

ANÁLISE E MELHORIA DA EVACUAÇÃO DE UMA EMPRESA INDUSTRIAL NO CONTEXTO DA INDÚSTRIA 4.0 USANDO SIMULAÇÃO

MARCELO MACHADO

julho de 2026



ANÁLISE E MELHORIA DA EVACUAÇÃO DE UMA EMPRESA INDUSTRIAL NO CONTEXTO DA INDÚSTRIA 4.0 USANDO SIMULAÇÃO

Marcelo Machado

**Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia, Área de
Especialização em Gestão Industrial**

Orientador: Professor Doutor Luís Carlos Ramos Nunes Pinto Ferreira

Júri:

Presidente:

Professora Doutora Cátia Filipa Veiga Alves, Professor Adjunto, Departamento de Engenharia Mecânica, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Vogais:

Professor Doutor Luís Carlos Ramos Nunes Pinto Ferreira, Professor Coordenador com Agregação, Departamento de Engenharia Mecânica, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Professora Doutora Ana Luísa Ferreira Andrade Ramos, Professora Associada, Universidade de Aveiro

Porto, Julho de 2026

Dedicatória

Dedico este trabalho, em primeiro lugar, a Deus, por ser a minha força espiritual nos momentos de maior dificuldade ao longo desta caminhada.

À minha esposa Ana, e às minhas filhas, Lara e Marcella, pelo amor incondicional, paciência e por, mesmo à distância, acompanharem os meus sonhos e realizações.

A todos aqueles que reconhecem a relevância da consolidação do saber e do desenvolvimento contínuo das competências humanas e técnicas para um presente e futuro melhores.

Agradecimentos

À minha esposa, Ana Lúcia Soares Machado, pela paciência, amor, compreensão e suporte demonstrados ao longo de todo este percurso. O seu apoio e a sua postura como grande referência nos estudos foram, sem dúvida, a maior inspiração para a superação desta etapa.

Ao meu orientador, Professor Doutor Luís Pinto Ferreira, cujo suporte e direcionamento foram fundamentais para moldar as ideias iniciais e transformá-las em conhecimento estruturado ao longo de toda esta investigação.

Expresso a minha profunda gratidão ao gestor principal da empresa parceira, Sr. Janderson Barbosa, pela confiança depositada e pela total abertura e cooperação para a realização deste trabalho. Estendo este agradecimento a toda a sua equipa de gestores, cujo apoio técnico e logístico foi absolutamente essencial à viabilização e colheita de dados para este estudo.

Aos estimados professores do corpo docente, que partilharam o seu saber com excelência durante todo o período do mestrado, contribuindo significativamente para a minha valorização profissional e académica.

Por fim, aos meus colegas de turma, companheiros de jornadas que, partilhando os desafios deste percurso, tornaram esta caminhada uma experiência académica e pessoal inesquecível.

Resumo

A presente dissertação tem como ponto focal a avaliação e sugestão de melhoria, numa unidade de fabricação de artefactos plásticos, dos processos de evacuação de emergência, com a utilização de ferramentas de simulação e do conceito de gémeos digitais no âmbito da Indústria 4.0. O objetivo principal consistiu em analisar o comportamento do fluxo dos ocupantes e identificar estrangulamentos na estrutura da edificação e na infraestrutura fabril sob cenários de evacuação de emergência. Metodologicamente, efetuou-se o levantamento e o mapeamento das instalações, cujos dados serviram de base para a modelação computacional e parametrização de cenários dinâmicos. Os resultados obtidos evidenciaram o impacto crítico dos desníveis, dos lanços de escada e da configuração do mezanino nos tempos totais de desocupação e nas distâncias percorridas pelos ocupantes. A discussão dos dados permitiu validar a eficácia dos modelos virtuais enquanto instrumentos preditivos de apoio à tomada de decisão operacional. Conclui-se que a metodologia adotada fornece uma abordagem robusta para mapear pontos de estrangulamento, rotas alternativas e mitigar riscos de forma a garantir uma resposta segura na salvaguarda de vidas humanas em ambientes de elevada complexidade fabril, contribuindo para a formação e treino de equipas de segurança contra incêndio e de evacuação.

Palavras-chave: Evacuação de emergência, Modelação computacional, Gémeos digitais, Indústria 4.0, Segurança contra incêndios.

Abstract

This dissertation focuses on the evaluation and improvement of emergency evacuation processes within a plastic manufacturing facility, using simulation tools and the digital twin concept within the scope of Industry 4.0. The primary objective was to analyze occupant flow behavior and identify bottlenecks within both the building structure and the factory infrastructure under emergency evacuation scenarios. Methodologically, an assessment and mapping of the installations were conducted, providing the baseline data for computational modeling and the parameterization of dynamic scenarios. The obtained results highlighted the critical impact of floor elevation changes, stair flights, and mezzanine configuration on total egress times and distances covered by occupants. The data discussion validated the effectiveness of virtual models as predictive instruments to support operational decision-making. In conclusion, the adopted methodology provides a robust approach to map bottlenecks, outline alternative routes, and mitigate risks ensuring a safe response for safeguarding human lives in highly complex manufacturing environments, thereby contributing to the training and education of fire safety and evacuation teams.

KEYWORDS: Emergency Evacuation, Computational modeling, Digital twin, Industry 4.0, Fire safety.

Índice

Lista de Figuras.....	xiii
Lista de Tabelas.....	xvii
Acrónimos e Símbolos.....	xix
1. Introdução.....	21
1.1. Problema de Investigação, Enquadramento e Pertinência.....	21
1.2. Questão e Objetivos de Investigação.....	23
1.3. Opções Metodológicas.....	23
1.4. Apresentação da Empresa.....	24
1.5. Conteúdo e Organização da Dissertação.....	25
2. Revisão Bibliográfica.....	27
2.1. A Simulação e o <i>Digital Twin</i> no Contexto da Indústria 4.0.....	27
2.2. Os Paradigmas da Simulação.....	29
2.2.1. Simulação Discreta.....	29
2.2.2. Simulação Baseada em Agentes.....	30
2.2.3. Dinâmica de Sistemas.....	31
2.3. A Importância da Evacuação para a Segurança das Pessoas.....	32
2.4. Casos de Estudo.....	33
2.5. Legislação.....	36
2.6. Análise Bibliométrica.....	38
3. Métodos e Aplicação.....	43
3.1. Estrutura da Edificação.....	44
3.1.1. Pavimento 01.....	45
3.1.2. Pavimento 02.....	47
3.1.3. Pavimento 03.....	50
3.2. Estudo da Simulação.....	52
3.2.1. Software de Simulação.....	52
3.2.2. Criação do Modelo Computacional – Importação da Geometria.....	53
3.2.3. Criação do Modelo Computacional – Componentes da Malha de Navegação ..	55
3.2.4. Criação do Modelo Computacional – Rede da Malha de Navegação.....	57
3.2.5. Criação do Modelo Computacional – Portas de Acesso.....	59
3.2.6. Criação do Modelo Computacional – Escadas e Rampas.....	61
3.2.7. Visualização 3D do modelo.....	62
3.3. Definição dos Ocupantes da Edificação.....	63
3.3.1. Perfil dos Ocupantes (<i>Profile</i>).....	64
3.3.2. Comportamento dos Ocupantes (<i>Behavior</i>).....	66

3.3.3. Parametrização dos Ocupantes	66
3.3.4. Modo de Simulação (SFPE e <i>Steering</i>)	68
3.4. Validação do Modelo	69
3.4.1. Ensaio Experimental e Simulação Computacional	70
3.4.2. Critério de Validação do Modelo	72
4. Resultados e Discussão	75
4.1. Cenários de Evacuação	76
4.1.1. Cenário 1 – 69 Ocupantes Sem Restrições de Saída	78
4.1.2. Cenário 2 – 69 Ocupantes com Zonas de Saída 1 e 2 Bloqueadas.....	84
4.1.3. Cenário 3 – 69 Ocupantes com Rampa de Entrada da Edificação Bloqueada	88
4.1.4. Cenário 4 – 69 Ocupantes com Lanço de Escada aos Escritórios Bloqueada	92
4.1.5. Cenário 5 – 21 Ocupantes Sem Restrições	98
4.1.6. Cenário 6 – 87 Ocupantes Sem Restrições de Saída	102
4.1.7. Cenário 7 – 87 Ocupantes com Zonas de Saída 1 e 2 Bloqueadas.....	106
4.1.8. Cenário 8 – 87 Ocupantes com Rampa de Entrada da Edificação Bloqueada ..	111
4.1.9. Cenário 9 – 87 Ocupantes com Lanço de Escada aos Escritórios Bloqueado ...	117
4.1.10. Cenário 10 – 89 Ocupantes com Reconstrução de Evacuação Real.....	122
4.2. Discussão de Resultados	130
5. Conclusão	135
5.1. Conclusões Finais	136
5.2. Valor Acrescentado à Empresa	136
5.3. Dificuldades Encontradas	137
5.4. Limites e Investigações Futuras	137
Referências.....	139
Declaração de Integridade	145

Lista de Figuras

Figura 1 – Pesquisa Bibliográfica – Publicações por Ano (Scopus)	39
Figura 2 – Mapa da Distribuição do Número de Publicações por País	39
Figura 3 - Quantidade de Publicações por País.....	40
Figura 4 – Percentual de Publicações por Tipo	40
Figura 5 - Informações do Software Pathfinder.....	43
Figura 6 - Vista Aérea da Unidade Industrial	44
Figura 7 - Vista da Entrada Principal da Unidade Industrial.....	44
Figura 8 - Planta da Empresa - Pavimento 01	45
Figura 9 - Indicação da Cota de Altura do Piso/Pavimento.....	46
Figura 10 - Rampa de Acesso entre Nível 0 e Nível -1.40 m	46
Figura 11 - Lanço de Escada entre Níveis do Pavimento 01	47
Figura 12- Planta da Empresa - Pavimento 02	48
Figura 13 - Mezanino - Pavimento 02	49
Figura 14 - Departamento de Manutenção	50
Figura 15 - Planta da Empresa - Pavimento 03	51
Figura 16 - Escritórios - Pavimentos 01, 02 e 03	51
Figura 17- Interface Gráfica Inicial do Software Pathfinder	52
Figura 18 - Sequência de Importação dos Ficheiros	53
Figura 19 - Geometria da Edificação - Importação Inicial	54
Figura 20 - Geometria da Edificação – Importação Editada	54
Figura 21- Ferramentas de Desenho dos Elementos de Navegação (Rooms)	55
Figura 22 - Ferramentas de Desenho para Conectores de Malhas (Stair, Ramp, Door).....	56
Figura 23 - Pontos de Encontro - Zonas de Saída.....	56
Figura 24 - Etapas para a Criação do Modelo de Simulação.....	57
Figura 25 - Detalhamento 2D da Malha de Navegação – Pav. 01 (Salas)	58
Figura 26 - Portas de Acesso (Door).....	59
Figura 27 - Configuração das Portas	60
Figura 28 - Delimitação dos Corredores na Produção	60
Figura 29 - Malha de Navegação por Pavimento	61
Figura 30 - Malha de Navegação 3D - (Stair / Ramp).....	62
Figura 31- Visualização 3D do Modelo.....	63
Figura 32 - Criação e Configuração do Perfil - Profile	65
Figura 33 - Modelos de Agentes por Grupo - Model 3d	65
Figura 34 - Parametrização do Comportamento dos Agentes - Behavior	66
Figura 35 - Alocação de Ocupantes no Modelo	68
Figura 36- Fórmula do erro Percentual para o Trajeto	70
Figura 37 - Tempos do Ensaio Experimental e Simulação Computacional	71
Figura 38 – Fluxo de Validação do Modelo	71
Figura 39 - Erro Quadrático Médio - RMSE.....	73
Figura 40 - Listagem do Perfil dos Ocupantes - Profile / Behavior	77

Figura 41 - Número de Ocupantes por Horário	77
Figura 42 - Edição de Cenários - Cenário 1.....	79
Figura 43 - Resultado Inicial da Simulação (Summary) - Cenário 1.....	79
Figura 44 - Conteúdo Inicial do Ficheiro Summary.txt.....	80
Figura 45 - Evolução do Número de Ocupantes na Evacuação - Cenário 1	81
Figura 46 - Vista 3d da Ocupação do Pátio Frontal (A) da Empresa - Cenário 1.....	82
Figura 47 - Número de Ocupantes no Pátio Frontal da Empresa - Cenário 1.....	82
Figura 48 - Fluxo de Pessoas nas Zonas de Saída - Cenário 1	83
Figura 49 - Edição de Cenários - Cenário 2.....	84
Figura 50 - Resultado Inicial da Simulação (Summary) - Cenário 2.....	85
Figura 51 - Evolução do Número de Ocupantes na Evacuação - Cenário 2	86
Figura 52- Vista 3d da Ocupação do Pátio Frontal (A) da Empresa - Cenário 2.....	86
Figura 53 - Número de Ocupantes no Pátio Frontal da Empresa - Cenário 2.....	87
Figura 54 - Fluxo de Pessoas nas Zonas de Saída – Cenário 2.....	87
Figura 55 - Edição de Cenários - Cenário 3.....	88
Figura 56 - Saída da Zona de Produção com Rampa Bloqueada - Cenário 3	88
Figura 57 - Evolução do Número de Ocupantes na Evacuação - Cenário 3	90
Figura 58 - Ocupantes e Fluxo na Rampa e Corredor de Saída do Pav. 01 - Cenários 1 e 3	91
Figura 59 - Fluxo de Pessoas nas Zonas de Saída - Cenário 3	91
Figura 60 – Evolução do Número de Ocupantes - Cenários 1 e 4.....	94
Figura 61 - Edição de Cenários - Cenário 4.....	95
Figura 62 - Bloqueio de Saída do Pav. 02 com Lanço de Escada Bloqueada - Cenário 4	95
Figura 63 - Evolução do Número de Ocupantes no Pátio frontal - Cenários 1 e 4	96
Figura 64 - Fluxo de Pessoas nas Zonas de Saída - Cenários 1 e 4.....	97
Figura 65 - Edição de Cenários - Cenário 5.....	98
Figura 66 - Resultado Inicial da Simulação (Summary) – Cenário 5.....	99
Figura 67 - Evolução do Número de Ocupantes na Evacuação - Cenário 5	100
Figura 68 - Vista 3d da Ocupação do Pátio Frontal (A) da Empresa - Cenário 5.....	100
Figura 69 - Evolução do Número de Ocupantes no Pátio Frontal - Cenários 5.....	101
Figura 70 - Fluxo de Pessoas nas Zonas de Saídas – Cenário 5	102
Figura 71 - Edição de Cenários - Cenário 6.....	102
Figura 72 - Resultado Inicial da Simulação (Summary) – Cenário 6.....	103
Figura 73 - Evolução do Número de Ocupantes na Evacuação - Cenário 6	104
Figura 74 - Vista 3d da Ocupação do Pátio Frontal (A) da Empresa - Cenário 6.....	105
Figura 75 - Evolução do Número de Ocupantes na Evacuação - Cenário 6	105
Figura 76 - Fluxo de Pessoas nas Zonas de Saídas – Cenário 6	106
Figura 77 - Edição de Cenários - Cenário 7.....	107
Figura 78 - Resultado Inicial da Simulação (Summary) – Cenário 7.....	107
Figura 79 - Evolução do Número de Ocupantes na Evacuação - Cenário 7	108
Figura 80 - Vista 3d da Ocupação do Pátio Frontal (A) da Empresa - Cenário 7.....	109
Figura 81 - Número de Ocupantes no Pátio Frontal da Empresa (A) - Cenários 6 e 7.....	110
Figura 82 - Fluxo de Pessoas nas Zonas de Saída - Cenário 7	111
Figura 83 - Edição de Cenários - Cenário 8.....	111

Figura 84 - Vista 3d dos Ocupantes em Passagem Pelo Corredor (A) - Cenário 8	112
Figura 85 - Vista 2d do Corredor (A) e Rampa (D) Bloqueada - Cenário 8	112
Figura 86 - Evolução do Número de Ocupantes na Evacuação - Cenário 8	114
Figura 87 - Número de Ocupantes no Corredor e Rampa de Acesso - Cenários 6 e 8	114
Figura 88 - Fluxo de Ocupantes na Linha de Descarga do Corredor - 69 e 87 Ocupantes	115
Figura 89 - Número de Ocupantes no Pátio Frontal da Empresa (A) - Cenário 8	116
Figura 90- Fluxo de Pessoas nas Zonas de Saída - Cenários 6 e 8	117
Figura 91 - Sobreposição Gráfica do Número de Ocupantes - Cenários 6 e 9	119
Figura 92 - Edição de Cenários - Cenário 9	120
Figura 93 - Vista 3d do Fluxo de Ocupantes Evacuando o Pavimento 02 - Cenário 9	120
Figura 94 - Número de Ocupantes no Pátio Frontal da Empresa (A) - Cenários 6 e 9	121
Figura 95 - Fluxo de Pessoas nas Zonas de Saída - Cenários 6 e 9	122
Figura 96 - Edição de Cenários - Cenário 10	123
Figura 97 - Trecho Inicial do Relatório de Evacuação	123
Figura 98 - Modelo Ajustado para o Layout 2024 - Cenário 10	124
Figura 99 - Resultado Inicial da Simulação (Summary) - Cenário 10	124
Figura 100 - Evolução do Número de Ocupantes - Cenários 1, 6 e 10	126
Figura 101 - Número de Ocupantes no Pátio frontal da Empresa - Cenários 1, 6 e 10	128
Figura 102 - Fluxo de Pessoas nas Zonas de Saída - Cenários 1, 6 e 10	129

