupamentos antes de evacuarem o edifício.

Já as figuras 30 e 31, demonstram o fluxo de saída dos ocupantes e o fluxo de saída em cada porta, na simulação com todas as saídas disponíveis e com a utilização do elevador.

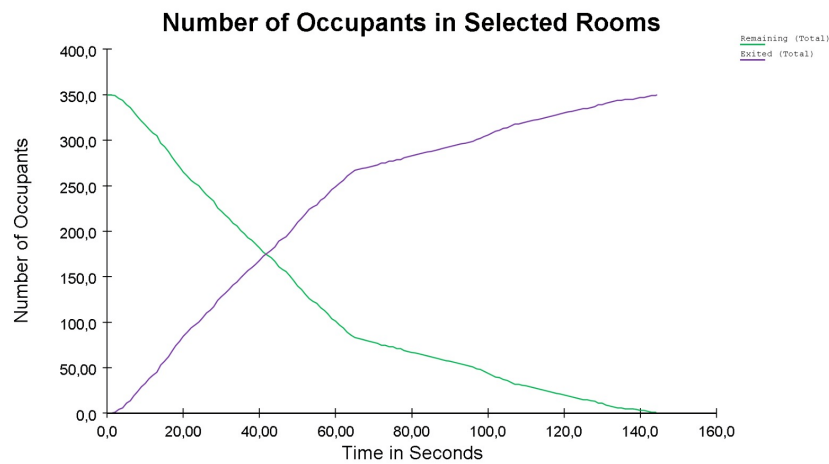


Figura 30: Taxa de ocupantes no edifício - Cenário 3 com elevador

Tal como na simulação sem utilização do elevador, esta simulação regista uma redução do número de ocupantes semelhante no mesmo intervalo de tempo, ou seja, entre os 5 e os 65 segundos, correspondendo este período ao de maior intensidade de evacuação.

Após os 65 segundos, aproximadamente, observa-se uma desaceleração da taxa de evacuação, evidenciada pela diminuição menos acentuada da curva dos restantes ocupantes. Apesar desta redução gradual na fase final, verifica-se que a evacuação é concluída aproximadamente aos 145 segundos.

Comparativamente à simulação sem utilização do elevador, observa-se uma ligeira redução do tempo total de evacuação, sugerindo que a utilização do elevador contribuiu positivamente para a evacuação dos ocupantes, particularmente nos pisos superiores.

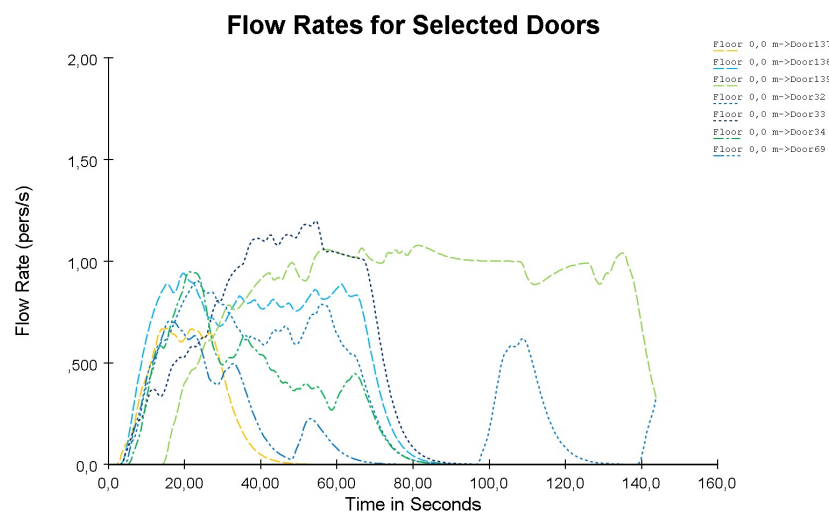


Figura 31: Taxa de utilização das portas do edifício - Cenário 3 com elevador

Na figura 31 é visível que as diferentes saídas iniciam atividade entre os 5 e os 20 segundos, registrando aumentos progressivos nas respectivas taxas de fluxo. Algumas portas apresentam uma utilização intensa apenas durante a fase inicial da evacuação, cessando atividade após períodos relativamente curtos.

Destaca-se a saída de emergência (representada pela curva verde clara), que mantém uma utilização estável e prolongada até ao final da evacuação, com taxas próximas de 1 ocupante por segundo. Este comportamento sugere elevada concentração de ocupantes nesta rota, indicando que uma parte significativa dos grupos convergiu para esta saída ao longo da evacuação.

Adicionalmente, observa-se a presença de fluxos descontínuos em algumas saídas, nomeadamente em instantes mais tardios da simulação. Estes comportamentos podem estar associados à chegada faseada de ocupantes provenientes de pisos superiores através do elevador, originando novos picos de utilização em momentos posteriores.

### 3.3.4 Cenário 4 - Influência da Liderança

Neste cenário pretende-se estudar de que forma a presença de um número reduzido de líderes, distribuídos pelos diferentes pisos do edifício, pode influenciar parâmetros como o tempo total de evacuação e a distribuição dos ocupantes pelas diferentes saídas.

Para a implementação deste cenário no *Pathfinder*, foram selecionados entre dois a três ocupantes por piso para desempenharem a função de líderes, sendo estes distribuídos estrategicamente pelas diferentes zonas de cada piso, de modo a maximizar a sua influência nos restantes indivíduos. Aos líderes, foram atribuídas características distintas dos restantes ocupantes, nomeadamente menor tempo de pré-movimento e uma maior capacidade de deslocação, simulando um maior conhecimento acerca do edifício e permitindo uma resposta mais rápida no momento da evacuação.

Posteriormente, foram criados grupos de movimento (*Movement Groups*), nos quais os restantes ocupantes foram associados aos respetivos líderes através da funcionalidade *Follow Leader*. Esta configuração permitiu simular a tendência dos ocupantes seguirem os indivíduos mais informados ou com maior capacidade de tomar decisões adequadas em situações de emergência.

Na tabela 5 estão representados os valores, em segundos, dos tempos de evacuação registados nestas duas simulações.