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Resumo de Publicações por Foco Temático	36
Tabela 2 - Conjunto de Leis de Segurança contra Incêndio no Estado do Amazonas	37
Tabela 3 - Quantidade de Artigos por Foco/Tipologia do Edifício	41
Tabela 4 - Tabela de Medidas Antropométricas	64
Tabela 5 - Parametrização por Grupo de Ocupantes.....	67
Tabela 6 - Velocidade Máxima dos Ocupantes - SFPE	69
Tabela 7 - Tabela Comparativa para Validação do Cenário	72
Tabela 8 - Número de Ocupantes Por Turno de Trabalho	76
Tabela 9 - Resultados Cenário 1	80
Tabela 10- Resultados Cenário 2.....	85
Tabela 11 - Resultados Cenário 3	89
Tabela 12 - Resultados Cenário 4.....	92
Tabela 13 – Resultados com Métricas de Congestionamento - Cenário 4	93
Tabela 14 - Resultados Cenário 5	99
Tabela 15 - Resultados Cenário 6.....	103
Tabela 16 - Resultados Cenário 7	108
Tabela 17 - Resultados Cenário 8.....	113
Tabela 18 - Resultados Cenário 9	118
Tabela 19 - Resultados com Métricas de Congestionamento - Cenário 9	118
Tabela 20 - Resultados Cenário 10.....	125
Tabela 21 - Evacuação de 80% dos Ocupantes - Cenários 1, 6, 10	127
Tabela 22 - Resultados com Métricas de Congestionamento - Cenário 10	127
Tabela 23 - Performance do Cenário - Tempo de Evacuação	130
Tabela 24 - Performance dos Cenários - Tempo Médio de Evacuação.....	131
Tabela 25 - Performance dos Cenários - Distância Média Percorrida	131
Tabela 26 - Performance dos Cenários - Tempo Médio de Congestionamento	132

Acrónimos e Símbolos

Lista de Acrónimos

2d	Bi-dimensional
3d	Tri-dimensional
CAD	<i>Computer-Aided Design</i> (Desenho Assistido por Computador)
CBMAM	Corpo de Bombeiros Militar do Estado do Amazonas
CPU	<i>Central Processing Unit</i> (Unidade de Processamento Central)
DP	Desvio Padrão
DWG	<i>Drawing</i> (Formato de ficheiro de desenho técnico assistido por computador)
IoT	<i>Internet of Things</i> (Internet das Coisas)
ISEP	Instituto Superior de Engenharia do Porto
IT	Instrução Técnica
MEGI	Mestrado em Engenharia e Gestão Industrial
MP	Matéria-Prima
Occ	Ocupantes
PIM	Polo Industrial de Manaus
RH	Recursos Humanos
RMSE	<i>Root Mean Square Error</i> (Erro Quadrático Médio)
RSET	<i>Required Safe Egress Time</i> (Tempo de Evacuação Seguro Disponível)
SFPE	<i>Society of Fire Protection Engineers</i> (Sociedade de Engenheiros de Proteção contra Incêndios)
SST	Segurança e Saúde no Trabalho
UWB	<i>Ultra-WideBand</i> (Banda Ultra Larga)
WIP	<i>Work in Process</i> (Inventário em Processo)
WS	<i>Work Station</i> (Estação de Trabalho)

Lista de Símbolos

D	Densidade de ocupação / populacional	pess/m ²
d	Distância / Comprimento	m ou cm
t	Tempo	s, min ou h
v	Velocidade	m/s

1. Introdução

A presente dissertação, desenvolvida no âmbito do Mestrado em Engenharia e Gestão Industrial (MEGI) do Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP), aborda o uso de ferramentas da Indústria 4.0 para a análise e melhoria da evacuação de uma empresa industrial. Este trabalho estuda a necessidade de aprimoramento dos planos de evacuação de emergência e segurança dos trabalhadores e ocupantes de uma instalação com finalidade fabril. O trabalho investigou o uso da Simulação Computacional e dos *Digital Twins (DT)*, como ferramentas de apoio à decisão. No contexto da Indústria 4.0 buscou complementar os planos de evacuação de emergência de uma empresa industrial, originariamente estáticos, com modelos dinâmicos nos cenários propostos.

1.1. Problema de Investigação, Enquadramento e Pertinência

A quarta revolução industrial, denominada Indústria 4.0, é caracterizada pela integração de sistemas físicos e digitais, com ênfase na análise e uso dos dados para criação de ambientes virtuais e simulações. Indústrias que seguem esses pilares e a *Smart Manufacturing* (Manufatura Inteligente) ainda enfrentam um conjunto de diferentes, e em alguns casos complexos, desafios e oportunidades (Forcina et al., 2024). Para os procedimentos de evacuação em edifícios e instalações industriais necessários para a licença de operação, as empresas ainda enfrentam o desafio de garantir saídas rápidas e seguras em emergências (Ferreira et al., 2025). Para suportar esta exigência, entram em cena sistemas avançados que utilizam modelos matemáticos e dados do ambiente físico e real para gerar resultados simulados em ambientes digitais (Galli et al., 2023), permitindo desta forma, a análise de processos, como a evacuação, de forma não intrusiva com o uso da simulação computacional (García et al., 2024) e o apoio a um complexo processo de preparação estratégica (Chanthakhot & Ransikarbum, 2025).

As tecnologias são frequentemente aplicadas para melhorar e gerar impacto positivo no ambiente industrial (Billey & Wuest, 2024; Murgod et al., 2024), tendo a sua aplicação na segurança industrial, nomeadamente na análise e melhoria dos planos de evacuação, um campo em crescimento e de alta importância. O risco de incidentes em ambientes fabris complexos exige métodos de avaliação de segurança mais robustos e dinâmicos. A Simulação Baseada em Agentes, é o paradigma ideal para modelar o comportamento humano. Desta forma, este trabalho insere-se na intersecção da Indústria 4.0 com a segurança do ambiente de trabalho, propondo o uso da simulação e do *Digital Twin* como ferramentas de apoio à decisão

para melhorar os processos de evacuação. O resultado visa contribuir para garantir a segurança dos colaboradores em situações de risco e emergência.

O contexto desta dissertação surge pela necessidade de melhoria nos planos de evacuação em ambientes industriais, de maneira mais imperativa; a considerar os ambientes fabris como instalações de maior complexidade. Independente do nível de complexidade das instalações, o aspeto de segurança em emergências, como incêndios ou outros eventos de risco, assume um carácter crucial, com destaque a relevância da eficácia dos procedimentos de evacuação. O estudo da evacuação é uma temática cada vez mais essencial por caracterizar a proteção da vida humana em casos de emergência (Calderon-Monge & Ribeiro-Soriano, 2024; Jin, 2024).

Este trabalho, foi realizado na sede das instalações de fabrico de material plástico, da empresa escolhida para a investigação deste trabalho. A Empresa localiza-se no Polo Industrial de Manaus (PIM), Amazonas/Brasil, onde enfrenta os desafios relacionados aos riscos, dificuldades de evacuação dentro das instalações industriais e o cumprimento dos requisitos da legislação para a elaboração de planos de evacuação. Os planos de evacuação têm características próprias, e com especificidades que os tornam diferentes mesmo dentro do mesmo país em função do progresso técnico e conhecimento adquirido ao longo do tempo em cada localidade (Jin, 2024); sendo regidos por regulamentações de acordo com finalidade do uso da edificação. De forma geral, o setor industrial, independente da localização geográfica, depende de planos de evacuação estáticos, que não consideram variáveis dinâmicas ou cenários de incidentes em áreas que bloqueiam uma ou mais rotas de saída de emergência.

Para superar as limitações dos planos estáticos, modelos de simulação surgem como solução viável para a análise e aperfeiçoamento dos planos de evacuação. A simulação computacional faz sentido tendo em conta o facto de os modelos de simulação lidarem com diversos parâmetros e, assim, possuírem grande capacidade de representação e expressividade do modelo, como uma das características mais destacadas das simulações por computador juntamente com o seu poder de computacional (Duran, 2020).

O risco de incidentes em ambientes industriais complexos exige métodos de avaliação de segurança mais robustos e dinâmicos. Esta dissertação propõe o uso da simulação baseada em agentes, com a utilização de *Digital Twins*, como ferramenta de apoio à decisão. Considera-se a simulação baseada em agentes o paradigma ideal para modelar o comportamento humano nos cenários propostos e percebe-se o consenso de que as tecnologias centradas em dados apresentam oportunidades para aprimorar as capacidades atuais da modelagem de informação; para o registo do comportamento de usuários, conexões e dados entre o mundo real e um modelo virtual; sendo o ponto de encontro de condições propícias para o desenvolvimento de Digital Twins (Zribi et al., 2025).

Deste modo, a presente dissertação visa preencher a lacuna identificada na literatura para uma prática segura da evacuação em ambientes industriais, com contributos para uma perceção aprofundada dos fatores que influenciam este processo. Propõe-se o uso de ferramentas de simulação digital para a tomada de decisão, de modo a permitir a identificação de cenários críticos e a proposta de estratégias para orientação e treino dos ocupantes, de uma forma

alinhada com a intersecção da tecnologia da indústria 4.0 com a Segurança e Saúde no Trabalho (SST).

1.2. Questão e Objetivos de Investigação

Esta dissertação visa responder a seguinte questão de pesquisa: “Como o uso da simulação baseada em agentes pode ser efetivamente utilizada para melhorar o processo de evacuação em instalações industriais, dentro do contexto da indústria 4.0?”. O objetivo geral deste trabalho é avaliar e aprimorar o plano de evacuação de uma unidade industrial de fabrico de material plástico, localizada no Polo Industrial de Manaus, no estado do Amazonas, Brasil.

Para alcançar este propósito, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- Descrever o Processo atual de evacuação da Empresa.
- Quantificar os tempos de evacuação consonante atividades de evacuação real.
- Analisar o cenário atual em relação à evacuação da Empresa.
- Construir um modelo de simulação (*Digital Twin*) a partir do layout da Unidade Industrial para caracterizar o ambiente de produção e o fluxo de ocupantes.
- Implementar método e elaborar procedimento de evacuação baseado em cenários de simulação.
- Analisar os resultados dos cenários de emergência, como bloqueio de rotas e falha de saídas.
- Avaliar os resultados em relação ao desempenho do plano de evacuação estático para as recomendações concretas de melhoria para o processo de evacuação.

1.3. Opções Metodológicas

A definição da estratégia metodológica deste trabalho visa a criação de um modelo de análise que responda à complexidade da segurança de ocupantes de edifícios industriais no Polo Industrial de Manaus. A metodologia estrutura-se a partir de um nível geral para os níveis específicos em níveis de modo progressivo, com o ponto de partida nos fundamentos teóricos e o ponto de chegada em resultados com a análise de dados de ferramentas tecnológicas. Segundo Coutinho (2014), a metodologia abrange um sentido mais amplo que o método ao questionar os fundamentos e os pressupostos teóricos que servem de base para a elaboração do conhecimento científico, de modo a validar precisão da investigação.

A escolha da metodologia mista, quantitativa e qualitativa, foi direcionada com a justificativa de se usar a quantitativa para medir a diferença entre os tempos de evacuação reais e os projetados em ambiente simulado, enquanto a qualitativa atuou na análise de cenários de risco, de modo a transformar os dados brutos em suporte acessível para a tomada de decisão. Esta abordagem alinha-se à definição dada por Creswell (2014) e a percepção de Caixeta & Fabricio (2018), que destacam como a estrutura hierárquica coloca o método como procedimento para realizar e abordar os objetivos da pesquisa.

O método científico segundo Reis (2010) é o conjunto de procedimentos aplicados com o objetivo de consolidar de forma estruturada o conhecimento. O método dedutivo foi selecionado para propiciar consistência à toda investigação, com conceitos técnicos e normativos sobre evacuação para aplicá-los ao caso particular da unidade industrial. Ao detalhar cada cenário de evacuação, com a identificação dos impactos das variáveis nos resultados, e ao mesmo tempo atuar de modo a propor novas alternativas, a investigação assumiu uma natureza descritiva e atuante. Em ambientes industriais complexos, essa natureza atuante foi reforçada pela integração tecnológica, onde a segurança passa a ser gerida de forma contínua e dinâmica com o uso de modelos preditivos (G. Liu et al., 2025).

A estratégia central da metodologia foi a investigação-ação. Opção que permitiu uma análise detalhada sobre o processo de evacuação da empresa, tratando-a simultaneamente como ambiente de investigação e campo de ação, ao unir compreensão da sistemática da empresa e as propostas de mudanças, de modo a criar a possibilidade da criação e utilização de um processo continuado de análise crítica para a solução de problemas (Freixo, 2018). No âmbito desta investigação, o software Pathfinder foi utilizado como ferramenta de simulação, com contributos de predição de situações futuras sem impacto nas operações, em linha com as tendências de melhoria de ambientes industriais (Fan et al., 2024).

O plano exploratório de investigação ficou estabelecido em três fases:

- Diagnóstico: Recolha de tempos reais e descrição do estado atual do processo de evacuação;
- Simulação: Aplicação do método experimental no Pathfinder para simular condições de evacuação;
- Intervenção: Utilização pelos gestores da empresa dos resultados da análise comparativa entre os tempos reais e simulados para o treino e formação das equipas Segurança, com a proposição de que a tomada de decisão possa ser baseada em evidências.

1.4. Apresentação da Empresa

Com uma origem de capital 100% brasileira, a empresa instalada em Manaus desde 2004, mantém como principal o objetivo de crescer e participar ativamente no processo de embalagens, nos mais diversos segmentos de mercado do Polo Industrial de Manaus, do Brasil e do mercado internacional.

Com uma missão reconhecida nas soluções para fechamento de embalagens, com qualidade e tecnologia, para a satisfação dos clientes, fornecedores e colaboradores. Apresentando uma visão voltada para a qualidade e inovação em seu *portfolio* de produtos.

Destacando-se no trabalho ético, honestidade e respeito, transparência nas ações e valorização do trabalho por meio de ações para assegurar e aprimorar as condições de trabalho, onde inclui-se a segurança e saúde no trabalho (SST); campo de segurança e saúde diretamente interligado ao estudo e contributo deste trabalho no processo de evacuação de emergência.

1.5. Conteúdo e Organização da Dissertação

A presente dissertação encontra-se dividida em cinco capítulos.

O capítulo 1 descreve a introdução e enquadramento, delimitando objetivos a atingir, as metodologias utilizadas durante o trabalho e a introdução do local de estudo e colheita de dados.

O capítulo 2 consiste na revisão da literatura e fundamentação teórica para o uso da simulação no contexto da indústria 4.0 em cenários de evacuação e seus paradigmas. Abordando a importância da evacuação no âmbito da segurança de pessoas e apresentam-se exemplos de casos de estudo que recorrem a simulação computacional em ambientes que necessitam de um plano de evacuação para os ocupantes das edificações. Adicionalmente, o capítulo faz uma análise da legislação pertinente ao tema no local de operação da empresa e finaliza com uma análise bibliométrica comparando o volume de estudos de evacuação publicados recentemente.

No capítulo 3 descrevem-se as características da edificação utilizada pela empresa, com detalhamento de cada pavimento utilizado pelos ocupantes. Expõem-se o desenvolvimento do modelo computacional com o auxílio do *software* Pathfinder, desde a importação dos ficheiros à construção do modelo virtual e seus respetivos elementos na edificação, bem como a parametrização das características de cada grupo de ocupantes. O capítulo encerra com a validação do modelo por meio de ensaios experimentais e de simulação computacional.

Os resultados são discutidos no capítulo 4, com os resultados obtidos por meio do modelo de simulação em diferentes cenários propostos. Por fim, as conclusões finais, valor acrescentado à empresa, dificuldades encontradas, limites e investigações futuras correspondem ao conteúdo do capítulo 5, ao qual se seguem apresentadas as referências bibliográficas utilizadas para a realização desta dissertação.

2. Revisão Bibliográfica

O presente capítulo estabelece a fundamentação teórica e o estado da arte necessários para sustentar a investigação sobre a segurança contra incêndio e a evacuação de emergência de edifícios usados por operações industriais, a considerar o contexto da Indústria 4.0 em uma empresa localizada no estado do Amazonas/Brasil. A estrutura da revisão parte do paradigma tecnológico dos *Digital Twins* e da simulação computacional, a explorar como a digitalização de ativos permite a transição de uma segurança puramente reativa para modelos de *Smart Safety* (Segurança Inteligente). Com o auxílio desta base científica, busca-se compreender como as ferramentas de simulação dinâmica superam as limitações indicadas em métodos considerados tradicionais na proteção de infraestruturas industriais.

A abordagem segue com a análise dos diferentes paradigmas de simulação, nomeadamente a Simulação de Eventos Discretos, a Modelação Baseada em Agentes e a Dinâmica de Sistemas. Destaca-se a sinergia na representação fiel do comportamento humano e dos fluxos de evacuação, com uma abordagem adicional sobre a importância crítica da gestão do tempo de saída e o enquadramento normativo vigente. O enfoque regulamentar focou de modo especial na legislação brasileira e na legislação específicas do Estado do Amazonas, que balizam os requisitos técnicos para as edificações e unidades industriais no PIM.

Finalmente, o capítulo consolida-se com a análise de uma vasta amostra de casos de estudos recentes e dados bibliométricos extraídos da base de publicações da plataforma Scopus. Esta etapa foi fundamental para identificar a lacuna existente para a investigação acontecer no setor industrial; com o traçar de avaliações comparativas com edifícios de educação e infraestrutura de transporte. Por meio desta análise comparativa, justifica-se a originalidade deste trabalho de investigação proposto, a buscar a demonstração de como a aplicação de tecnologias que sustentam a Indústria 4.0 e a simulação, como auxílio de ferramentas computacionais, podem mitigar riscos patrimoniais e humanos num ambiente de manufatura dinâmico e de considerável densidade ocupacional.

2.1. A Simulação e o *Digital Twin* no Contexto da Indústria 4.0

A crescente utilização de ferramentas e conceitos da Indústria 4.0 nos processos industriais trouxe consigo a digitalização e da integração com modelos digitais, nomeadamente o *Digital Twin*. Com esta revolução, a simulação e os *Digital Twins* surgiram como ferramentas essenciais para a representação de processos complexos em sistemas informáticos; de modo a permitir uma análise preditiva para a tomada de decisão de gestores. Diferente das análises estáticas

tradicionais com limitações de cenários propostos, o contexto com a utilização da simulação exigiu a criação de modelos dinâmicos que não apenas repliquem a geometria do ecossistema industrial, mas que interajam com dados operacionais para potencializar a performance e, de modo adicional, melhorar a segurança ocupacional e a resiliência das infraestruturas, em uma gama imensamente maior de cenários que possam ser analisados.

O conceito de *Digital Twin* foi definido como uma réplica virtual do ambiente físico e real, com alta-fidelidade e com recursos que habilitam e mantem conexões com o sistema físico. Segundo García et al. (2024), esta tecnologia permite a simulação de diversos cenários operacionais, sem a necessidade de interromper o processo produtivo ou as atividades; a ser estruturado como um ecossistema de dados de suporte ao processo de tomada de decisão dos gestores.

Na manufatura inteligente (*Smart Manufacturing*), a utilização de modelos baseados em eventos discretos e sistemas interligados do digital para o real possibilitou a contínua e prévia observação de processos industriais de fabrico, com recursos que permitem a identificação de falhas ou riscos, para antecipar reais ocorrências e prejuízos (Stavropoulos & Mourtzis, 2022).

A utilização da simulação, dentro do contexto da Indústria 4.0, também trouxe contributos importantes na forma como os riscos de incêndio e evacuação podem ser geridos. A literatura destacou que a migração do *DT* para a gestão de segurança permitiu criar modelos de evacuação, em ambiente digital, que melhoram a adaptação dos ocupantes, de modo isolado ou em grupos, diante de situações de incêndios em ambientes internos (Tan et al., 2025). Com algoritmos usados para determinar a melhor rota de saída, esta abordagem permitiu que durante as simulações com modelos dinâmicos ocorresse a avaliação do comportamento do fluxo de ocupantes para melhoria da evacuação, quando foi considerado o aumento ou velocidade do fumo e a obstrução de portas de saídas.

A simulação, dentro do contexto da indústria 4.0, foi suportada por tecnologias, como a Internet das Coisas e a Inteligência Artificial. Muito mais do que proporcionar a melhoria em processos de fabrico, as investigações de Zheng et al. (2018) apontaram que o modelo de simulação, com uma arquitetura com orientação a serviços e uso de dados enviados por sensores formam os pontos vitais que sustentam o *Digital Twin*, que agregam o importante contributo de consolidar e tratar dados brutos com o objetivo de construir inteligência a nível operacional para uso de gestores em unidades industriais.

Na esfera da segurança contra incêndio, a conectividade entre o mundo real e o informático garantiu que os parâmetros de entrada dos softwares de simulação recebam informações de condições reais, fornecidas diretamente do chão de fábrica; como carga térmica, nível de fumo e ventilação; com uma precisão técnica superior aos modelos puramente matemáticos (Aheleroff et al., 2021; Shu & Wang, 2023).

Com um foco inicial em melhoria dos projetos de fabrico, o contexto da Indústria 4.0 possui potencial a ser utilizado para explorar outros ambientes e tipologias de edifícios da mais variada gama. Novas direções para os projetos na área de evacuação de edifícios foram propostas para simulações em projetos de evacuação, em edifícios e áreas de grandes aglomerações, com o uso de simulação de eventos discretos e outras ferramentas (Scurati et al., 2025).

Por fim, a utilização das tecnologias de simulação depara-se com os desafios da conectividade, troca eficiente de dados e o processamento de grandes volumes de dados, sendo muitas vezes resumida a interoperabilidade ou capacidade de trocar e processar os dados. A transição para um modelo de segurança inteligente (*Smart Safety*) implica que a simulação computacional já não é apenas uma etapa de projeto, mas uma ferramenta contínua de gestão, onde o *Digital Twin* torna-se o protetor digital da integridade dos trabalhadores e do património (Akter et al., 2026; Stavropoulos & Mourtzis, 2022).

2.2. Os Paradigmas da Simulação

No conjunto das tecnologias, a simulação computacional surgiu mais do que um singelo pilar, mas como o pilar analítico de sustentação dos *Digital Twins*. A escolha de um paradigma de simulação, de um modelo adequado a ser seguido é determinante para a fiel representação do ambiente real no informático digital e representação do comportamento humano (Stavropoulos & Mourtzis, 2022; Zheng et al., 2018).

Embora a aplicação de Gémeos Digitais tenha sido historicamente focada no setor produtivo de fabrico, investigações concluíram que esta tecnologia ultrapassou os limites das áreas de fabrico, a servir diversas áreas dentro do universo industrial; a expandir a utilização dos modelos de *Digital Twin*; inicialmente focados em componentes isolados para estruturas complexas, para permitir a transformação digital de cenários; com a oferta de capacidades de monitorização em tempo real, manutenção inteligente e funcionalidades preditivas que são essenciais para a gestão de ativos e a segurança em edifícios (Aheleroff et al., 2021).

Nesta secção, foram exploradas as três principais abordagens utilizadas para modelar sistemas complexos, nomeadamente a Simulação de Eventos Discretos, a Modelação Baseada em Agentes e a Dinâmica de Sistemas; destacou-se as suas características, sinergias e aplicabilidade na análise de cenários de evacuação de emergência em ambientes industriais e académicos (Chanthakhot & Ransikarbum, 2025; Law, 2014).

2.2.1. Simulação Discreta

A Simulação de Eventos Discretos (SED) ou *Discrete Event Simulation* (DES) foca-se em modelar um sistema como uma sequência lógica de eventos que alteram o estado do sistema em pontos específicos do tempo. Este paradigma, como escolha conceptual correta do modelo, é ideal para processos onde o fluxo é definido por filas e processamento de entidades, sendo a base para a análise de capacidade produtiva e identificação de estrangulamentos em processos (Law, 2014). Com a expansão da Indústria 4.0, a Simulação de Eventos Discretos tornou-se uma peça indispensável para predição quando o assunto são Gémeos Digitais com o sincronismo dos dados operacionais na organização, sequenciação e distribuição das tarefas, recursos ou eventos ao longo do tempo (Forcina et al., 2024; Stavropoulos & Mourtzis, 2022; Zheng et al., 2018).

No entanto, a Simulação de Eventos Discretos diretamente aplicada em cenários de segurança humana apresentou limitações, ao considerar as pessoas simplesmente como unidades de fluxo

contínuo, sem levar em consideração os comportamentos individuais, que podem ser mais complexos. Embora ferramentas de simulação, como o Pathfinder, ofereçam um modo baseado em equações de fluxo alinhados aos conceitos da *Society of Fire Protection Engineers* (SFPE), a literatura moderna sugeriu que modelos discretos devem ser integrados em uma abordagem para capturar a velocidade das mudanças entre o mundo real e o digital de forma completa (Chanthakhot & Ransikarbum, 2025). Assim, a Simulação de Eventos Discretos é frequentemente utilizada para validar a eficiência logística, com destaque a resiliência e adaptabilidade das saídas de emergência (Manes et al., 2023; Tan et al., 2025), enquanto outros modelos trazem a questão da interação humana (Aheleroff et al., 2021; Zheng et al., 2018).

Apesar das limitações comportamentais mencionadas, a Simulação de Eventos Discretos continua a desempenhar um papel importante na análise de evacuações de emergência quando o foco permanece sobre as infraestruturas das edificações. Investigações de (L. Xu et al., 2022; Y. Zhang et al., 2024) demonstram que a lógica de eventos discretos é eficaz para quantificar o tempo de resposta em sistemas de rotas dinâmicas, com a possibilidade da predição do impacto por falhas pontuais, como a obstrução de uma saída, no indicador de tempo total de evacuação (RSET).

Adicionalmente, os estudos de (J.-R. Lin et al., 2025) reforçam que a integração da Simulação de Eventos Discretos com dados provenientes de sensores de posicionamento, permitiu uma simulação mais fiel em relação aos fluxos em ambientes complexos, como o industrial. Esta abordagem transformou a resposta passiva de emergência numa gestão ativa e preditiva da segurança, ao alinhar-se com a necessidade de assegurar a proteção de ocupantes em recintos industriais com a adoção de ações como resultado do uso de modelos validados.

2.2.2. Simulação Baseada em Agentes

A Simulação Baseada em Agentes (SBA) ou *Agent-Based Modeling* (ABM) adota uma perspectiva reconhecida como *bottom-up*; onde a modelação do sistema ocorre a partir de entidades autónomas dotadas de regras de decisão próprias. Numa abordagem preliminar de Helbing (2012), e reforçada por estudo recente de Ferreira et al. (2024), o comportamento global do sistema não pode ser programado diretamente, mas tem início ao formar-se como resultado das interações entre os agentes e o ambiente; de modo a orientar os ciclos de melhoria e os processos de tomada de decisão, independentemente da complexidade do ambiente analisado, em uma busca contínua do cenário mais adequado para cada situação proposta.

Em investigações análogas e integradas a este paradigma, notou-se quão fundamental a Simulação Baseada em Agentes torna-se para o processo de simulação de evacuação. Dentro do contexto da indústria 4.0, a Simulação Baseada em Agentes permitiu a representação das diferenças que podem ser encontradas na população industrial; nomeadamente trabalhadores da empresa, prestadores de serviço e visitantes; a considerar características próprias como diferentes velocidades de deslocamento, tempos de reação, níveis de familiaridade com o *layout*, rotas de fuga e as opções de saídas de emergência (Kasereka et al., 2025; Tang & Ren, 2008).

A Simulação Baseada em Agentes em contextos industriais focou-se a explorar a representação de fenómenos psicológicos e sensoriais, como verificado nas investigações de Ferreira et al. (2024) e García et al. (2024) ao concluir que agentes podem ser programados para reagir à propagação de fumo e calor. Com agentes a demonstrar capacidade de alterar as rotas de saída, de forma dinâmica, pelo uso de algoritmos de aprendizagem por reforço (M. Zhou et al., 2023).

Em estudos com a aplicação de um Gémeo Digital de segurança, a capacidade de mimetizar, imitar de forma minuciosa, a tomada de decisão humana sob stress permitiu prever pontos de estrangulamento, aglomerações e falhas em protocolos de emergência que não poderiam ser facilmente identificados em modelos tradicionais e estáticos (Y. Zhang et al., 2021, 2024). Resultados da aplicação e utilização do *Digital Twin* ajudaram a minimizar os problemas geralmente causados em uma evacuação, onde segundo Zhang et al., (2021) se encontram mais ferimentos e mortes que na própria fonte original do incidente.

2.2.3. Dinâmica de Sistemas

Diferente do foco individual da Simulação Baseada em Agente, a Dinâmica de Sistemas (DS) foca-se em comportamentos coletivos e nas malhas de retroalimentação (*feedback loops*) que tem a função de realizar a interação do sistema. Este paradigma compreende a interação das variáveis do modelo no decorrer do tempo (Sterman, 2002). Na segurança de edifícios com finalidade industrial e na questão de combate de incêndios, a Dinâmica de Sistemas foi aplicada com resultados eficazes, com o intuito de modelar como as equipas de emergência, responsáveis pela evacuação; ou como a cultura de segurança de uma empresa varia diretamente proporcional com a frequência de treinos e investimentos nos equipamentos de segurança que compõe o ecossistema industrial e de segurança (Aheleroff et al., 2021; Sterman, 2002).

Além disso, a Dinâmica de Sistemas foi essencial para analisar atrasos dos agentes, ocupantes e utilizadores do sistema, na perceção de risco e reação frente ao evento. Em um cenário com um sistema de alarme com alto índice de falsos alertas pode ocorrer a existência e crescimento de um ciclo de desconfiança nos ocupantes, com efeito prejudicial que diminui o nível de alerta ao risco e consequentemente aumenta o tempo de pré-movimentação durante uma emergência real. A integração da Dinâmica de Sistemas com Gémeos Digitais permitiu que os gestores a oportunidade de visualizar e analisar o impacto de políticas de segurança a longo prazo, em complemento a visão operacional de curto prazo fornecida pela simulação discreta e por agentes, com o uso dos modelos propostos (Helbing, 2012; Stavropoulos & Mourtzis, 2022).

A aplicação da Dinâmica de Sistemas, na perspetiva ferramenta para planos de emergência, em instalações fabris complexas não foi abordada como um estado estático, mas um equilíbrio de forças crescentes e presentes no ambiente a ser simulado. Modelar por Dinâmica de Sistemas permitiu identificar como a pressão por produtividade e a perceção de segurança competem entre si dentro de uma malha de decisões gerenciais; por exemplo, um aumento súbito na carga de produção pode, inadvertidamente, reduzir a eficácia dos protocolos de manutenção preventiva ou o rigor nos treinamentos de evacuação. Ao mapear essas relações não lineares,

a Dinâmica de Sistemas oferece uma camada de inteligência estratégica que antecipa os problemas das barreiras de segurança antes mesmo que um incidente ocorra (Fan et al., 2024).

Nesse sentido, o comportamento dos ocupantes deixa de ser visto como uma variável isolada e passa a ser entendido como um subproduto do ambiente da organização. Estudos voltados para a resiliência de sistemas complexos reforçam que a eficácia da resposta a emergências, interconectada com a informação compartilhada e à fiabilidade das infraestruturas tecnológicas (Akter et al., 2026; García et al., 2024). Assim, ao integrar a DS no referencial desta tese, estabelece-se que a resiliência do PIM não depende apenas do *layout* físico ou da largura das saídas, mas da robustez das políticas de governança que sustentam o desempenho dos planos de evacuação ao longo de todo o ciclo de vida operacional da empresa.

2.3. A Importância da Evacuação para a Segurança das Pessoas

A proteção e defesa da vida humana em ambientes de trabalho ultrapassa a simplicidade do cumprimento obrigações legais, e constitui-se um pilar que vai além da responsabilidade operacional das empresas e alcança a responsabilidade social das organizações. No cenário industrial, a complexidade dos processos e a presença de riscos exigem que o planejamento da evacuação seja objeto de estudo adequado com características científica e técnica (Hurley et al., 2016; Naser & Corbett, 2022; L. Zhang et al., 2025). Esta secção abordou os fundamentos da segurança da vida, com foco no tempo necessário para a saída em segurança das edificações.

Um plano de emergência, considerado de sucesso, depende, entre outras métricas, da margem de segurança estabelecida entre o Tempo de Evacuação Disponível (*Available Safe Egress Time* - ASET) e o Tempo de Evacuação Seguro Disponível (*Required Safe Egress Time* - RSET), consoante as definições da SFPE. Em unidades industriais, onde o risco de incêndios ou explosões é potencialmente alto, a simulação permitiu antecipar e identificar restrições nas rotas de saída e realizar a validação se os tempos necessários e disponíveis, bem como as distâncias de percurso atendem e estão em conformidade com a regulamentação e apresentam margem segura (Q. Li et al., 2025; B. Xu et al., 2025).

Segundo Liu et al. (2025), a fase de reação, teoricamente calculada entre o tempo decorrido do início do alarme e o tempo de início da saída, demonstrou a tendência de se posicionar como o fator mais crítico para a sobrevivência em eventos de evacuação. Estudos complementares, apresentaram resultados de uma melhor evacuação em ambientes corretamente equipados com sistemas ativos de proteção; como os aspersores (L. Zhang et al., 2025) e as barreiras de fumo (J. Wang et al., 2025; N. Zhang et al., 2022), que não apenas combatem e retardam a propagação do fogo, mas sobretudo criam uma situação de melhoria no estado emocional dos ocupantes durante o período crítico de saída do ambiente (L. Li et al., 2023; J.-R. Lin et al., 2025; H. Wang et al., 2024).

Portanto, a simulação de evacuação integrada no *layout* industrial moderno foi identificada como uma ferramenta técnica indispensável para a diminuir riscos e funcionar como suporte à decisão para empresas que busquem este diferencial em seus processos de segurança humana e patrimonial relacionadas a suas operações. (Grigoras & Ibănescu, 2024; Yi et al., 2024).

2.4. Casos de Estudo

A aplicação prática de modelos de simulação tem sido amplamente documentada na literatura recente, ao fornecer evidências empíricas sobre a eficácia de novas tecnologias de segurança em diversos contextos arquitetônicos. Analisar casos de estudo contemporâneos permitiu identificar lacunas e oportunidades de melhoria que podem ser aplicadas ao contexto industrial específico deste trabalho. A seguir, foram destacados exemplos relevantes de investigações recentes, com contributos e abordagem em relação à escolha da opção de uso do *Digital Twin* com a integração de dados, com a inteligência artificial e com sistemas de monitorização de alta performance.