Tabela 5: Resultados Cenário 4 - Influência da Liderança

| <b>Cenário 4</b>              | <b>Tempo Evacuação<br/><i>Pathfinder</i></b> |
|-------------------------------|----------------------------------------------|
| Saídas disponíveis s/elevador | 153,3 s                                      |
| Saídas disponíveis c/elevador | 160,5 s                                      |

As figuras 32 e 33, demonstram, respetivamente, o fluxo de saída dos ocupantes e o fluxo de saída em cada porta, na simulação com todas as saídas disponíveis e sem a utilização do elevador.

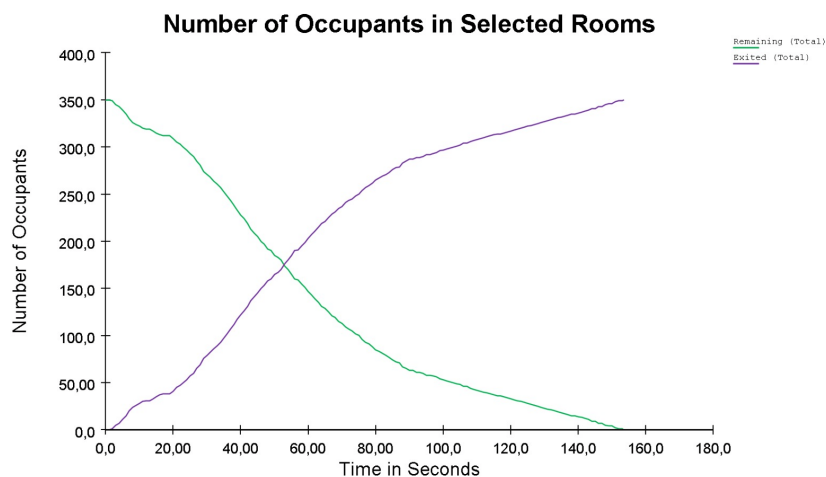


Figura 32: Taxa de ocupantes no edifício - Cenário 4 sem elevador

Através da figura 32, é possível observar que durante os primeiros instantes da evacuação, existe uma redução relativamente lenta do número de ocupantes no edifício, correspondente à fase inicial de reação e organização dos ocupantes. Posteriormente, observa-se uma diminuição mais acentuada da curva dos ocupantes, indicando a fase de maior intensidade da evacuação.

Após os 90 segundos, a taxa de evacuação torna-se mais gradual, refletindo a permanência de um número reduzido de ocupantes no edifício, principalmente nos pisos superiores ou em zonas afastadas das saídas principais. A evacuação é concluída aproximadamente aos 154 segundos, momento em que todos os ocupantes abandonaram o edifício.

De forma geral, o gráfico demonstra que a presença de líderes contribuiu para uma evacuação relativamente organizada e contínua, permitindo um escoamento eficiente dos ocupantes mesmo sem recurso ao elevador.

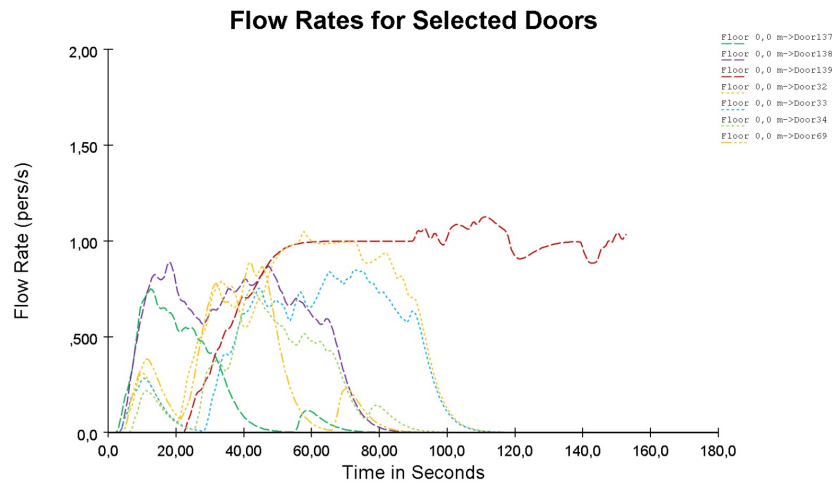


Figura 33: Taxa de utilização das portas do edifício - Cenário 4 sem elevador

Observando as taxas de fluxos nas diferentes saídas disponíveis, é possível indicar que algumas saídas apresentam utilização logo nos momentos iniciais da evacuação. Porém, a curva associada à saída de emergência (curva vermelha), mantém um fluxo contínuo e estável em grande parte da simulação, com valores próximos de 1 ocupante por segundo.

Este comportamento indica que uma parte significativa dos ocupantes seguiu trajetórias semelhantes, influenciadas pelos líderes definidos no cenário. A presença de líderes contribuiu para reduzir a indecisão e orientar os indivíduos para rotas específicas, promovendo movimentos mais organizados e contínuos em direção às saídas escolhidas.

De forma global, o gráfico demonstra que a influência da liderança promoveu uma evacuação mais direcionada, embora também tenha conduzido a uma concentração mais acentuada do fluxo em determinadas saídas do edifício.

Já nas figuras 34 e 35, é possível observar o fluxo de saída dos ocupantes e o fluxo de saída em cada porta, na simulação com todas as saídas disponíveis e com a utilização do elevador.

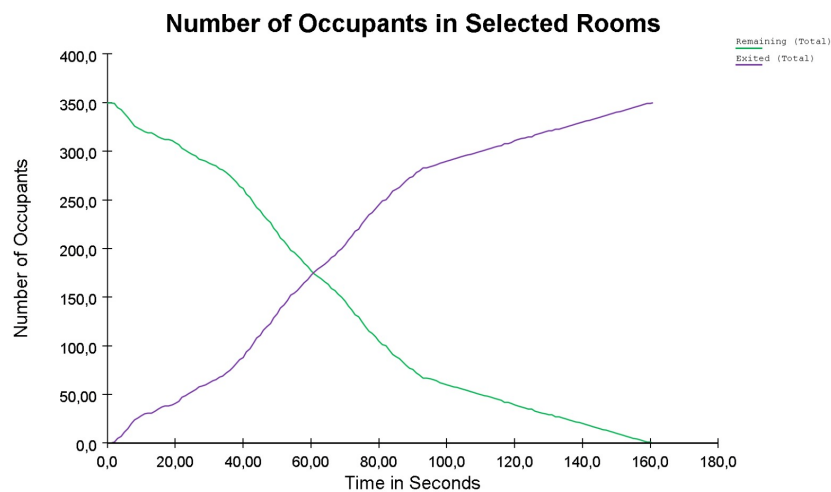


Figura 34: Taxa de ocupantes no edifício - Cenário 4 com elevador

Através do gráfico da figura 34, observa-se que na fase inicial, até aos 40 segundos de simulação, a redução do número de ocupantes ocorre de forma gradual, sugerindo um período inicial de organização e tomada de decisão influenciado pelos líderes. Posteriormente, entre os 40 e os 90 segundos, observa-se uma diminuição mais acentuada do número de ocupantes.