A necessidade de evolução da questão regulamentar foi abordada por Manes et al. (2023) na avaliação da eficácia dos códigos de segurança contra incêndio em estruturas complexas no Reino Unido. Ao utilizar uma metodologia de análise comparativa de normas técnicas britânicas e modelação de resiliência, o autor identificou lacunas críticas nas abordagens prescritivas. O estudo provou que a simulação de desempenho é a única maneira de garantir a segurança em edifícios modernos, onde as normas estáticas falham ao oferecer uma resposta adaptável e ativa frente a eventos dinâmicos.

A integração de tecnologias de monitorização foi explorada por S. Zhou et al. (2023), num sistema desenvolvido para a evacuação inteligente de edifícios complexos. O objetivo foi utilizar tecnologia de posicionamento para ambientes internos (*indoor*) de alta precisão para guiar os ocupantes em tempo real durante o evento de saída, com o uso da tecnologia Ultra-Wideband (UWB) e interfaces baseadas em *Small Programs* para telemóveis. Os investigadores alcançaram com êxito o objetivo de fornecer orientações personalizadas com erro métrico mínimo. Os resultados mostraram que a abordagem reduziu o tempo de reação e permitiu que as equipas de emergência recebessem em tempo real a localização exata dos ocupantes durante a evacuação, fator de contributo tecnológico e digital para elevar o nível de segurança das instalações.

O trabalho desenvolvido por García et al. (2024), no contexto industrial, com o objetivo de criar um ambiente de aprendizagem com a implementação do *Digital Twin* buscou a integração do conhecimento humano dos trabalhadores com dados recebidos em tempo real dos equipamentos monitorados. Realizado numa unidade de manufatura considerada pelos autores como tradicional, o estudo implementou uma estrutura que interligou o real ao digital por meio de sensores de *IoT* para alimentar a arquitetura do modelo de Gémeo Digital. Os resultados demonstraram que a sincronização aumentou a flexibilidade operacional, e permitiu que o sistema antecipasse falhas. Com a apresentação da proposta para elevar o nível de prontidão do trabalhador diante de problemas e anomalias, fundamentou a importância da integração homem-máquina na segurança no ambiente de indústria 4.0.

A segurança em ambientes com características construtivas específicas também foi alvo de investigação por Yi et al. (2024), no estudo sobre edificações com estruturas históricas de madeira. O objetivo principal do estudo foi realizar uma avaliação de segurança com a simulação de incêndio real para garantir a preservação do património e a proteção dos

ocupantes. Com a ferramenta da simulação numérica, a detalhar o conjunto de carga térmica e propagação de chamas, foi possível quantificar o risco específico devido ao uso específico da madeira nas estruturas do edifício. Os resultados revelaram que uma avaliação baseada na carga de incêndio real, ao invés de valores atribuídos de forma genérica ou aproximada, foi determinante para estabelecer tempos de evacuação seguros.

Em relação aos grandes fluxos populacionais, uma investigação de Q. Li et al. (2025), num grande edifício público foi conduzida com o intuito de realizar uma avaliação de risco detalhada e contribuir nos processos de evacuação. Ao utilizar uma metodologia que combinou métricas de risco com a simulação de trajetórias, o trabalho identificou os pontos fracos e oportunidades de melhoria relativas ao *layout* do edifício. Os resultados obtidos permitiram uma reorganização dos fluxos que resultou em uma diminuição significativa dos tempos de fuga; a confirmar que a gestão estratégica de gargalos é ponto fundamental e importante para a eficiência em locais onde ocorre elevado fluxo de pessoas.

Na esfera de transportes, com grandes fluxos populacionais em infraestruturas uma investigação de Liu et al. (2024), focada na estação de interligação do metro de Shenyang, teve como objetivo do trabalho modelar e simular a evacuação que considerou diversos fatores de orientação que influenciam o comportamento dos passageiros. Ao tomar uso de uma metodologia de simulação dinâmica e análise de cenários de interligação, o estudo obteve resultados que comprovaram que a eficácia da evacuação aumentou quando os sistemas de orientação foram reposicionados de forma a evitar o conflito de fluxos entre diferentes linhas de metro, ao obter métricos do Tempo total de saída menores nas estações maiores e mais complexas em termos de linhas de transporte.

Segundo Liao et al. (2026), foi essencial para o processo de evacuação a verificação do *layout* da edificação, em conjunto com a necessidade de uma reavaliação com uso de ferramentas de simulação; ao permitir a predição dos tempos de evacuação das edificações; aplicadas a edificações antigas adaptadas a novas funcionalidades. Adicionalmente foi possível identificar os desafios e riscos para influenciar a tomada de decisão em relação a estratégia de evacuação, com saídas que evidenciaram todas as alternativas dentro de cada dinâmica de cenário de evacuação proposto.

Com o crescimento populacional e a tendência de maior ocupação dos locais, principalmente em centros de compras, a investigação de Tian et al. (2026), demonstrou a importância do gerenciamento detalhado para uma eficiente evacuação dos ocupantes de edificações. Uma estratégia de evacuação de um centro de compras auxiliada por software de simulação, nomeadamente Pathfinder, pode ser construída e avaliada em diferentes cenários com diferentes, consonante aos focos de fogo ou bloqueio de saídas, e a verificação de pontos críticos com as aglomerações em escadas, corredores e vias de acesso às saídas de emergência.

Para Feng et al. (2026), em estudos combinados com a simulação de evacuação com o software Pathfinder e um simulador de fumo, os resultados demonstraram a eficiência do uso da simulação para melhorar o resultado da evacuação, para prever cenários críticos em edificações de infraestrutura de transporte, nomeadamente estações de metro. Os resultados foram

obtidos ao propor uma eficiente ferramenta para tomada de decisões, mesmo em cenários considerados de alta complexidade e com multiobjectivos dos eventos de evacuação.

A publicação de Akter et al. (2026), realizou uma abordagem no aspeto de que incêndios em edifícios podem representar ameaças significativas à vida, à propriedade e ao meio ambiente. E com potencial aumento de risco em locais de *layout*, estruturas complexas ou com alta taxa de rotatividade dos ocupantes. O estudo revelou as vantagens que o uso de uma estratégia de evacuação específica para o contexto de países em desenvolvimento com o uso de informações da estrutura do edifício, ferramentas de simulação e avaliação dos atrasos da eficácia de cada rota de saída, trazem de contributo para minimizar os riscos aos ocupantes, edificações e meio ambiente.

No artigo de Y. Jiang et al. (2025), os estudos da evacuação em um centro comercial surgiram como desafios na gestão de segurança em função de seus *layouts* complexos, alta densidade populacional e características de ocupação variadas. Encontrar estratégias que não coloquem de lado a questão do comportamento humano para minimizar o número de vítimas e as perdas patrimoniais foram encontradas a partir de modelos que tinham como objetivo a melhoria a evacuação, com uso de uma plataforma digital para simulação do evento.

Neste Artigo, G. Liu et al. (2025), propôs auxiliar o desafio de gestores e equipes de respostas a emergências em direção a resolver o problema de evacuação em edifícios complexos. Com o uso de redes neuronal profundas (*Deep Neural Networks* – DNN), foi possível identificar doze fatores chave que foram utilizados para o treino do modelo e para gerar dados de entrada para simuladores, como o Pathfinder, com resultados na diminuição da dimensão do desafio, com a melhoria progressiva do desempenho da evacuação e da avaliação de riscos.

O estudo de Borralho et al. (2025), realizado no metro de Lisboa, abordou a preocupação de um edifício ter condições para garantir uma evacuação rápida e segura. Como ferramenta de simulação numérica foram utilizados softwares específicos, entre eles o Pathfinder, para a análise da evacuação. O estudo trouxe entre as conclusões que a inexistência de um sistema de controlo de fumo, a demora em seu acionamento, ou as restrições causadas pelas estruturas arquitetónicas trazem tempos adicionais que influenciam diretamente no aumento dos resultados de tempo de evacuação.

Com o intuito de sintetizar as evidências empíricas discutidas e facilitar a análise comparativa entre as diversas abordagens tecnológicas e metodológicas, apresenta-se a Tabela 1. Esta compilação organizou o estado da arte da segurança contra incêndio, categorizou-se investigações que variam desde a superação de lacunas nos quadros normativos tradicionais até à implementação de ecossistemas digitais de monitorização em tempo real. A estruturação destes dados permite visualizar como a integração entre o ambiente físico e o virtual, uma das características centrais da Indústria 4.0, redefine os parâmetros de proteção à vida em infraestruturas complexas.

Tabela 1 - Resumo de Publicações por Foco Temático

Autor (Ano)	Foco Temático	Local	Ferramentas	Conclusões
García et al. (2024)	Digital Twin / Indústria	Espanha	IoT, Sensores, Digital Twin	A integração de dados das máquinas com o comportamento humano aumenta a resiliência e a prontidão ante anomalias.
Liao et al. (2026)	Digital Twin / Indústria	China	3D Gaussian Splatting, Pathfinder	A reconstrução 3D de alta fidelidade é essencial para prever tempos de evacuação em edifícios adaptados.
Akter et al. (2026)	Simulação Baseada em Agentes	Bangladesh	BIM, Pathfinder	Propõe estratégias específicas para países em desenvolvimento, avaliando atrasos reais em rotas complexas.
Feng et al. (2026)	Simulação Baseada em Agentes	China	Pathfinder, Simulador de Fumo	Simulações multiobjetivo em metros otimizam a tomada de decisão em cenários críticos de incêndio.
Y. Jiang et al. (2025)	Simulação Baseada em Agentes	China	Plataformas Digitais	A simulação deve considerar o comportamento humano para minimizar perdas patrimoniais em layouts complexos.
G. Liu et al. (2025)	Simulação Baseada em Agentes	China	Redes Neurais, Pathfinder	O uso de IA para treinar modelos de simulação melhora significativamente a avaliação de riscos.
Borralho et al. (2025)	Evacuação	Portugal	Pathfinder, FDS	A falha no controle de fumo ou barreiras arquitetônicas são os principais detratadores do tempo de evacuação.
Tian et al. (2026)	Evacuação	China	Pathfinder	O bloqueio de saídas e a gestão de aglomerações em escadas são os pontos críticos em centros comerciais.
Q. Li et al. (2025)	Evacuação	China	Otimização de Trajetórias	A gestão estratégica de gargalos em grandes edifícios públicos reduz drasticamente o tempo de fuga.
Liu et al. (2024)	Evacuação	China	Simulação Dinâmica	A sinalização e o posicionamento de saídas devem evitar conflitos de fluxos para otimizar a saída.
Yi et al. (2024)	Evacuação	China	Simulação Numérica	Em estruturas de madeira, a carga de incêndio real (e não genérica) deve ditar o tempo de evacuação.
S. Zhou et al. (2023)	Evacuação / Tecnologias	China	UWB, Small Programs	A tecnologia Ultra-Wideband (UWB) permite guia personalizado e localização exata das pessoas.
Manes et al. (2023)	Legislação	Reino Unido	Análise Normativa	As normas prescritivas falham em edifícios modernos; a simulação de desempenho é a única via resiliente.
Uliana et al. (2022)	Legislação / Evacuação	Brasil	Pathfinder, Pyrosim	Comprova a superioridade do modelo de desempenho sobre as normas brasileiras atuais.
Hennemann et al. (2022)	Legislação	Brasil	Análise de Decretos	Saídas fora dos padrões normativos são a principal causa do aumento de vítimas em incêndios.

A análise comparativa dos estudos, avaliados neste capítulo e apresentados na Tabela 1, revelou uma convergência para a utilização de ferramentas de simulação de alto desempenho como suporte crítico à tomada de decisão. Observa-se que, enquanto as investigações de Manes et al. (2023); Yi et al. (2024) direcionaram-se na precisão do cálculo e na superação de normas prescritivas rígidas, os trabalhos mais recentes, como os de Liao et al. (2026) e Tan et al. (2025) apontaram para o futuro da segurança industrial, nomeadamente para a simulação baseada em *Digital Twins* e Inteligência Artificial.

A sinergia entre o comportamento humano modelado por agentes e a monitorização precisa, discutida por G. Liu et al. (2025) e M. Zhou et al. (2023), validam as metodologias destes trabalhos. Ficou demonstrado que a uma melhor fluidez, ao se analisar os fluxos dos ocupantes, e a integração de dados não são apenas melhorias incrementais, mas os pilares fundamentais para a redução drástica do tempo de resposta em cenários de emergência complexos e dinâmicos, como o industrial.

2.5. Legislação

No Brasil a regulamentação é composta por um sistema híbrido, que combina Leis, Decretos e Instruções Técnicas (IT's), que formam a legislação de segurança contra incêndio e pânico em

edificações, que cobre o contexto de edificações industriais. A Tabela 2, com foco no estado do Amazonas, foi elaborada de modo a demonstrar a estrutura que rege o assunto de evacuação no campo legal. A estrutura principal, que norteou as demais leis e decretos foi a Lei Federal 13.425/2017 (República Federativa do Brasil, 2017), conhecida como Lei Kiss, aprovada como consequência do incêndio em uma casa de shows, de nome análogo à lei, que vitimou de forma fatal 242 pessoas na cidade de Santa Maria/RS (Chagas, 2023). Na abrangência nacional foram estabelecidas diretrizes gerais sobre medidas de prevenção e combate a incêndio em estabelecimentos de reunião de público e indústrias. O fato da lei ser decorrência de um fenômeno ocorrido, tem embasamento histórico no Brasil para a criação de legislação, normativas e decretos, com a delegação ao Corpo de Bombeiros do respectivo estado como responsável pela fiscalização e autorizações relativas ao assunto de segurança e prevenção contra incêndios (Uliana et al., 2022).

Tabela 2 - Conjunto de Leis de Segurança contra Incêndio no Estado do Amazonas

Tipo	Legislação	Descrição
Constituição Estadual	-	Constituição Estadual - Amazonas (05/10/1989)
Lei Estadual	2812/2003	Institui o Sistema de Segurança contra Incêndio e Pânico em Edificações e Áreas de Risco e dá outras providências.
Lei Estadual	6032/2022	Altera, na forma da lei que especifica, o § 7º. do artigo 2º da Lei n.º 2.812 de 17 de julho de 2003, que INSTITUI o SISTEMA de SEGURANÇA contra incêndio e Pânico m Edificações e Áreas de Riscos, e dá outras providências.
Lei Nacional	13425/2017	Estabelece diretrizes gerais sobre medidas de prevenção e combate a incêndio e a desastres em estabelecimentos, edificações e áreas de reunião de público; altera as Leis nºs 8.078, de 11 de setembro de 1990, e 10.406, de 10 de janeiro de 2002 – Código Civil; e dá outras providências.
Lei Delegada	89/2007	Dispõe sobre o Corpo de Bombeiros Militar do Amazonas- CBMAM, definindo suas finalidades, competências e estrutura organizacional, fixado o seu quadro de cargos comissionados e estabelecendo outras providências.
Decreto	24054/2004	Regulamento do Sistema de Segurança contra Incêndio e Pânico em Edificações e Áreas de Risco.
Decreto	46366/2022	ALTERA, na forma que especifica, o Regulamento do Sistema de Segurança contra Incêndio e Pânico em Edificações e Áreas de Risco
Instrução Técnica	IT 's	Instruções Técnicas do Corpo de Bombeiros Militar do Estado do Amazonas

A Tabela 2, demonstrou o conjunto de Leis Estaduais e Delegadas, o conjunto com Instruções Técnicas do Corpo de Bombeiros Militar do Estado do Amazonas (CBMAM) que totalizam e formam a estrutura regulamentar do local de instalação da empresa no Brasil. A segurança contra incêndio e pânico no Estado do Amazonas é ajustada pelo conjunto regulamentar estadual que tem como ponto central o Decreto 24.054/2004 (Estado do Amazonas, 2004), modificado pelo Decreto 46.366/2022 (Estado do Amazonas, 2022).

O tema tratado pelas Instruções Técnicas quanto à evacuação rápida e segura está direta e fortemente relacionada com a capacidade nos pontos de saídas (Ternero et al., 2023). A existência de pontos denominados gargalos nestas saídas podem causar congestionamentos e aglomerações em áreas e corredores de acesso às saídas (Cui et al., 2023). Em relação a simulação e seus resultados, investigações demonstram que as saídas de emergência são informações de entrada importantes para os algoritmos dos softwares de simulação (Y. Wang et al., 2024), em primeiro lugar para a indicação do resultado da escolha da saída (A. Jiang et al., 2022), e em sistemas informáticos mais elaborados tornam-se peça fundamental para o redirecionamento dos ocupantes para outras saídas que favoreçam a rápida evacuação da edificação (J. Li et al., 2023). Estudos revelam que a indisponibilidade ou bloqueio de uma

determinada saída de emergência impacta diretamente o tempo de evacuação (Xiong et al., 2022), e que uma saída de emergência fora dos padrões normativos e esperados pode elevar o número de vítimas (Hennemann et al., 2022) do processo de evacuação de emergência.

Dentre as Instruções Técnicas disponíveis, a IT-11 (CBMAM, 2019) destacou-se, com valor significativo, entre as demais por tratar da especificação das saídas de emergência, amplamente identificada na comunidade científica como um dos pontos críticos durante o processo de evacuação. Estudos avaliaram que uma evacuação eficiente pode ser alcançada com realocação de saídas de emergência (Y. Lin & Zhou, 2024; Wan et al., 2025); e que a posição adequada de uma saída pode proporcionar 75.63% de melhoria no processo (J. Liu et al., 2024). Evidenciou-se que o aumento da largura das portas traz uma melhora significativa ao fluxo de saída (Fan et al., 2024). Na análise de fatores crítico no processo de evacuação de emergência, a porta de saída foi listada em relação ao comportamento dos ocupantes no momento da escolha da rota de saída (Shen et al., 2024), e que a escolha da saída está diretamente relacionada com o número de fatalidades (Ahn et al., 2022).

2.6. Análise Bibliométrica

Com o objetivo de verificar o número de publicações e obter informações globais sobre o campo investigado, foi realizada uma pesquisa no banco de dados bibliográfico da Scopus, utilizando-se os seguintes critérios na pesquisa:

Data da Pesquisa: 30 de janeiro de 2026

Período: 2018 a 2025

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

Combinação de Palavras: "Simulation, Building, Fire, Evacuation"

Idioma: "English, Portuguese"

Tipos de Documento: "Article, Conference Paper, Book Chapter"

Fórmula da Pesquisa: *TITLE-ABS-KEY (Simulation AND Building AND Fire AND Evacuation) AND PUBYEAR > 2017 AND PUBYEAR < 2026 AND (LIMIT-TO (DOCTYPE , "ar") OR LIMIT-TO (DOCTYPE , "cp") OR LIMIT-TO (DOCTYPE , "ch")) AND (LIMIT-TO (LANGUAGE , "English") OR LIMIT-TO (LANGUAGE , "Portuguese"))*

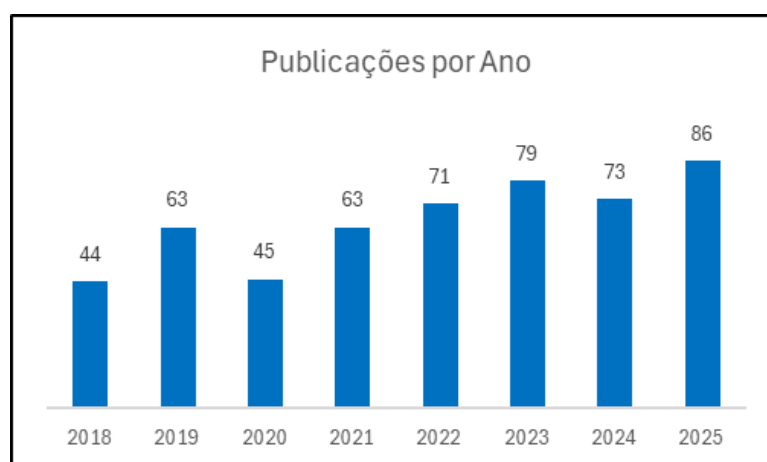


Figura 1 – Pesquisa Bibliográfica – Publicações por Ano (Scopus)

A análise da base Scopus (ver Figura 1) dentro do período compreendido entre 2018 e 2025 para os tipos de documentos, combinação de palavras e línguas definidos na fórmula de pesquisa, identificou 524 publicações. O número de publicações por ano apresentou uma tendência de crescimento, com o máximo valor de 86 publicações no ano de 2025. O ano de 2020, de modo mais acentuado, e o ano de 2024, de modo mais brando, demonstraram quedas no número de publicações em relação à comparação ao ano imediatamente anterior, mas com retomada de crescimento a partir do ano seguinte.

Na Figura 2, representou-se o contributo de cada país para o número de documentos publicados, com a expressiva participação da China.

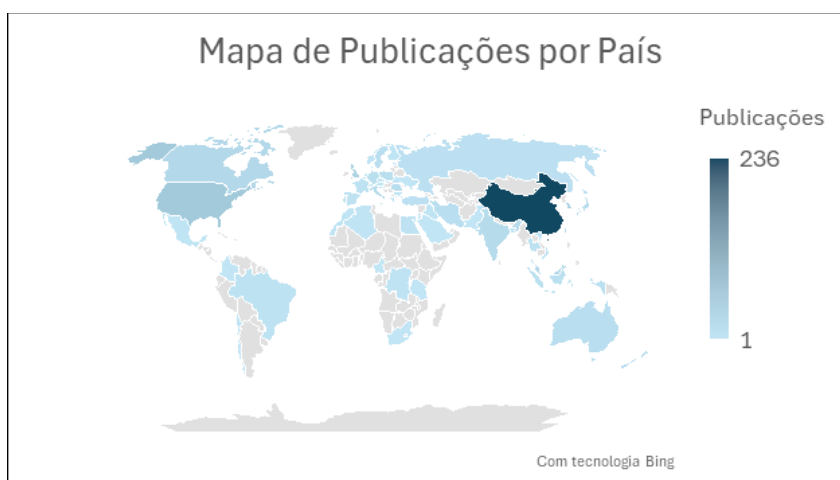


Figura 2 – Mapa da Distribuição do Número de Publicações por País

Com a utilização de um mapa temático, consolidou-se a distribuição das publicações entre 65 países de modo a demonstrar o contributo global em relação ao campo de estudo de evacuação de emergência. O gráfico (ver Figura 3) detalhou a quantidade de publicações para os países com maior número de publicações, sendo adicionado o Brasil para efeito de análise dentro do contexto deste trabalho.

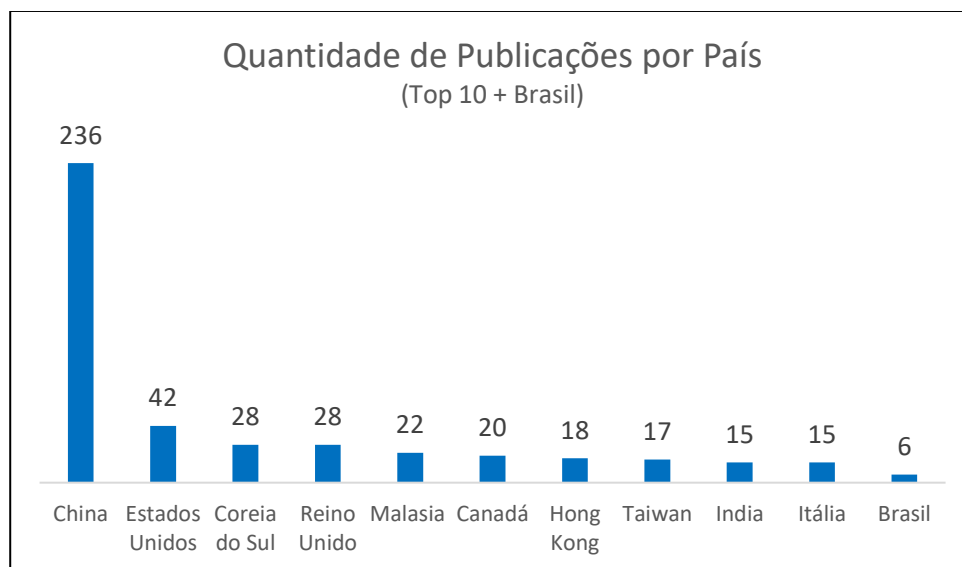


Figura 3 - Quantidade de Publicações por País

Em termos quantitativos a representação da China atingiu 236 publicações, representando 45.04% do total de publicações, os Estados Unidos posicionaram-se em segundo lugar com 42 e Coreia do Sul juntamente com o Reino Unido, a compor o Top 3, com 28 contributos por país. Destacou-se o Brasil com 6 artigos dentre os selecionados durante a pesquisa na base de dados desta análise bibliométrica para a composição adicional ao ranking de 10 países. Inserir o Brasil na análise, teve como principal objetivo verificar a participação para compor a justificativa deste trabalho de investigação relativa ao campo de estudo de evacuação de emergência. A distribuição por tipo de documento foi demonstrada na Figura 4.

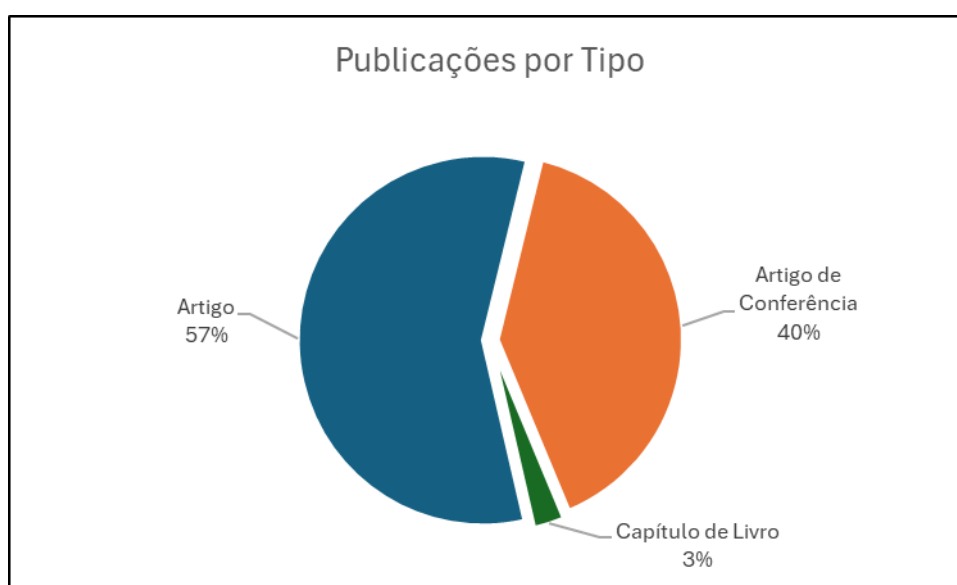


Figura 4 – Percentual de Publicações por Tipo

O percentual de cada tipo de documento encontrado na pesquisa demonstrou que dos 524 documentos, 57% são artigos, 40% são artigos de conferência e 3% são referentes a capítulos de livros.

Uma análise mais detalhada do acervo bibliográfico resultou em 119 publicações com as suas respectivas aplicações. Foi observada uma distribuição heterogênea (ver Tabela 3) quanto ao foco das tipologias de edificação estudadas pela comunidade científica.

Tabela 3 - Quantidade de Artigos por Foco/Tipologia do Edifício

Tipologia do Edifício / Local	Qtd. Artigos	% Amostra	Aplicação na Literatura
Ambientes de Ensino (Escolas e Universidades)	39	32,77%	Simulação de rotas em dormitórios e salas de aula.
Infraestruturas de Transporte (Metros e Aeroportos)	26	21,85%	Fluxos de massa em estações de interligação.
Indústrias e Depósitos (Manufatura)	18	15,13%	Layouts dinâmicos e riscos químicos/técnicos.
Centros Comerciais e Lazer (Shopping Centers e Teatros)	15	12,61%	Comportamento de multidões e bloqueio de saídas.
Saúde (Hospitais e Clínicas)	12	10,08%	Evacuação de pacientes com mobilidade reduzida.
Edifícios Históricos e Outros	9	7,56%	Preservação patrimonial e estruturas de madeira.
Total	119	100,00%	-

Os resultados da pesquisa e a análise da amostra revelaram uma predominância acentuada de investigações voltadas para ambientes públicos e de infraestrutura coletiva, em contraste com a aplicação no setor produtivo. Embora as tecnologias impulsionadas pela Indústria 4.0 encontrem na manufatura o seu campo natural de origem, verifica-se que 84.87% das publicações sobre simulação de evacuação focam em tipologias não industriais. Esta distribuição permite consolidar pontos fundamentais para auxiliar no enquadramento deste trabalho.

Aproximadamente 54.62% das publicações concentram-se em Ambientes de Ensino e Infraestruturas de Transporte, nomeadamente com 32.77% e 21.84%. O segmento de Indústrias e Armazéns, embora represente apenas 15.13% da amostra, concentra as investigações tecnologicamente mais avançadas. Contudo, a análise de estudos de García et al. (2024) e Stavropoulos & Mourtzis (2022) indicam que o maior foco dos estudos voltados a área industrial ainda prima por um olhar direcionado a eficiência produtiva. Surgiu uma lacuna crítica na área de objeto de contributo deste trabalho na integração do *Digital Twin* com a segurança humana, a dinâmica de incêndios e ambientes simulados.

A disparidade entre a aplicação de simulação em hospitais e centros comerciais em relação às indústrias evidenciou uma carência de estudos que utilizem ferramentas de simulação de alto desempenho em ambientes de manufatura (Fan et al., 2024) . Ao convergir para o contexto brasileiro, e especificamente para o Polo Industrial de Manaus, esta carência foi ainda mais destoante, com a demonstração da carência de modelos que validem a eficácia de planos de evacuação dinâmicos frente a riscos que uma evacuação de emergência possa proporcionar.

Adicionalmente, nota-se que a natureza estática dos planos de evacuação tradicionais no setor industrial tem um contraste com a dinâmica operacional das fábricas modernas, onde a disposição de equipamentos e estoques é frequentemente alterada. Enquanto os estudos de casos em escolas e hospitais lidam com variáveis comportamentais de pânico e vulnerabilidade física, o ambiente de manufatura impõe o desafio de ocupantes treinados, em alguns casos com condições de visibilidade reduzida e obstruções físicas variáveis (Y. Zhang et al., 2021). A área fabril tende a limitar-se a função de conformidade regulatória sem integrar, dentro do contexto da indústria 4.0 e com ferramentas já testadas de eficiência em simulação, o processo de evacuação de uma empresa.

O conceito de simulação em ambientes fabris depende de um mapeamento mais rigoroso das interações entre a arquitetura industrial e os processos de tomada de decisão dos ocupantes e dos gestores. A integração de dados de posicionamento em tempo real e a modelagem de agentes baseada em regras de decisão específicas para os ocupantes, que possuem familiaridade com o *layout*, mas enfrentam riscos de natureza química e térmica, representa um avanço metodológico ainda pouco explorado (H. Wang et al., 2024). Portanto, a investigação proposta não se limitou a replicar modelos existentes, mas utilizou as variáveis de simulação para o ecossistema fabril, onde a eficiência da evacuação está intrinsecamente ligada à resiliência da infraestrutura industrial frente a incidentes dinâmicos.

A pesquisa na base de dados Scopus reforçou o carácter inédito e a originalidade desta investigação. Ao focar numa unidade industrial no Amazonas, este trabalho não apenas contribuiu para o corpo de conhecimento sobre ambientes complexos, mas preencheu uma lacuna técnica ao aplicar conceitos de *segurança* num setor que, apesar do elevado risco patrimonial e humano, tem sido menos explorado pela literatura do que o conjunto complementar de edifícios voltados a outras finalidades.

3. Métodos e Aplicação

Neste capítulo, foi inicialmente abordada e explorada a estrutura da edificação onde a empresa realiza suas operações, detalhando em sua planta baixa o ponto de acesso principal da empresa pela portaria, o pátio de acesso aos pavimentos da edificação, as rampas, os lanços de escadas e os pavimentos que em conjunto formam a zona administrativa, de apoio e a de produção. Em etapas seguintes, temos a apresentação da ferramenta de simulação, Pathfinder (ver Figura 5) e sua aplicação para o desenvolvimento de cenários.



Figura 5 - Informações do Software Pathfinder

O simulador Pathfinder, desenvolvido pela empresa Thunderhead Engineering Consultants, foi escolhido como software de interface gráfica para as etapas de criação, parametrização e validação do modelo digital virtual; com os resultados utilizados neste trabalho para a exploração e compreensão de como funciona no mundo real. Para a instalação do simulador e apresentação dos resultados foi utilizado um computador portátil, equipado com processador Intel® Core™ i7-8665U-CPU (1.90 GHz), 16 GBytes de memória RAM, Placa gráfica Intel® UHD Graphics 620 (128 MBytes) e sistema operacional Windows 11 Pro (25H2).

3.1. Estrutura da Edificação

Com a unidade fabril localizada no Polo Industrial de Manaus (PIM), a empresa foco deste trabalho está instalada numa área aproximada de 6500 m², destacada na Figura 6, na zona industrial da capital do estado do Amazonas, integrando a região norte do Brasil.



Figura 6 - Vista Aérea da Unidade Industrial
Fonte: Google Maps

A zona total da empresa comporta um pavilhão industrial com zonas de pavimentos de produção, pavimentos de armazenagem e pavimentos específicos para escritórios com aproximadamente 4600 m². A parte frontal da empresa é voltada para a via pública de acesso e a entrada na empresa é controlada por uma portaria de vigilância.

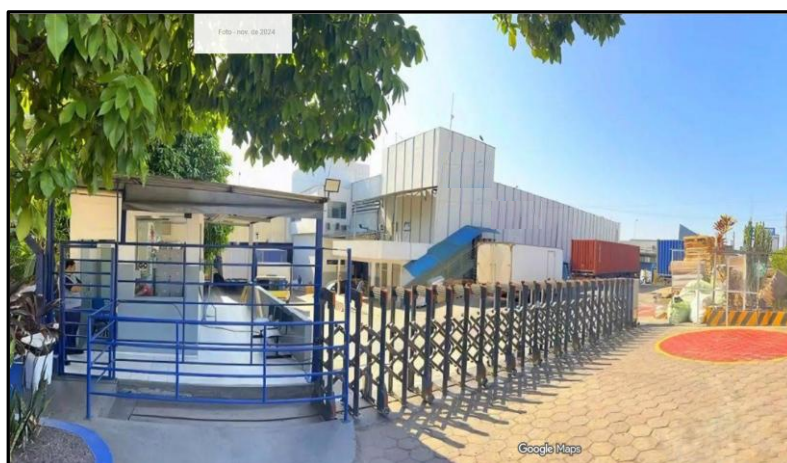


Figura 7 - Vista da Entrada Principal da Unidade Industrial
Fonte: Google Maps

Para o controle de acesso utiliza-se uma passagem para peões e outra, normalmente fechada, para a entrada de caminhões (ver Figura 7). Em relação ao pavilhão industrial a empresa está dividida em três pavimentos. Com uma característica, diferenciada dos demais, por possuir diferentes cotas altimétricas dentro do mesmo pavimento, o pavimento 01 em seu nível 0 foi considerado como nível de referência para as demais cotas utilizadas neste trabalho.