Após os 90 segundos, a taxa de evacuação torna-se novamente mais reduzida. Esta desaceleração final poderá estar associada aos últimos ocupantes provenientes dos pisos superiores e à distribuição progressiva do fluxo de indivíduos pelas diferentes saídas.

A utilização do elevador contribuiu para apoiar o escoamento vertical dos ocupantes, embora a dinâmica de liderança tenha conduzido parte significativa dos indivíduos a seguir trajetórias semelhantes, promovendo alguma concentração de fluxo em determinadas rotas.

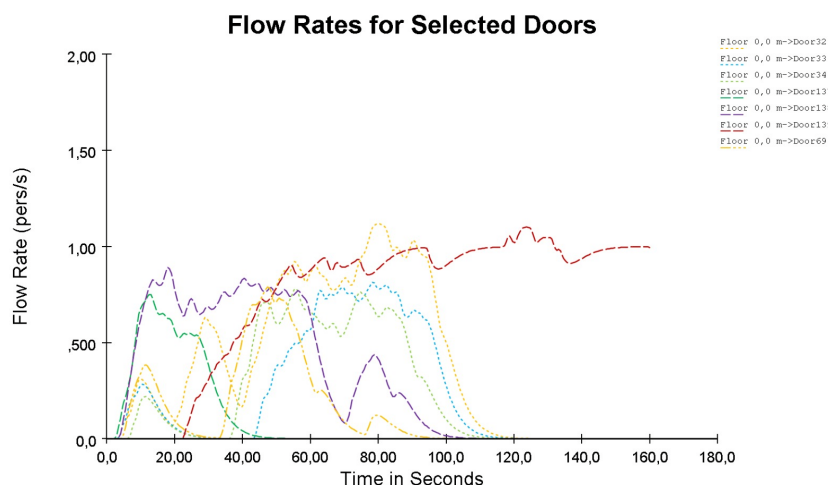


Figura 35: Taxa de utilização das portas do edifício - Cenário 4 com elevador

Relativamente às taxas de fluxo das diferentes saídas, observa-se uma utilização diferenciada das portas disponíveis ao longo do processo de evacuação, evidenciando o impacto da liderança na escolha das rotas de saída.

Algumas saídas apresentam utilização logo nos primeiros instantes da evacuação, no entanto, é a saída de emergência, associada à curva vermelha, que apresenta uma utilização contínua e prolongada ao longo de praticamente toda a simulação. A presença dos líderes tende a reduzir a indecisão dos ocupantes, promovendo movimentos mais organizados e contínuos em direção às saídas escolhidas por estes.

Observa-se igualmente que algumas saídas apresentam fluxos temporários e descontínuos, caracterizados por períodos de maior intensidade seguidos de rápida diminuição. Este comportamento poderá indicar que determinadas rotas foram utilizadas apenas por ocupantes localizados em zonas específicas do edifício ou por grupos que seguiram líderes distintos.

### 3.3.5 Cenário 5 - Influência do efeito de Herding

Neste último cenário pretende-se analisar de que forma o comportamento imitativo dos ocupantes influencia o tempo total de evacuação, a distribuição do fluxo pelas diferentes saídas e a formação de congestionamentos nos diferentes acessos.

Para a implementação deste cenário, foram introduzidos comportamentos que favorecem a tendência dos ocupantes seguirem rotas já adotadas por outros, reduzindo a autonomia na escolha das rotas de evacuação. Desta forma, os ocupantes passam a apresentar uma maior probabilidade de selecionar caminhos com maior intensidade de fluxo, privilegiando rotas aparentemente mais utilizadas em detrimento de alternativas potencialmente mais eficientes.

Para obter um comportamento realista, foram mantidas as restantes condições definidas no cenário base, sendo apenas alterados os parâmetros comportamentais associados à tomada de decisão e escolha de rota.

Na tabela 6 estão apresentados os resultados obtidos para este cenário.

Tabela 6: Resultados Cenário 5 - Influência do efeito de Herding

| <b>Cenário 5</b>              | <b>Tempo Evacuação<br/><i>Pathfinder</i></b> |
|-------------------------------|----------------------------------------------|
| Saídas disponíveis s/elevador | 188 s                                        |
| Saídas disponíveis c/elevador | 184,5 s                                      |

As figuras 36 e 37 representam o fluxo de saída dos ocupantes e o fluxo de saída em cada porta, na simulação com todas as saídas disponíveis e sem a utilização do elevador.

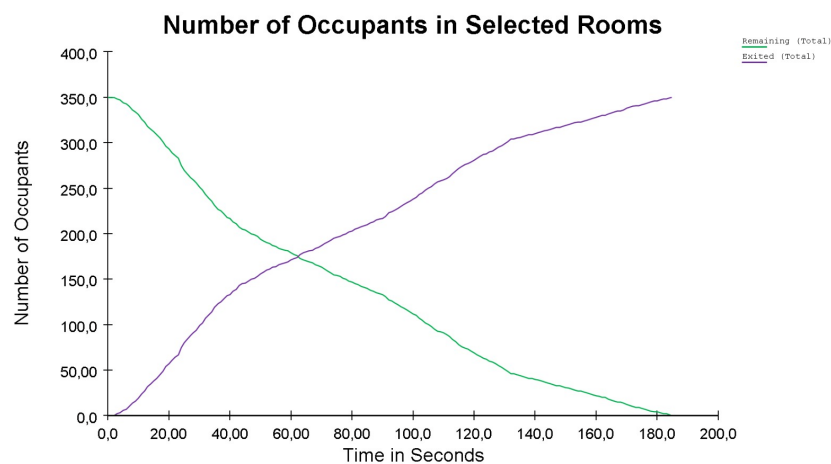


Figura 36: Taxa de ocupantes no edifício - Cenário 5 sem elevador

O gráfico da figura 36 demonstra a evolução da evacuação ao longo do tempo sem a utilização de elevadores. Inicialmente, com os 350 ocupantes no interior do edifício, verifica-se uma redução gradual e contínua do número de ocupantes. O cruzamento das duas curvas ocorre aproximadamente entre os 60 e os 70 segundos, indicando o momento em que mais de metade dos ocupantes já abandonou o edifício.