3.1.1. Pavimento 01

O pavimento 1, demonstrado na Figura 8, apresenta-se como o mais complexo, sendo composto por balneários, instalações sanitárias, zona de Refeitório, escritórios de apoio à Produção, oficinas de Manutenção, sala de testes para Controlo de Qualidade, zona de Produção, zonas de equipamentos auxiliares e armazém.

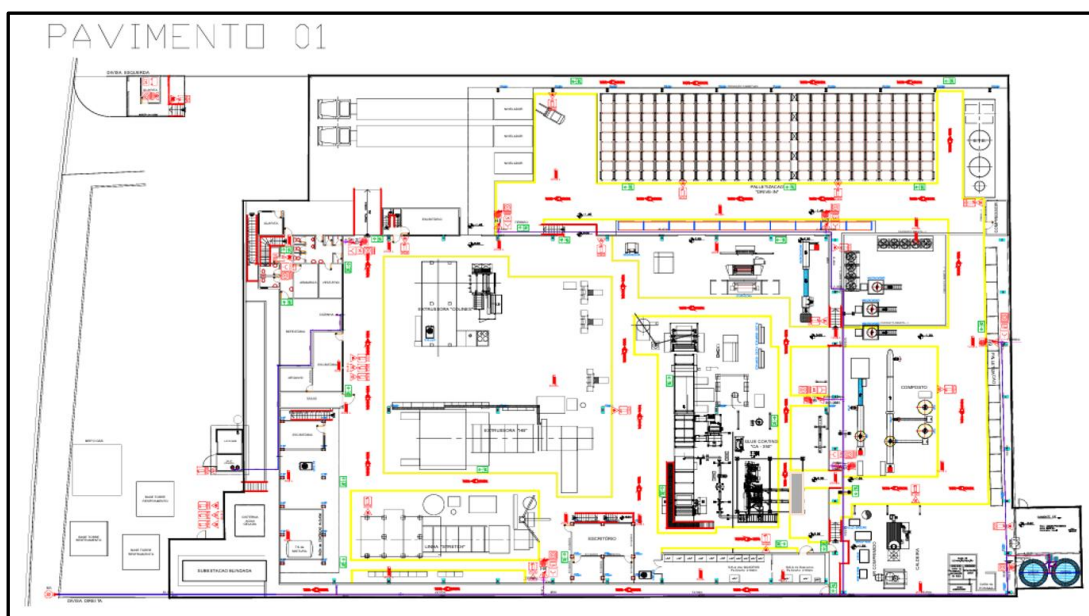


Figura 8 - Planta da Empresa - Pavimento 01

O pavimento 01 apresenta zonas com diferencial na cota de altura do piso de referência (piso zero), que necessitam de acesso por rampas ou escadas. Nas plantas analisadas foram verificados outros três níveis, em relação ao nível 0, conforme as indicações, descritas na Figura 9 nos respetivos ficheiros digitais da estrutura da empresa.

 0.00	 -1.40
 -1.55	 -0.62

Figura 9 - Indicação da Cota de Altura do Piso/Pavimento

Cada nível de piso possui conexões com o nível 0 por meio de lanços de escadas ou rampas indicadas nos desenhos das plantas e verificados presencialmente na unidade fabril. A Figura 10 demonstra a zona de saída do pavilhão com detalhes da rampa de acesso, do nível 0 ao nível de estacionamento de caminhões com cota de -1.40 metros e a localização da zona dentro da malha de navegação do modelo de simulação.

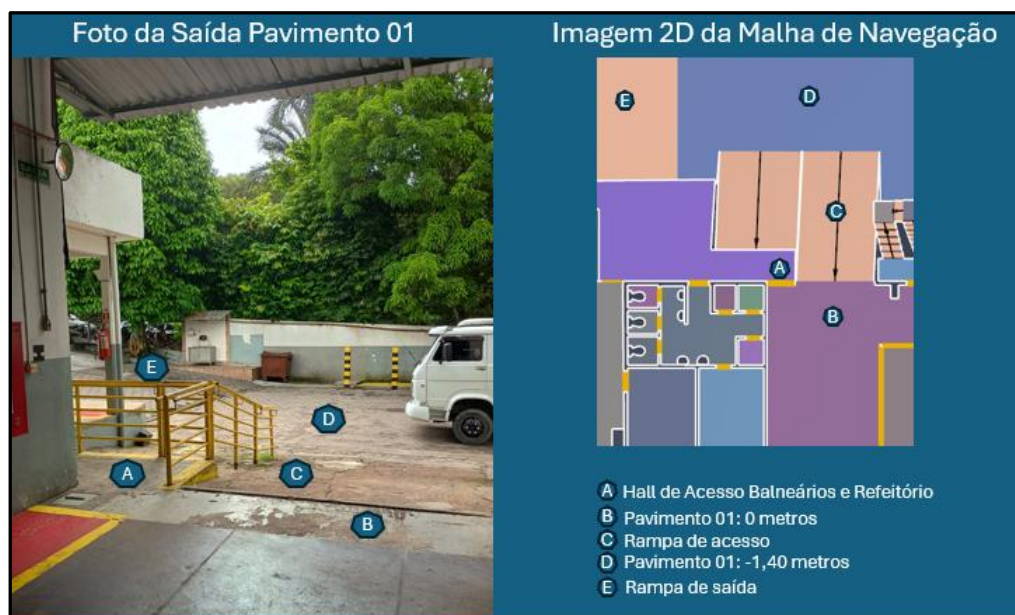


Figura 10 - Rampa de Acesso entre Nível 0 e Nível -1.40 m

Na mesma zona e próximo a rampa de acesso (C) foi possível identificar a passagem (A) para o corredor de acesso aos banheiros e ao refeitório da empresa. Os dois níveis do pavimento 01, sendo a cota 0 metros (B), e a cota -1.40 metros (D) conectam-se pela rampa (C). A rampa de saída (E), direciona para os pontos de encontro e saídas da empresa. Alternativamente as rampas de acessos, foi possível encontrar lanços de escada, como o exemplificado na Figura 11, interligando e permitindo a passagem de peões de um nível para outro.

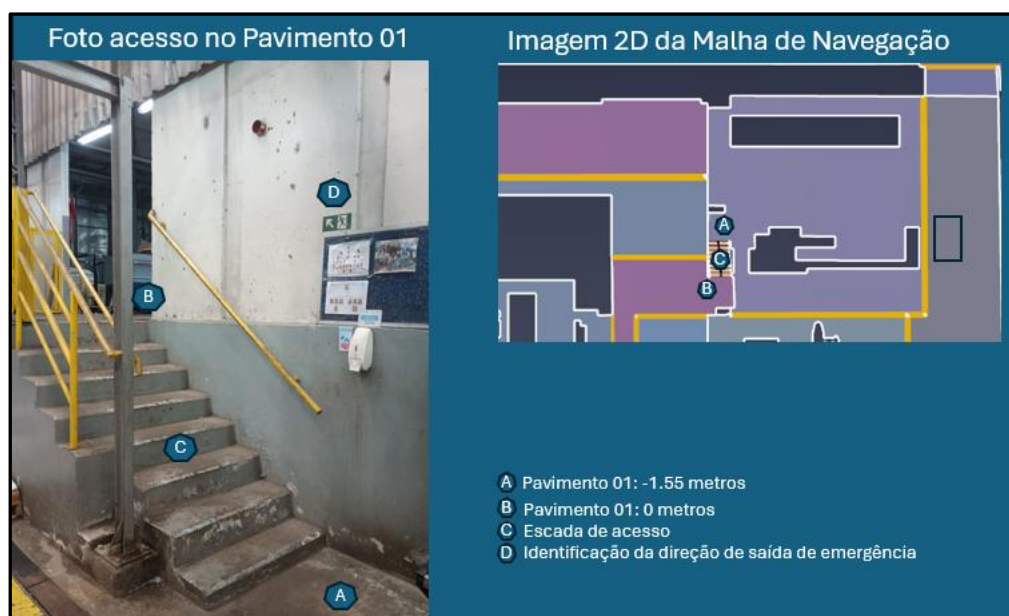


Figura 11 - Lanço de Escada entre Níveis do Pavimento 01

O lanço de escada (C) permite que os ocupantes tenham acesso entre a zona de produção no nível -1.55 metros (A) e o nível de referência 0 metros (B) do pavimento 01. Nota-se, em posições estratégicas da empresa, placas (D) de identificação e orientação colaborativas, sinalizando e indicando as rotas de saída de emergência.

3.1.2. Pavimento 02

O pavimento 02 (ver Figura 12) na cota de 3 metros de altura em relação ao piso de referência, encontra-se constituído de quatro partes independentes e não interligadas. A primeira e maior parte consiste em uma zona (1) como escritórios, sala de controlo de qualidade, zona de treinamento e instalações sanitárias. Uma segunda zona (2) caracterizada por atividades de produção, nomeado como mezanino de produção. A terceira parte (3) apresenta amplo escritório de uso do departamento de Logística, com acesso por lanços de escadas a partir do pavimento 01. A quarta parte (4) consiste em uma zona de armazém para partes e peças de manutenção, com acesso por lanços de escada a partir do nível de referência.

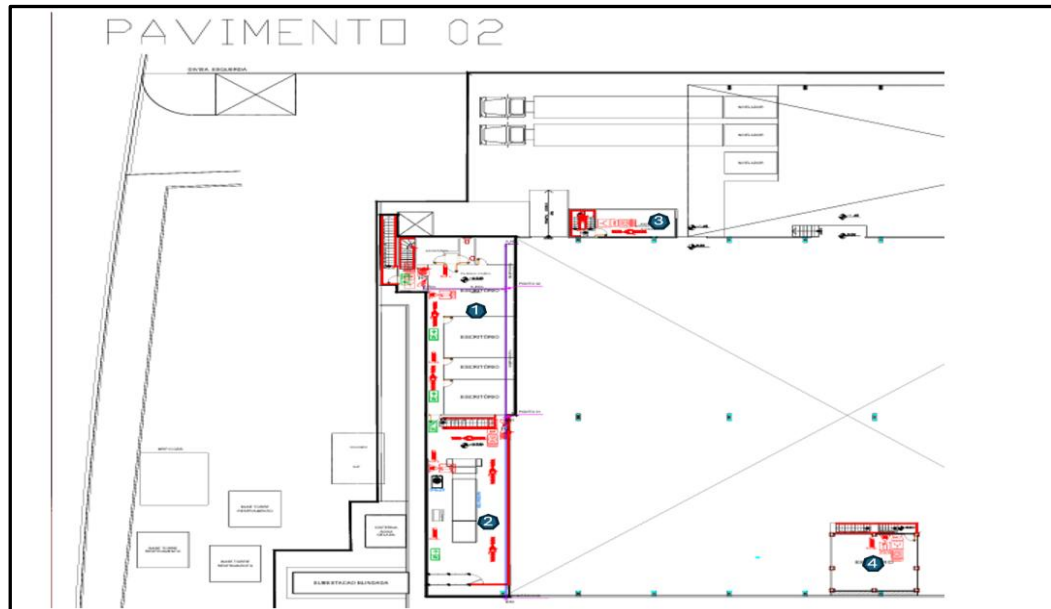


Figura 12- Planta da Empresa - Pavimento 02

O departamento de Manutenção possui zonas em dois pavimentos, dentro do pavilhão fabril, composta por salas de escritórios e oficina no nível de referência, e zona de armazém de peças de reposição no pavimento 02. A zona de Produção deste pavimento, localizada no *mezanino*, possui dois acessos; o primeiro por meio de corredor que conecta todos os escritórios, a partir do topo do lance de escada com origem no pátio frontal; e o segundo acesso a zona de produção por meio de lance de escada diretamente conectado do pavimento 01 (ver Figura 13).

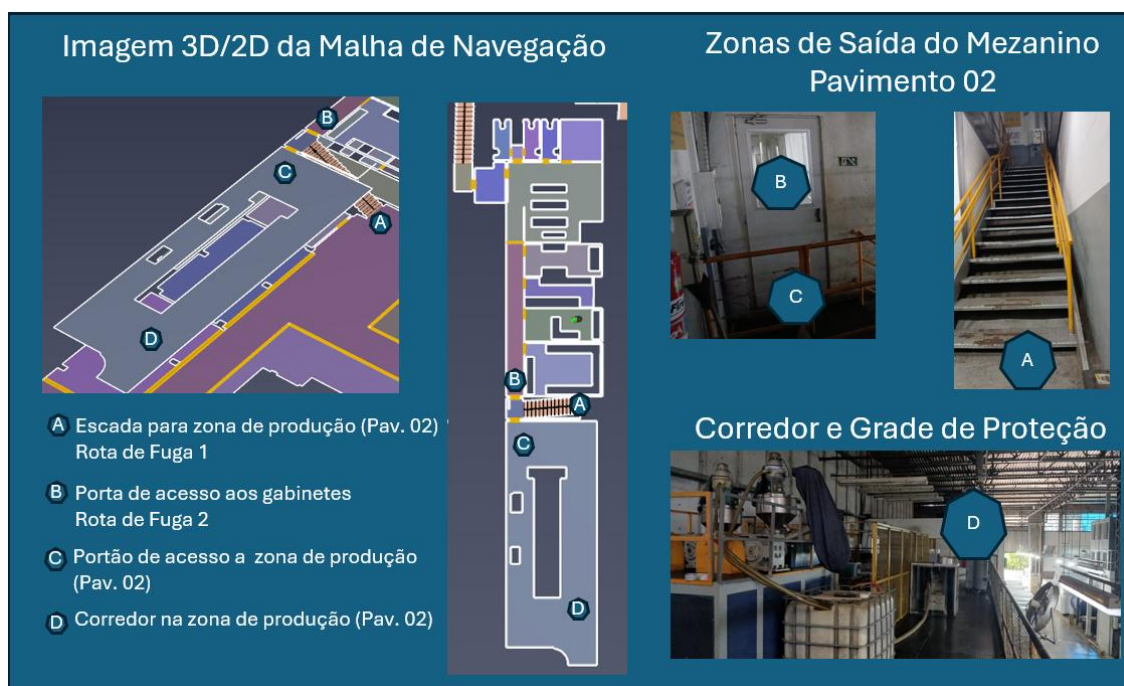


Figura 13 - Mezanino - Pavimento 02

A Figura 13, demonstrou a zona de produção localizada no pavimento 02, com a visualização 3D/2D da malha de navegação e imagens que ilustram as condições e as rotas de descarga. A zona em destaque possui duas rotas de saída, a primeira pelo lanço de escada (A), e a segunda por meio da porta de acesso (B) ao corredor dos escritórios. A zona de produção, no pavimento 02, delimita-se por um portão de passagem (C) que fica normalmente fechado, por duas paredes e por uma grade de proteção, grade paralela ao corredor (D) que permite visualização de grande parte do pavimento 01; incluindo a visualização da rampa de saída do pavilhão.

Para o departamento de Manutenção, a empresa disponibilizou uma zona ocupada em dois pavimentos. O primeiro constituído por oficina de reparos, divisões para escritório de planejamento e controle das atividades, e um segundo pavimento para armazenagem de peças de reposição, demonstrado na Figura 14.



Figura 14 - Departamento de Manutenção

A zona do departamento de Manutenção, dividida em 3 compartimentos no pavimento 01, destina-se à oficina (A) de reparação e preparação de intervenções de manutenção; a duas zonas de escritórios de suporte ao departamento de Manutenção (F). O Armazém (C), tem como função principal a guarda e preservação de peças de substituição para os equipamentos, e possui seu acesso direto por meio da zona de produção com o uso de lanços de escadas (B). A zona projetada (E) pelo lanço de escada sobre o piso do pavimento 01, configura-se como zona de acondicionamento e estacionamento dos pequenos carros de ferramentas utilizados nos atendimentos às necessidades de intervenção em máquinas e equipamentos.

3.1.3. Pavimento 03

O último pavimento, na cota de 6 metros de altura, integra exclusivamente uma zona reservada à Diretoria da empresa com escritório e instalação sanitária. O acesso único é realizado através da zona de produção, por meio de lanços de escadas.

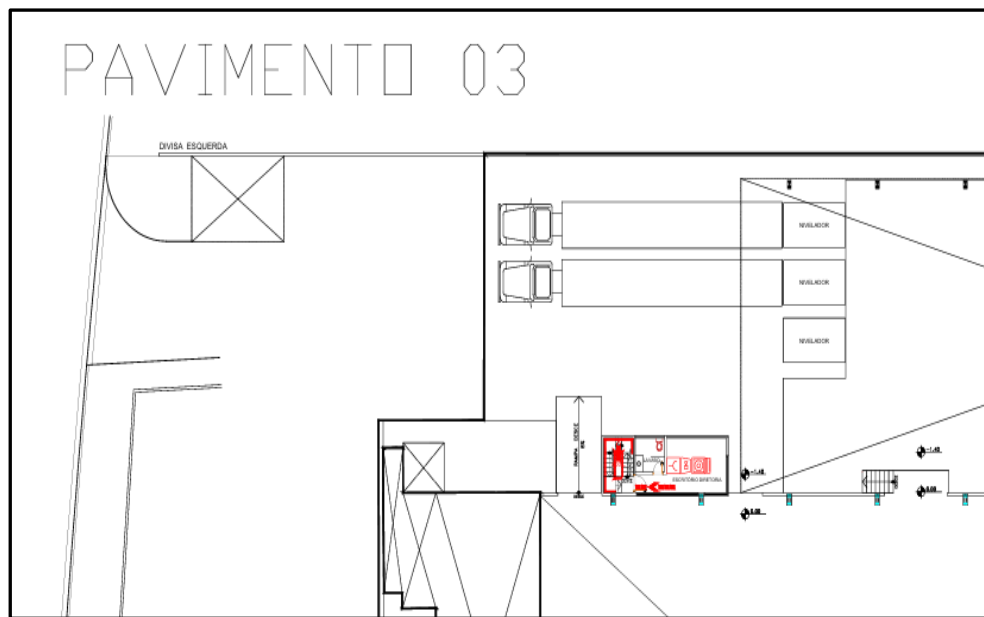


Figura 15 - Planta da Empresa - Pavimento 03

O acesso ao escritório da Diretoria, localizado neste pavimento é feito exclusivamente pelo Hall de acesso, localizado na zona de produção do pavimento 01.



Figura 16 - Escritórios - Pavimentos 01, 02 e 03

Na Figura 16, pode-se identificar o *Hall* de acesso para os três níveis de escritórios, para os departamentos de Planejamento, Logística e Diretoria; com acesso ao segundo e terceiro andares por meio de lanços de escadas localizados ao final do *Hall*. Em consonância com as plantas originais da edificação, foram mantidas as cotas de altura para cada um dos pavimentos; em 0, 3 e 6 metros nomeadamente.

3.2. Estudo da Simulação

Para a simulação da evacuação das instalações fabris, foi utilizado o software Pathfinder, escolhido pelas funcionalidades e ferramentas avançadas de cálculos para a análise da simulação e movimentação dos agentes na edificação. O Pathfinder possui a possibilidade de importação de geometrias em arquivos de formatos como DWG e PDF para a criação de um modelo tridimensional (3D), bem como a possibilidade de caracterização física dos agentes, seus comportamentos durante a simulação e geração de relatórios e gráficos de cada cenário estudado.

Com a utilização de plantas usadas no último processo de licença de operação do corpo de bombeiros (AVCB – Auto de Vistoria do Corpo de Bombeiros) e informações de atualização de layout levantadas no local de estudo, o modelo foi ajustado para se alinhar a realidade da empresa quanto as zonas de produção, zonas auxiliares e de escritórios.

3.2.1. Software de Simulação

O Pathfinder na versão 2026.1.0121, como simulador de saída e movimento humano baseado em agentes forneceu uma interface amigável ao usuário, com acesso às ferramentas e ações por meio da barra superior de tarefas e ícones localizados nos menus de acesso do simulador, Figura 17.

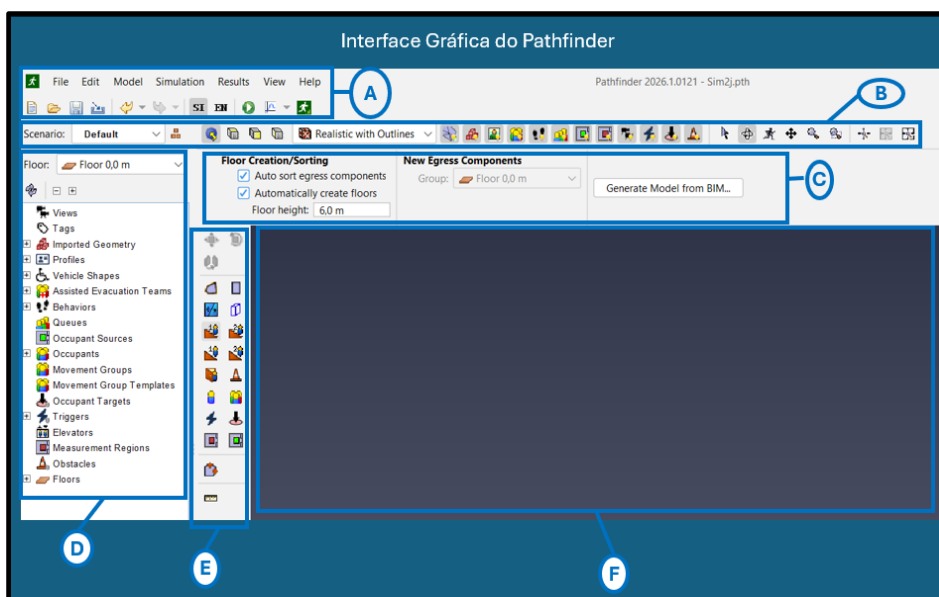


Figura 17- Interface Gráfica Inicial do Software Pathfinder

Na Figura 17, observa-se a interatividade do ecrã inicial do software Pathfinder com o detalhamento de cada uma das zonas de interação com o usuário. O menu superior e seus ícones demonstram o MENU PRINCIPAL (A), constituído pelas ações principais para a abertura de arquivos, importação de geometrias, execução da simulação e salvamento dos projetos. O MENU de VISUALIZAÇÃO (B) habilita mover ou rotacionar o modelo, alterar a visualização entre 2D e 3D, permite ao ativar o respetivo e intuitivo ícone centralizar ou ocultar a geometria

importada; entre outras funcionalidades. O PAINEL de PROPRIEDADES (C) torna-se útil na construção do modelo e dos cenários; e o PAINEL DE NAVEGAÇÃO (D) habilita a configuração, a inclusão e edição de informações para os perfis e comportamentos dos ocupantes da edificação. As FERRAMENTAS DE DESENHO (E) facilitam a inserção de elementos como portas, rampas e escadas no modelo, e entre outras funcionalidades disponibiliza uma função de medida de distâncias, ativado diretamente no ícone da régua. A zona principal do ecrã permite a VISUALIZAÇÃO 2D/3D (F) do modelo de simulação.

3.2.2. Criação do Modelo Computacional – Importação da Geometria

O modelo computacional para a simulação da evacuação da empresa foi construído primeiramente com ajustes nos ficheiros de desenhos DWG das plantas dos três pavimentos da edificação. Ajustes na escala dos pavimentos e retirada de informações que não seriam úteis a esta investigação, como por exemplo cotas de distância e linhas aéreas de gases, foram as principais ações de preparação dos ficheiros.

Na sequência, os ficheiros em formato DWG, pós tratamento, foram individualmente importados no Pathfinder; Planta pavimento 01.dwg, Planta pavimento 02.dwg e Planta pavimento 03.dwg nomeadamente, como listado na Figura 18.

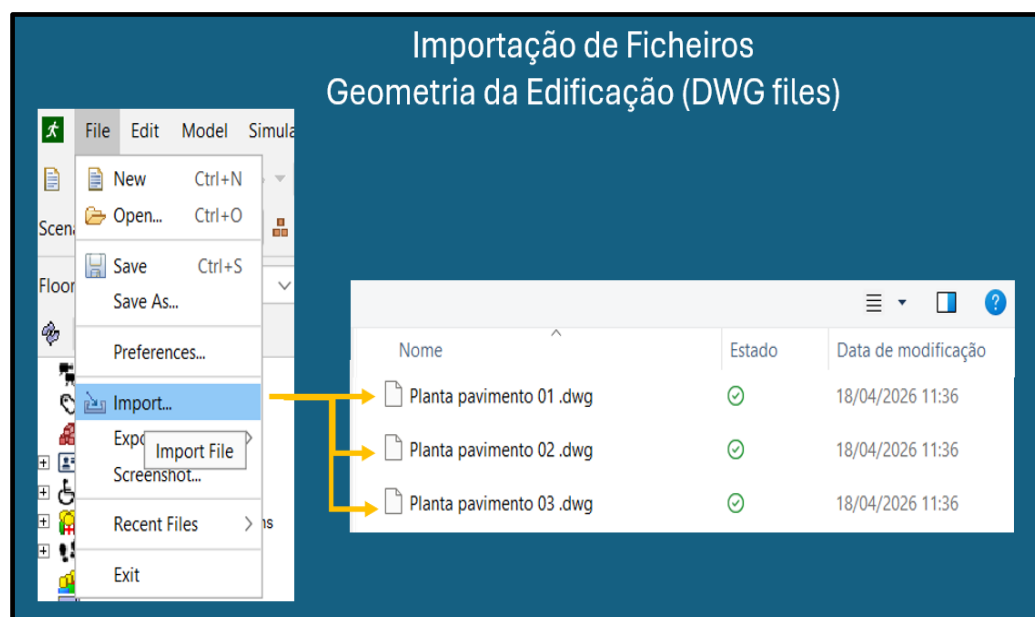


Figura 18 - Sequência de Importação dos Ficheiros

A Figura 18, indicou o caminho de importação dos ficheiros, File → Import → Ficheiro.dwg, para a criação de cada pavimento dentro do modelo de simulação virtual. Para a criação da geometria inicial da edificação do modelo computacional foi necessário o ajuste das respetivas cotas altimétricas durante a importação de cada um dos ficheiros.

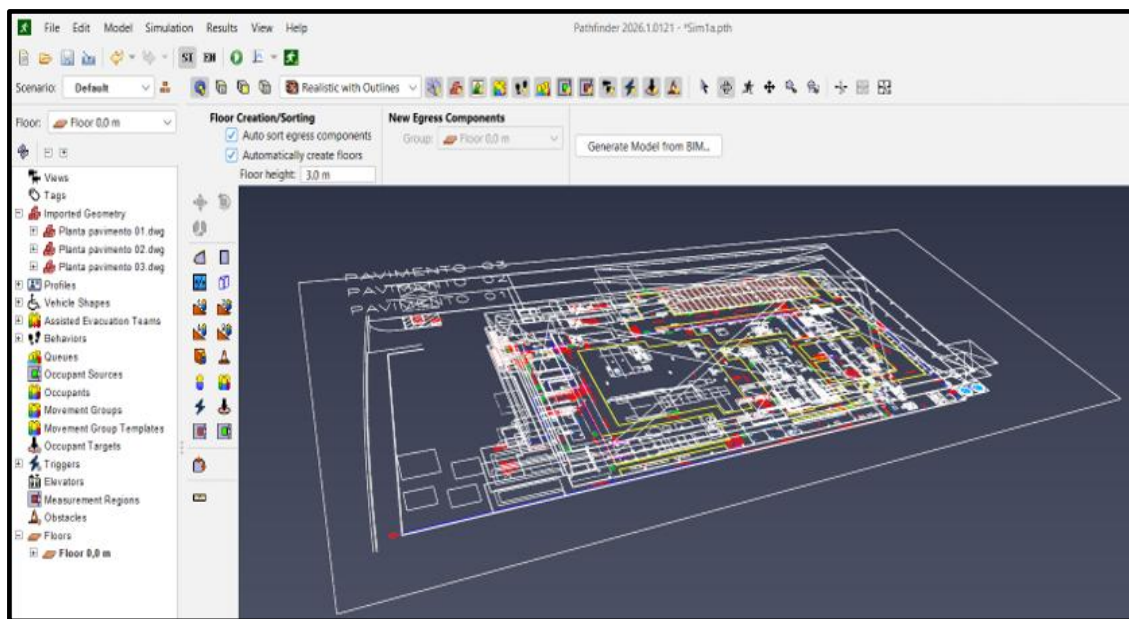


Figura 19 - Geometria da Edificação - Importação Inicial

A zona de visualização (ver Figura 19) demonstra as três geometrias inicialmente importadas, para cada um dos pavimentos, com cotas de nível de 03 metros entre um pavimento e outro; permitindo uma visualização ampla com profundidade de toda a zona da empresa de artefactos plásticos.

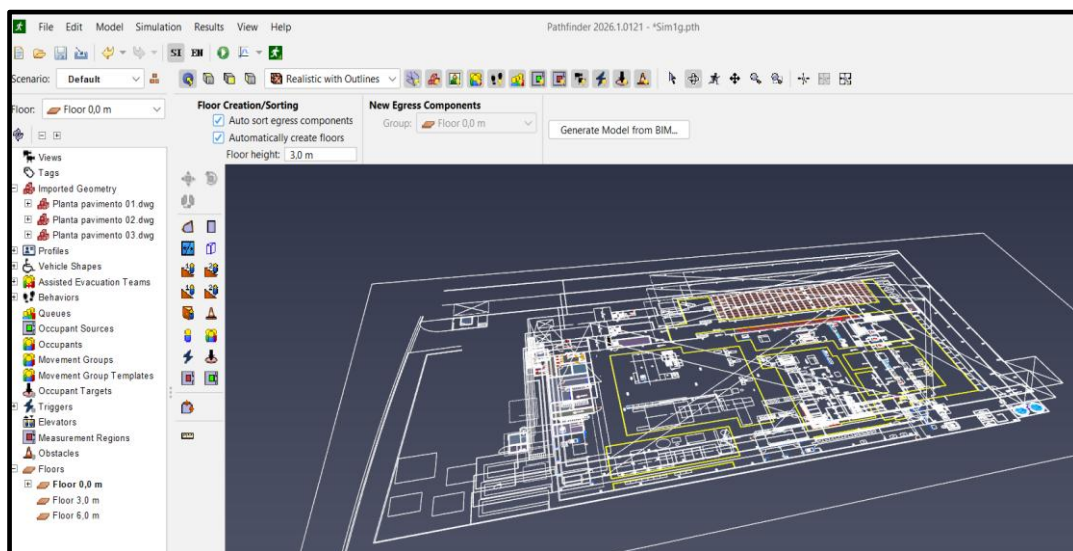


Figura 20 - Geometria da Edificação – Importação Editada

Uma edição adicional de limpeza nas geometrias importadas, realizada diretamente com recursos do Pathfinder, com a exclusão de textos e indicações não necessárias para este trabalho, foi realizada para melhorar a visualização (ver Figura 20) dentro do modelo e proporcionar o suporte para a criação do modelo computacional com a preparação para a criação das malhas de navegação (*Navigation Mesh*).

3.2.3. Criação do Modelo Computacional – Componentes da Malha de Navegação

Finalizada a etapa de importação da geometria de cada pavimento, que funcionam como base para a criação do modelo e potencializam a visualização da simulação, foi realizada a criação de malhas de navegação. Estas malhas definiram a superfície virtual para as trajetórias dos agentes durante a caminhada do ponto inicial até uma das saídas de evacuação. O conjunto formado pelas malhas de navegação do modelo representaram geometricamente o ambiente virtual com a definição das zonas onde cada agente possui uma forma válida de deslocamento em busca da saída. O Pathfinder, em sua concepção, como *software* de simulação, utiliza-se da geração de polígonos interconectados na construção das malhas, polígonos usados pelo motor de simulação. A existência da malha funciona como uma camada que identifica para cada agente que existe um caminho e que por outro lado identifica obstáculos na ausência da malha. Desta forma as geometrias importadas que definem o desenho arquitetônico da edificação servem apenas de referência para a criação das malhas e para uma melhor visualização no momento da execução do modelo final.

A criação da malha a partir de geometrias importadas, a partir dos ficheiros DWG, iniciou com a transformação das linhas limites de cada zona, em entidades de navegação (*Rooms*). A criação das malhas foi realizada em cada um dos compartimentos de cada pavimento com a utilização das Ferramentas de Desenho, Figura 21, disponibilizadas pelo Pathfinder.

Ferramentas de Desenho	Descrição
 Extract Room from Imported Geometry	Extrai a área a ser usada como de navegação de uma área específica ou geral da geometria importada.
 Add a Polygonal Room	Inicia a inclusão de uma área demarcada por vértices ao se clicar com o rato sobre a imagem da geometria importada.
 Add a Rectangular Room	Adiciona uma área retangular demarcada por dois vértices ao se clicar com o rato sobre as linhas da geometria importada.

Figura 21- Ferramentas de Desenho dos Elementos de Navegação (*Rooms*)

A conectividade entre as zonas do modelo foi estabelecida com a sobreposição e junção destas malhas e com a inserção de conectores lógicos, como escadas, rampas e principalmente portas, Figura 22, corretamente ajustados entre duas zonas. Para que o modelo fosse funcional, foi importante e fundamental a existência de caminhos de todas as zonas para as saídas, de modo a permitir que o *software* Pathfinder utiliza-se superfícies contínuas ao longo de todo o percurso, de modo a interligar o ponto inicial de cada agente as zonas de saída

Ferramentas de Desenho	Descrição
 Create stairs between two edges by choosing a point on each	Cria um lanço de escada, com possibilidade de configuração dos degraus e largura, entre dois pontos de malhas em níveis distintos
 Create ramp between two edges by choosing a point on each	Cria uma rampa entre dois pontos, com possibilidade de configuração das larguras finais, em bordas de malhas em níveis distintos.
 Add a New Door	Adiciona uma porta, ou passagem entre duas malhas distintas com a possibilidade de configuração da largura e da profundidade.