Entre os 90 e os 140 segundos, observa-se uma diminuição menos acentuada da curva de ocupantes restantes, o que sugere congestionamentos ou redução da eficiência do escoamento das rotas finais de evacuação.

O processo termina perto dos 190 segundos, demonstrando que a ausência dos elevadores aumentou o tempo necessário de evacuação. Apesar disso, o gráfico evidencia uma saída contínua dos ocupantes, sem interrupções abruptas, o que indica que as rotas de evacuação mantiveram capacidade funcional ao longo de toda a evacuação.

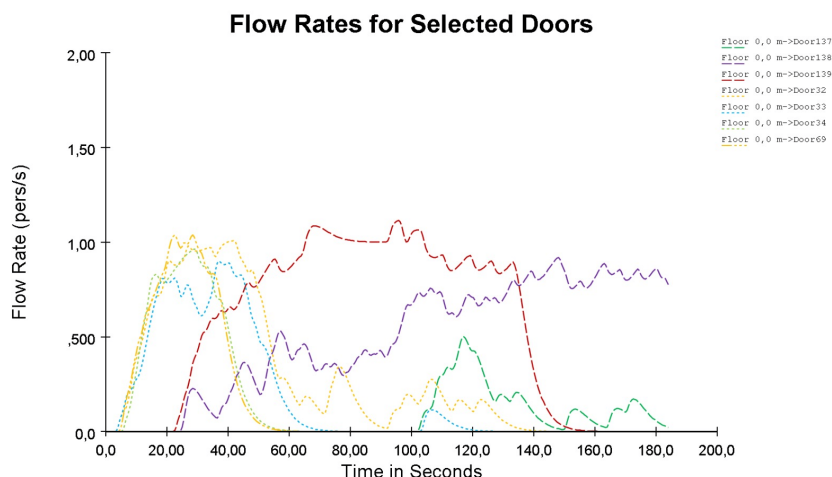


Figura 37: Taxa de utilização das portas do edifício - Cenário 5 sem elevador

O gráfico da figura 37 apresenta as taxas de fluxo das portas, sendo a saída de emergência e a saída das traseiras as que apresentam os fluxos mais elevados e consistentes, atingindo valores próximos de 1 pessoa por segundo durante um intervalo significativo da simulação, o que demonstra que estas saídas concentraram grande parte do movimento dos ocupantes. Em particular, a saída de emergência mantém um fluxo elevado entre aproximadamente os 60 e os 140 segundos, funcionando como principal via de evacuação durante a fase intermédia e final do processo.

As restantes portas apresentam comportamentos mais irregulares e de menor duração. Algumas atingem picos elevados nas fases iniciais da evacuação, sobretudo entre os 15 e os 50 segundos, mas os seus fluxos reduzem rapidamente até valores próximos de zero.

Este comportamento indica que determinadas rotas foram utilizadas apenas por grupos específicos de ocupantes. Observa-se ainda que o fluxo total se distribui de forma menos equilibrada do que nos cenários com utilização dos elevadores, verificando-se maior dependência das saídas principais e maior permanência de ocupantes em circulação ao longo do tempo. A duração global do fluxo até cerca dos 180 segundos demonstra uma evacuação mais lenta e contínua.

Já as figuras 38 e 39 representam o fluxo de saída dos ocupantes e o fluxo de saída em cada porta, na simulação com todas as saídas disponíveis e com a utilização do elevador.

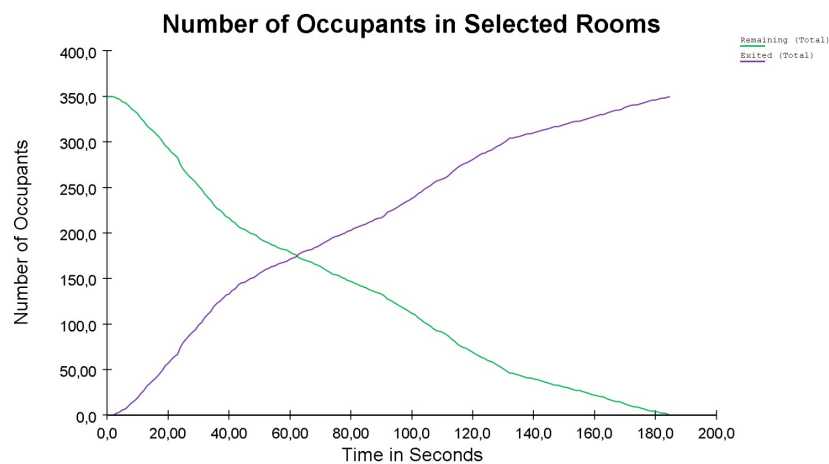


Figura 38: Taxa de ocupantes no edifício - Cenário 5 com elevador

Na figura 38 é possível observar o gráfico do número de ocupantes no cenário 5 com utilização dos elevadores demonstra uma evacuação progressiva e relativamente equilibrada ao longo do tempo. A curva “*Remaining*” inicia-se com cerca de 350 ocupantes e apresenta uma descida contínua até atingir zero por volta dos 185 segundos, enquanto a curva “*Exited*” cresce de forma correspondente até ao total de ocupantes evacuados. O ponto de interseção entre ambas as curvas ocorre aproximadamente entre os 60 e os 70 segundos, indicando o momento em que metade dos ocupantes já abandonou o edifício.

Entre os 90 e os 140 segundos verifica-se uma aceleração na saída de ocupantes, refletindo a contribuição dos elevadores para a remoção contínua de pessoas durante a fase intermédia da evacuação. Apesar de o tempo total de evacuação permanecer relativamente elevado, o processo decorre de forma mais estável e sem quedas abruptas, evidenciando uma melhor gestão dos movimentos e menor concentração excessiva em determinadas rotas.

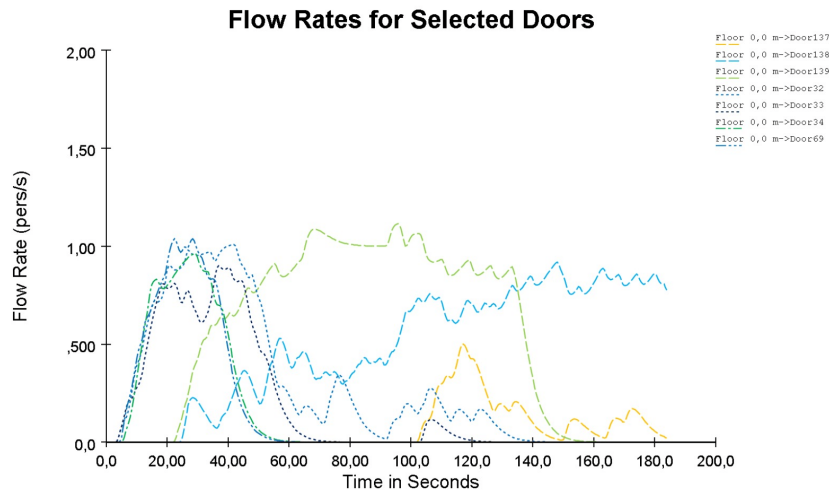


Figura 39: Taxa de utilização das portas do edifício - Cenário 5 com elevador

O gráfico da figura 39 apresenta as taxas de fluxo evidenciando uma distribuição mais diversificada da evacuação pelas diferentes portas quando os elevadores são utilizados. A saída principal e a saída das traseiras apresentam fluxos elevados e prolongados ao longo da simulação, atingindo valores próximos de 1 pessoa por segundo durante vários intervalos de tempo. A saída principal destaca-se especialmente entre os 60 e os 140 segundos, mantendo um fluxo elevado e relativamente constante, o que indica uma utilização contínua dessa rota durante a maior parte da evacuação.

As restantes portas apresentam comportamentos diferenciados, com alguns fluxos mais intensos nas fases iniciais e outros apenas em fases posteriores. Já duas portas da saída principal apresentam fluxos mais concentrados entre os 10 e os 50 segundos, caracterizando uma evacuação inicial rápida de determinadas zonas do edifício. Esta distribuição temporal dos fluxos demonstra que a utilização dos elevadores contribui para reduzir a concentração excessiva nas escadas e saídas principais, promovendo um escoamento mais equilibrado dos ocupantes ao longo do tempo.

### 3.4 Discussão de Resultados

Após uma análise dos cinco cenários de evacuação simulados no *Pathfinder*, foi possível identificar um conjunto de fatores comportamentais que influenciam o desempenho global da evacuação da Biblioteca Municipal de Gondomar. Ao comparar os tempos totais obtidos e os padrões de fluxo registados, é possível retirar conclusões que vão além da simples variação numérica, evidenciando de que modo cada comportamento interfere com a dinâmica coletiva da evacuação. Na tabela seguinte estão apresentados os resultados obtidos em cada cenário, permitindo uma comparação direta entre os diferentes comportamentos estudados.

Em suma, analisando os resultados das simulações no Pathfinder, os valores finais obtidos e a representação gráfica de cada simulação apresentada no capítulo anterior, foi possível verificar o seguinte:

#### **Tempo Pré-Movimento:**

O tempo de pré-movimento revelou-se o fator com maior impacto negativo nos tempos de evacuação. O Cenário 2 registou os valores mais elevados entre os cenários com comportamento individual, atingindo os 172,3 s sem elevador e os 164,8 s com elevador, o que representa um aumento de cerca de 20–30 segundos face ao Cenário Base. Este resultado é consistente com a literatura, que aponta a hesitação e a baixa perceção de risco como os principais responsáveis pelo aumento do tempo total de evacuação. Os gráficos do Cenário 2 revelaram ainda que, após o período inicial de inatividade, o fluxo de saída se intensifica de forma abrupta, o que pode criar condições propícias ao congestionamento nas saídas, em particular na saída de emergência, que registou uma utilização prolongada e consistente ao longo de toda a simulação.

#### **Comportamento de Grupo:**

O comportamento de grupo não conduziu a um aumento significativo dos tempos de evacuação relativamente ao Cenário Base, registando 149,5 s sem elevador e 144,3 s com elevador. Este resultado sugere que, para o edifício em análise, a coesão dos grupos não penalizou de forma relevante a eficiência global da evacuação. No entanto, os gráficos evidenciaram oscilações mais pronunciadas nas taxas de fluxo das diferentes saídas, compatíveis com as paragens e reagrupamentos que caracterizam o comportamento de grupo. A saída de emergência manteve-se, também neste cenário, como a via preferencial de evacuação, com fluxos próximos de 1 ocupante por segundo durante grande parte da simulação.

#### **Liderança:**

A presença de líderes distribuídos pelos diferentes pisos do edifício permitiu uma evacuação organizada e contínua, com tempos de 153,3 s sem elevador e 160,5 s com elevador. Embora os valores não sejam os mais baixos entre todos os cenários, a análise gráfica demonstrou que a liderança promoveu movimentos mais direcionados e reduziu a indecisão dos ocupantes. A concentração de fluxo na saída de emergência, observada também neste cenário, indica que os líderes orientaram preferencialmente os seus grupos para essa via de saída, o que, em contextos de maior ocupação ou visibilidade reduzida, poderia originar congestionamentos. Verificou-se igualmente que a associação entre liderança e utilização do elevador aumentou o tempo total de evacuação, sugerindo que, neste edifício, a combinação destas duas variáveis não se revelou vantajosa.

**Efeito de Herding:**

O Cenário 5 registou os tempos de evacuação mais elevados de todos os cenários analisados, atingindo os 188 s sem elevador e os 184,5 s com elevador. Este resultado comprova que o comportamento imitativo dos ocupantes, ao privilegiar rotas com maior intensidade de fluxo em detrimento de alternativas mais eficientes, contribui significativamente para o aumento do tempo total de evacuação. Os gráficos evidenciaram uma concentração elevada e prolongada do fluxo na saída de emergência e na saída das traseiras, com redução notória da utilização das restantes saídas disponíveis. Esta subutilização de rotas alternativas é uma consequência direta do efeito de herding, tal como descrito na literatura. A introdução do elevador neste cenário reduziu ligeiramente o tempo de evacuação, ao distribuir de forma mais equilibrada o fluxo pelas diferentes saídas, mitigando parcialmente o impacto do comportamento imitativo.

**Elevadores:**

Do ponto de vista geral, a utilização do elevador revelou um impacto variável consoante o cenário considerado. Nos Cenários 2 e 3, a utilização do elevador contribuiu positivamente para a redução do tempo de evacuação, ao suportar o escoamento vertical dos ocupantes provenientes do piso 2. No entanto, no Cenário 4, a combinação entre liderança e utilização do elevador conduziu a um aumento do tempo de evacuação, possivelmente devido à concentração de fluxo gerada pelo comportamento de seguir o líder, que canalizou um número significativo de ocupantes para o mesmo ponto de acesso. No Cenário Base, os tempos com e sem elevador foram praticamente idênticos, o que demonstra que, em condições normais de evacuação, as escadas são suficientes para garantir uma evacuação eficiente neste edifício.

**Saída de Emergência:**

Em todos os cenários analisados, a saída de emergência destacou-se como a via de evacuação com maior taxa de utilização e com fluxos mais prolongados e consistentes ao longo do tempo. Este comportamento reflete, por um lado, a proximidade desta saída relativamente às zonas de maior concentração de ocupantes nos pisos 1 e 2 e, por outro, a tendência natural dos indivíduos para utilizarem saídas com maior visibilidade ou com fluxo já estabelecido por outros ocupantes. Esta concentração sistemática numa única saída constitui um ponto de atenção relevante para o plano de emergência do edifício, devendo ser considerada a implementação de medidas de orientação que promovam uma distribuição mais equitativa do fluxo pelas diferentes saídas disponíveis.

## Capítulo 4

# Conclusões

A presente dissertação foi elaborada no âmbito do Mestrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores, na área de especialização em Sistemas e Planeamento Industrial, no Instituto Superior de Engenharia do Porto, e teve como objetivo analisar a influência do comportamento humano na eficiência da evacuação de edifícios, recorrendo ao software de simulação *Pathfinder*.

Com esse fim, foi desenvolvido um modelo computacional tridimensional da Biblioteca Municipal de Gondomar, no qual foram simulados cinco cenários distintos, cada um representando uma dimensão comportamental diferente: o cenário base, a influência do tempo de pré-movimento, o comportamento de grupo, a liderança e o efeito de herding.

Neste capítulo são apresentadas as conclusões finais retiradas da elaboração deste trabalho e da análise dos resultados obtidos, bem como as limitações identificadas e as propostas de trabalho futuro.

### 4.1 Conclusões Finais

A realização deste projeto permitiu analisar, de forma sistemática e controlada, o impacto de diferentes comportamentos humanos no tempo total e nos padrões de fluxo de uma evacuação de emergência num edifício público de três pisos. Os resultados obtidos evidenciam que a componente comportamental é determinante para o desempenho global da evacuação, não podendo ser dissociada da análise das características físicas do edifício.

Foi possível concluir que o tempo de pré-movimento é o fator com maior potencial de degradação do desempenho da evacuação entre todos os comportamentos estudados. O aumento de aproximadamente 20 a 30 segundos registado no Cenário 2 face ao cenário base, sem qualquer alteração na geometria do edifício ou nas rotas de evacuação, demonstra que a hesitação inicial dos ocupantes pode ter um impacto superior ao da própria velocidade de deslocamento, aspeto que deve ser prioritariamente considerado na conceção de planos de emergência e na realização de simulacros.

O comportamento de grupo revelou-se, de forma surpreendente, o menos penalizador dos comportamentos estudados, com tempos de evacuação próximos do cenário base. Este resultado indica que, no contexto de um edifício público com uma população heterogénea, a coesão entre ocupantes pode contribuir para uma evacuação mais organizada, desde que os grupos sejam de dimensão reduzida e as saídas disponíveis sejam em número suficiente para absorver os fluxos gerados.

A presença de líderes nos diferentes pisos do edifício promoveu evacuações mais organizadas e com fluxos mais contínuos, tendo-se revelado especialmente relevante para a redução da indecisão dos ocupantes. Contudo, os resultados demonstraram também que a liderança pode conduzir a uma concentração excessiva de fluxo em determinadas saídas, em particular quando os líderes orientam os seus grupos para as mesmas rotas. Este equilíbrio entre organização e distribuição de fluxo constitui um aspeto a considerar na formação de equipas de emergência.

O efeito de herding foi o comportamento com maior impacto negativo na evacuação, registando os tempos mais elevados de toda a análise. A tendência dos ocupantes para seguirem os fluxos já estabelecidos conduziu à subutilização de saídas alternativas e ao prolongamento da fase final da evacuação, confirmando o que a literatura descreve para este fenómeno. Este resultado reforça a importância de uma sinalização clara e de uma comunicação de emergência eficaz, que permita contrariar a tendência imitativa e distribuir os ocupantes de forma mais equilibrada pelas saídas disponíveis.

Foi ainda possível confirmar que o *Pathfinder* é uma ferramenta adequada para a análise de cenários de evacuação com comportamentos humanos diferenciados, permitindo representar populações heterogéneas, tempos de pré-movimento variáveis, formação de grupos e dinâmicas de liderança de forma integrada e com um grau de realismo compatível com os objetivos deste estudo. A validação do modelo computacional, com um erro percentual médio de 5,22 face aos tempos reais cronometrados no edifício, reforça a fiabilidade dos resultados obtidos.

Durante a realização deste projeto foram encontradas algumas dificuldades, destacando-se a obtenção de informação técnica detalhada sobre o edifício, nomeadamente a capacidade máxima de ocupação, que teve de ser estimada em conjunto com os responsáveis da biblioteca. A modelação das escadas e do elevador no Pathfinder exigiu

igualmente um processo iterativo de ajuste, dada a necessidade de reproduzir com precisão as dimensões reais do edifício a partir das plantas disponibilizadas.

## 4.2 Limitações e Trabalho Futuro

Com o objetivo de aprofundar a análise do comportamento humano na evacuação de edifícios e de aumentar o realismo dos modelos desenvolvidos, é possível dar continuidade ao estudo realizado, explorando os seguintes pontos:

- Integração com simulação de incêndio: A combinação do *Pathfinder* com o software *PyroSim* permitiria analisar o impacto do fumo, do calor e da redução de visibilidade no comportamento dos ocupantes e nos tempos de evacuação, aproximando os cenários simulados das condições reais de uma emergência;
- Estudo do impacto de diferentes densidades de ocupação: A análise de cenários com níveis de ocupação distintos, desde a ocupação mínima até à capacidade máxima do edifício, permitiria identificar os limiares a partir dos quais o comportamento de herding e os congestionamentos se tornam críticos para a segurança dos ocupantes;
- Combinação de comportamentos em simultâneo: Os cenários simulados neste trabalho isolaram cada comportamento de forma independente. Uma extensão natural deste estudo seria a análise de cenários mistos, nos quais diferentes comportamentos coexistam na mesma simulação, aproximando o modelo da complexidade observada em evacuações reais.



# Referências

- [1] E. Kuligowski, “Evacuation decision-making and behavior in wildfires: Past research, current challenges and a future research agenda,” *Fire Safety Journal*, vol. 120, p. 103129, 2021.
- [2] E. Bakhshian and B. Martinez-Pastor, “Evaluating human behaviour during a disaster evacuation process: A literature review,” *Journal of traffic and transportation engineering (English edition)*, vol. 10, no. 4, pp. 485–507, 2023.
- [3] E. Ronchi and D. Nilsson, “Modelling total evacuation strategies for high-rise buildings,” in *Building Simulation*, vol. 7, pp. 73–87, Springer, 2014.
- [4] G. Huby, “The case study approach,” *BMC Medical Research Methodology*, 2011.
- [5] Y. Rashid, A. Rashid, M. A. Warraich, S. S. Sabir, and A. Waseem, “Case study method: A step-by-step guide for business researchers,” *International journal of qualitative methods*, vol. 18, p. 1609406919862424, 2019.
- [6] H. Najmanová and E. Ronchi, “Experimental data about the evacuation of preschool children from nursery schools, part i: Pre-movement behaviour,” *Fire safety journal*, vol. 138, p. 103798, 2023.
- [7] H.-K. Lee, B.-H. Son, Y.-C. Kim, and W.-H. Hong, “Evacuation information methodology that combined a flooded environment and pedestrian behavioral model,” *International Journal of Disaster Risk Reduction*, vol. 106, p. 104438, 2024.
- [8] R. D. Peacock, J. D. Averill, *et al.*, *Pedestrian and evacuation dynamics*. Springer Science & Business Media, 2011.
- [9] A. Forrister, E. D. Kuligowski, Y. Sun, X. Yan, R. Lovreglio, T. J. Cova, and X. Zhao, “Analyzing risk perception, evacuation decision and delay time: A case study of the 2021 marshall fire in colorado,” *Travel Behaviour and Society*, vol. 35, p. 100729, 2024.
- [10] R. Lovreglio, E. Ronchi, and D. Nilsson, “A model of the decision-making process during pre-evacuation,” *Fire Safety Journal*, vol. 78, pp. 168–179, 2015.

- 
- [11] M. Haghani and M. Sarvi, “Imitative (herd) behaviour in direction decision-making hinders efficiency of crowd evacuation processes,” *Safety Science*, vol. 114, pp. 49–60, 2019.
  - [12] E. Kinkel, C. N. van der Wal, and S. P. Hoogendoorn, “The effects of three environmental factors on building evacuation time,” *Heliyon*, vol. 10, no. 5, 2024.
  - [13] N. Norazahar, F. Khan, B. Veitch, and S. MacKinnon, “Human and organizational factors assessment of the evacuation operation of bp deepwater horizon accident,” *Safety Science*, vol. 70, pp. 41–49, 2014.
  - [14] A. Templeton, H. Xie, S. Gwynne, A. Hunt, P. Thompson, and G. Köster, “Agent-based models of social behaviour and communication in evacuations: A systematic review,” *Safety Science*, vol. 176, p. 106520, 2024.
  - [15] E. Ronchi and D. Nilsson, “Fire evacuation in high-rise buildings: a review of human behaviour and modelling research,” *Fire science reviews*, vol. 2, no. 1, p. 7, 2013.
  - [16] M. Kobes, I. Helsloot, B. De Vries, and J. G. Post, “Building safety and human behaviour in fire: A literature review,” *Fire Safety Journal*, vol. 45, no. 1, pp. 1–11, 2010.
  - [17] H.-K. Sun and C.-K. Chen, “Model considering panic emotion and personality traits for crowd evacuation,” *Chinese Physics B*, vol. 32, no. 5, p. 050401, 2023.
  - [18] H. Lügering, D. Tepeli, and A. Sieben, “It’s (not) just a matter of terminology: Everyday understanding of “mass panic” and alternative terms,” *Safety science*, vol. 163, p. 106123, 2023.
  - [19] J. Bañgate, J. Dugdale, E. Beck, and C. Adam, “A multi-agent system approach in evaluating human spatio-temporal vulnerability to seismic risk using social attachment,” *Risk Analysis XI*, vol. 121, p. 47, 2018.
  - [20] J. Li, C. Wang, J. Chen, and H. Khan, “The role of altruistic behavior in emergency evacuation: A simulation study,” *Journal of Infrastructure, Policy and Development*, vol. 8, no. 10, p. 8184, 2024.
  - [21] J. Wang, Q. Liu, S. Sun, R. Ye, and J. Wu, “Evolution law of selfish psychology in evacuating crowd and its influence on emergency escape,” *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 96, p. 105644, 2025.
  - [22] C. Arteaga, J. Park, B. T. Morris, and S. Sharma, “Effect of trained evacuation leaders on victims’ safety during an active shooter incident,” *Safety science*, vol. 158, p. 105967, 2023.

- 
- [23] J. Lin, Y. Xue, R. Zhu, and Z. Peng, “Exploring the dynamics of social roles in hospital evacuation: Factors, roles and behaviors,” *International Journal of Disaster Risk Reduction*, vol. 113, p. 104893, 2024.
- [24] G. Albi, F. Ferrarese, and C. Segala, “Optimized leaders strategies for crowd evacuation in unknown environments with multiple exits,” in *Crowd Dynamics, Volume 3: Modeling and Social Applications in the Time of COVID-19*, pp. 97–131, Springer, 2021.
- [25] Y. Ma, R. K. K. Yuen, and E. W. M. Lee, “Effective leadership for crowd evacuation,” *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, vol. 450, pp. 333–341, 2016.
- [26] P. Zhang, W. Liu, L. Yang, J. Wu, K. Wang, and Y. Cui, “A social force-based model for pedestrian evacuation with static guidance in emergency situations,” *Fire*, vol. 8, no. 1, 2025.
- [27] J. Drury and E. Ntontis, “A social identity model of collective resilience in emergent groups,” in *The Power of Collective Resilience Against Political Violence and Repression*, pp. 13–30, Routledge, 2025.
- [28] J. Ren, Z. Mao, M. Gong, and S. Zuo, “Modified social force model considering emotional contagion for crowd evacuation simulation,” *International Journal of Disaster Risk Reduction*, vol. 96, p. 103902, Oct 2023<sub>10</sub>.
- [29] S. Rufat, P. Hudson, and E. Enderlin, “Theoretical frameworks of risk perception and protective behaviour: an empirical comparison,” *Natural Hazards*, pp. 1–71, 2025.
- [30] P. Wang, X. Wang, P. Luh, C. Wilkie, T. Korhonen, and N. Olderman, “Simulation of crowd egress with environmental stressors,” *arXiv preprint arXiv:2206.01393*, 2022.
- [31] M. Ni, L. Xia, C. Li, Y. Wei, F. Deng, Z. Liu, M. Qin, and S. Pan, “Herd behavior influence on decision-making during evacuation process: An empirical analysis from building evacuation experiments,” *Current Psychology*, vol. 43, no. 43, pp. 33390–33405, 2024.
- [32] C. Chen, H. Sun, P. Lei, D. Zhao, and C. Shi, “An extended model for crowd evacuation considering pedestrian panic in artificial attack,” *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, vol. 571, p. 125833, 2021.
- [33] M. Haghani, M. Sarvi, and Z. Shahhoseini, “When ‘push’ does not come to ‘shove’: Revisiting ‘faster is slower’ in collective egress of human crowds,” *Transportation research part A: policy and practice*, vol. 122, pp. 51–69, 2019.

- 
- [34] X. Chen, M. Treiber, V. Kanagaraj, and H. Li, “Social force models for pedestrian traffic—state of the art,” *Transport reviews*, vol. 38, no. 5, pp. 625–653, 2018.
- [35] P. C. Tissera, A. M. Printista, and E. Luque, “A hybrid simulation model to test behaviour designs in an emergency evacuation,” *Procedia Computer Science*, vol. 9, pp. 266–275, 2012.
- [36] Thunderhead Engineering, *Pathfinder User Manual*, 2025.
- [37] A. Ferreira, L. P. Ferreira, E. Costa, A. L. Ramos, and C. Carvalho, “Operational excellence of a football stadium evacuation scenario in the context of the industry 4.0,” *Facilities*, vol. 43, pp. 1153–1174, 10 2025.
- [38] M. Safari, R. Afkhami, M. Amerzadeh, and V. Zaroushani, “Simulation of fire emergency evacuation in a primary school based on pathfinder software,” *Buildings*, vol. 15, no. 1, 2025.
- [39] Y. Fan, H. Cui, J. Qin, C. Liu, and Q. Huang, “A case study on the evacuation of people during a fire in the workshop of a large factory,” *Fire*, vol. 7, p. 47, 02 2024.
- [40] A. M. Selim, E. A. Salama, and H. M. Gaber, “Optimizing safe evacuation using pathfinder: emergency strategies in high-rise and super high-rise complex buildings in the new administrative capital,” *HBRC Journal*, vol. 20, no. 1, pp. 385–413, 2024.
- [41] H.-F. Lyu, C.-P. Wang, J. Deng, Y. Xiao, and W.-F. Wang, “Human behaviour and evacuation time for large underground comprehensive buildings during fire risk process,” *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 84, p. 105134, 2023.
- [42] Z. Li, H. Huang, N. Li, M. L. Chu(Zan), and K. Law, “An agent-based simulator for indoor crowd evacuation considering fire impacts,” *Automation in Construction*, vol. 120, p. 103395, 2020.
- [43] N. W. Bode and E. A. Codling, “Human exit route choice in virtual crowd evacuations,” *Animal Behaviour*, vol. 86, no. 2, pp. 347–358, 2013.
- [44] S. Kong, W. Guo, and W. Wang, “Research on evacuation simulation of university teaching building based on pathfinder,” 01 2023.
- [45] D. Nilsson and A. Johansson, “Social influence during the initial phase of a fire evacuation—analysis of evacuation experiments in a cinema theatre,” *Fire safety journal*, vol. 44, no. 1, pp. 71–79, 2009.
- [46] S. Sharma, K. Ogunlana, D. Scribner, and J. Grynovicki, “Modeling human behavior during emergency evacuation using intelligent agents: A multi-agent simulation approach,” *Information Systems Frontiers*, vol. 20, no. 4, pp. 741–757, 2018.

- 
- [47] H. Chen, C. Zhang, J. Zhang, Y. Shu, X. Qi, and C. Jiang, “Simulation of fire emergency evacuation in a large-passenger-flow subway station based on the on-site measured data of shenzhen metro,” *Transportation safety and environment*, vol. 6, no. 1, p. tdad006, 2024.
  - [48] C. Şahin, J. Rokne, and R. Alhajj, “Human behavior modeling for simulating evacuation of buildings during emergencies,” *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, vol. 528, p. 121432, 2019.
  - [49] M. Rismanian and E. Zarghami, “Investigating the effect of crowd behavioral patterns on the safe evacuation in high-rise residential buildings,” *Disaster Prevention and Management Knowledge (quarterly)*, vol. 11, no. 3, pp. 287–298, 2021.
  - [50] J. Wei, Q. Deng, and L. Zhang, “Study on emergency evacuation in underground urban complexes,” *PLoS one*, vol. 17, no. 12, p. e0278521, 2022.