Figura 22 - Ferramentas de Desenho para Conectores de Malhas (Stair, Ramp, Door)

Desta forma, em cada um dos pavimentos, incluindo todas as cotas de altura do pavimento 01, constitui-se o conjunto de malhas de navegação, onde cada *Room* foi interligado a outro com o uso dos conectores para que a partir de qualquer ponto da malha fosse possível alcançar ponto de encontro, sem causar zonas que retenham agentes e impossibilitem a evacuação em direção a um dos pontos de encontro. Cada ponto de encontro simboliza uma área segura e efetiva da saída do ocupante para uma zona segura dentro do processo de evacuação de emergência. Segundo o plano de evacuação, aprovado pelo Corpo de Bombeiros do Estado do Amazonas, o plano de evacuação vigente da empresa consiste na existência de três pontos de encontro, utilizados nos modelos como zonas de saída (ver Figura 23).



Figura 23 - Pontos de Encontro - Zonas de Saída

Um dos pontos está localizado na zona externa da empresa, com acesso pelo portão de entrada de peões, enquanto outros dois pontos de encontro foram posicionados entre a Portaria Principal e a rampa de acesso ao Armazém e entre a passagem de entrada de caminhões e o pátio

de *containers*, ambos com acesso pelo pátio frontal na zona interna da empresa. O detalhamento com o posicionamento (A) de cada um dos pontos foi inserido no modelo de simulação. Sendo presente no ambiente real em cada um dos pontos a identificação mínima, a primeira de piso, na presença de círculos vermelhos com bordas em amarelo nos pontos 2 e 3; e a segunda a identificação por meio de placas de sinalização (B) nos pontos 1 e 3.

3.2.4. Criação do Modelo Computacional – Rede da Malha de Navegação

Para cada um dos Pavimentos da edificação, com o auxílio da geometria da edificação importada e verificações *in loco* para confirmação de medidas, zonas e consistência do layout, foi possível a criação da rede da malha de navegação. De forma, geral a criação da malha de navegação do modelo passou pelo fluxo das quatro etapas, demonstradas na Figura 24, com o uso da geometria da edificação para guiar a criação do trecho de cada sala ou zona com a inserção de seus respectivos conectores para a montagem da malha por completo.

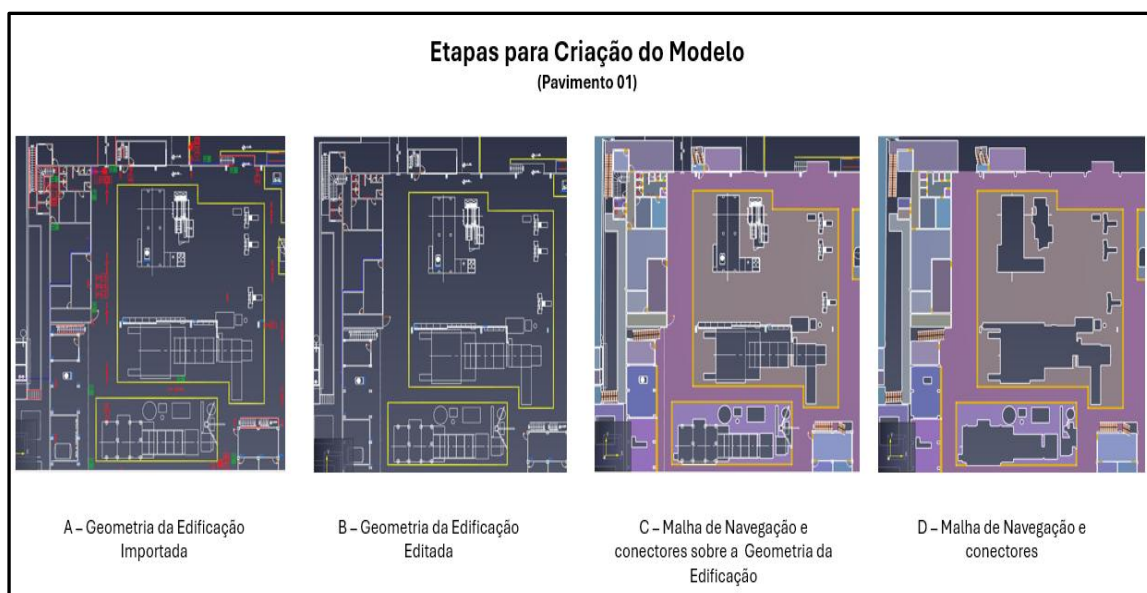


Figura 24 - Etapas para a Criação do Modelo de Simulação

Com a figura inicialmente importada (A), os itens de sinalização foram descartados para efeito deste trabalho de modo a deixar o desenho da geometria mais limpo para a criação de cada trecho da malha de navegação. A imagem da geometria editada (B), demonstra a retirada de itens de identificação específica da aplicação do ficheiro utilizado que poderiam interromper a malha de navegação, sem ser um bloqueio real ou interferência física dentro do *layout*. A imagem da malha de navegação e conectores sobre a geometria da edificação (C), ilustra o resultado da inclusão de cada zona (*Room*), porta (*Door*) e lanço de escada (*Stair*). Com a opção de não visualizar as linhas da geometria importada, obtém-se a visualização somente da malha de navegação e seus conectores (D).



Figura 25 - Detalhamento 2D da Malha de Navegação – Pav. 01 (Salas)

A Figura 25, demonstra o detalhamento de um trecho da malha de navegação da zona de salas do pavimento 01. Verifica-se a interligação entre os *Rooms* que compõe a rede da malha de navegação. Os pontos ilustrados representados nesta parte da malha de navegação permitem a verificação das conexões necessárias entre uma zona e outra de modo a formar o caminho válido para os ocupantes para o ponto de descarga dentro do modelo de evacuação. Um dos Banheiros (A), possui saída para o corredor (F), por meio de uma porta, este conector da porta tem a função de permitir o acesso dos ocupantes, sendo ainda possível configurar seu sentido ou tempo de espera (*Wait Time*) com o intuito de aproximar o tempo de abertura de uma porta face a dificuldade da mesma. O Corredor (F), funciona como um recetor de diferentes trechos da malha para interligar estes pontos em direção as saídas, via trecho (J) da rampa de acesso ao pátio frontal da empresa.

Um salão de refeitório (B), com alguns equipamentos de suporte a atividade de refeição dos trabalhadores, tem acesso único entre o trecho da malha de navegação e o corredor (F), por meio de uma porta. Os escritórios do departamento de Recursos Humanos (RH), são

interligados por uma porta e o escritório tem saída para o corredor (G), localizado dentro da zona de produção. A sala de testes (E), do mesmo modo que a sala do RH tem acesso único ao corredor (G) do pavilhão industrial.

Para a interligação de pisos com cotas altimétricas diferentes, foi necessário a inclusão de conectores específicos para permitir que um caminho válido existisse entre o ponto de origem do agente e as zonas de saída. O lanço de escada (H), interliga o corredor (I) ao pavimento 02.

3.2.5. Criação do Modelo Computacional – Portas de Acesso

Cada uma das portas, que interligou as salas e serviu também como delimitador de corredores dentro do pavilhão de produção.

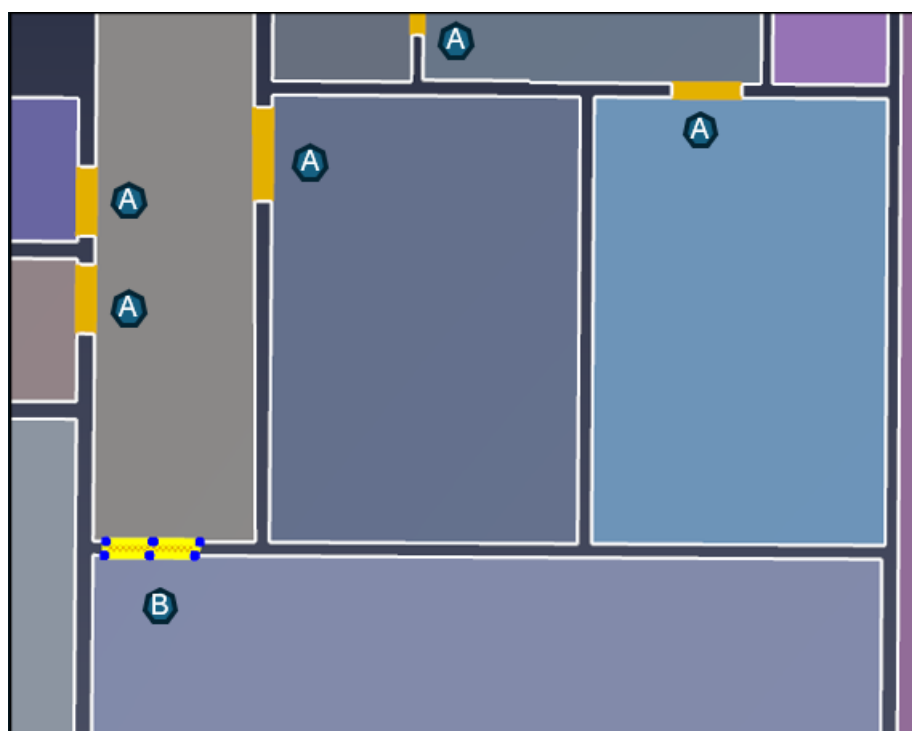


Figura 26 - Portas de Acesso (Door)

Como evidenciado na Figura 26, as portas quando inseridas no modelo tem a sua visualização na cor laranja (A); e em edição de seus parâmetros as portas tem destaque em amarelo (B) para a correta identificação no modelo e definição apropriada de suas propriedades. Inicialmente adotou-se o estado de porta sempre aberta (*State: Always Open*) e a situação que permite a passagem de todos os ocupantes independentemente do seu perfil (*Accepted Profiles: [All]*). Destaca-se ainda, como visto na Figura 27, a possibilidade de nomear (Name) a porta com uma descrição mais específica (*Restaurant_Door_364*) ou manter simplesmente a nomeação automática (*Door_364*) apresentada pelo software.

Name: Restaurant_Door34	☒ Visible	☐ Color	X Bounds: 38,34 m, 39,	Width: 80,0 cm	Wait Time: 0,0 s	Occupant Tags: Accepted Profiles: [All]
Tags:	☒ Enabled	Opacity: 100,0 %	Y Bounds: 48,42 m, 48,	☐ Flow Rate: <unlimited>		
Scenario Setup: [none]			Z Bounds: 0,00 m, 0,00	State: Always Open		

Figura 27 - Configuração das Portas

No modelo de simulação as portas são elementos que tem uma função fundamental para conexão de diferentes *Rooms* e definição do caminho que os ocupantes devem seguir. A porta funciona como uma fronteira de conexão. O parâmetro de tempo de espera na porta (*Wait Time*) foi determinado como 0.0 segundos para locais sem portas ou portas sempre abertas, sem demora para sua abertura; ou tempos ajustados entre 3.0 e 8.0 segundos, conforme observações da investigação de campo, para pontos com portas de fechamento automático que necessitam de um esforço físico maior e consequentemente uma demora maior para o ocupante vencer essa passagem.

Para a definição dos corredores na zona produtiva as portas foram utilizadas como linhas que separam a zona de equipamentos e os corredores para circulação de peões e paletes de material, Figura 28.



Figura 28 - Delimitação dos Corredores na Produção

Nas zonas delimitadas pelos conectores de acesso temos equipamentos, pilares, mesas e acessórios usados na produção, que tiveram as suas projeções 2D, identificadas na cor preta com contorno de linha branca. Estas zonas foram removidas das malhas, de modo a permanecer somente as zonas disponíveis para o deslocamento dos ocupantes dentro do modelo. Durante a construção do modelo os objetos que poderiam interferir no deslocamento dos agentes foram demarcados para remoção da malha de navegação da respectiva zona ou pavimento.

Para o modelo de simulação de evacuação utilizado neste trabalho, construiu-se uma rede completa, baseada na geometria importada, com as malhas de navegação nos três pavimentos,

detalhada na Figura 29, e interligadas pelos respectivos conectores para o acesso entre pavimentos.

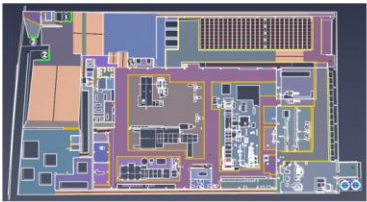
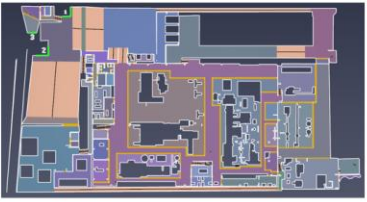
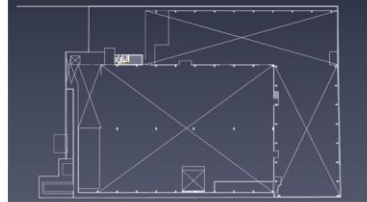
Pavimento	Geometria + Malha	Malha de Navegação
01		
02		
03		

Figura 29 - Malha de Navegação por Pavimento

Destaca-se para cada pavimento, como apresentado na Figura 29 as malhas de navegação com e sem a geometria da edificação, reforçando a função de suporte da geometria para o desenho da malha e visualização do modelo. O pavimento 01, concentrou o maior percentual referente a zonas de produção incluindo o armazém com porta paletes de matéria-prima e produto final acabado. A maior concentração de zonas de escritório ficou concentrada no pavimento 02, com mais uma pequena plataforma em formato de “L” na zona de produção. Para o pavimento 03 foi configurado apenas o escritório de uso exclusivo dos diretores da empresa.

3.2.6. Criação do Modelo Computacional – Escadas e Rampas

A utilização dos conectores de lanços de escadas e rampas nas malhas de navegação do modelo de simulação garantiu a conectividade vertical possibilitando a existência de fluxo dos ocupantes entre os diversos níveis de pavimentos da empresa; destacando-se como componentes críticos no modelo de simulação para evacuação proposto. Foi necessário definir com ajuda da geometria importada e medições de campo, a correta largura útil e a inclinação, que impactam diretamente no fluxo e na velocidade de deslocamento dos ocupantes pelos conectores de passagem vertical. Para evitar inconsistências ao correr o modelo as extremidades das escadas e rampas foram posicionadas exatamente sobre a borda de cada cota altimétrica de piso utilizado (ver Figura 30), de modo a sinalizar para o algoritmo do Pathfinder o reconhecimento de um caminho contínuo e sem interrupções desde um ponto de partida na malha até uma das saídas.

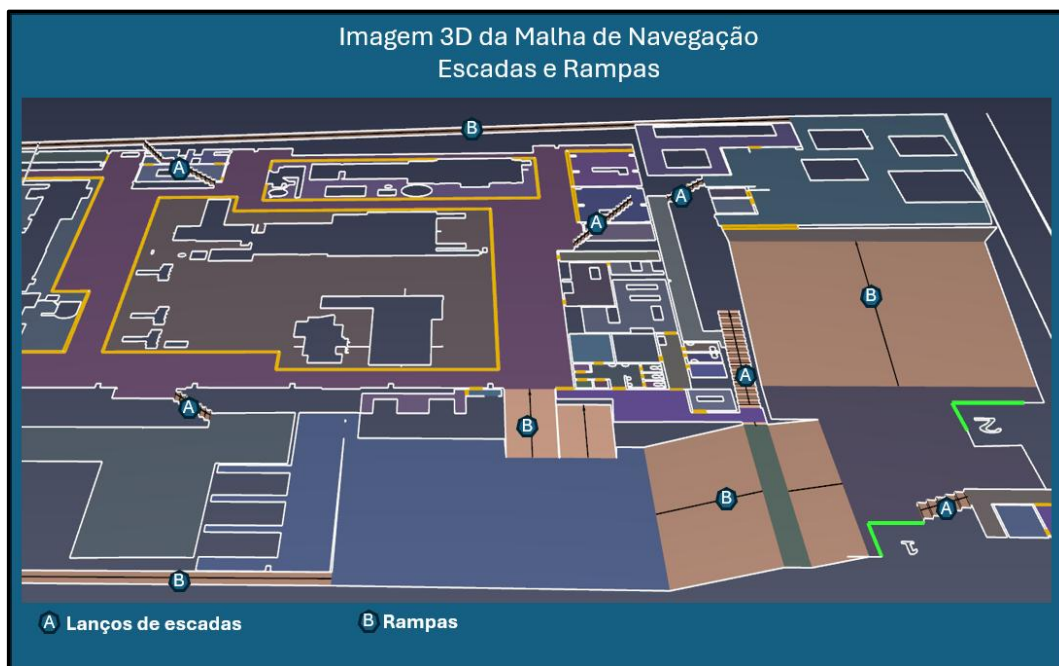


Figura 30 - Malha de Navegação 3D - (Stair / Ramp)

A imagem 3d da malha de navegação apresentada na Figura 30, demonstrou a utilização de lanços de escadas (A), com larguras e números de degraus variados, e de rampas (B), com inclinações e larguras úteis seguindo as medições realizadas na empresa. Observa-se a utilização das rampas e lanços de escada para atender as necessidades e características específicas da edificação em estudo, de modo a demonstrar a acessibilidade existente entre diferentes níveis do pavimento 01 e os acessos aos demais pavimentos da edificação em diferentes pontos do piso de referência.

3.2.7. Visualização 3D do modelo

No software Pathfinder, utilizando-se o menu de visualização, foi possível verificar por diferentes ângulos, como demonstrado na Figura 31, a consistência da malha com recurso de girar a imagem sobre um ponto fixo e ter a visualização em 3D no ecrã do computador.

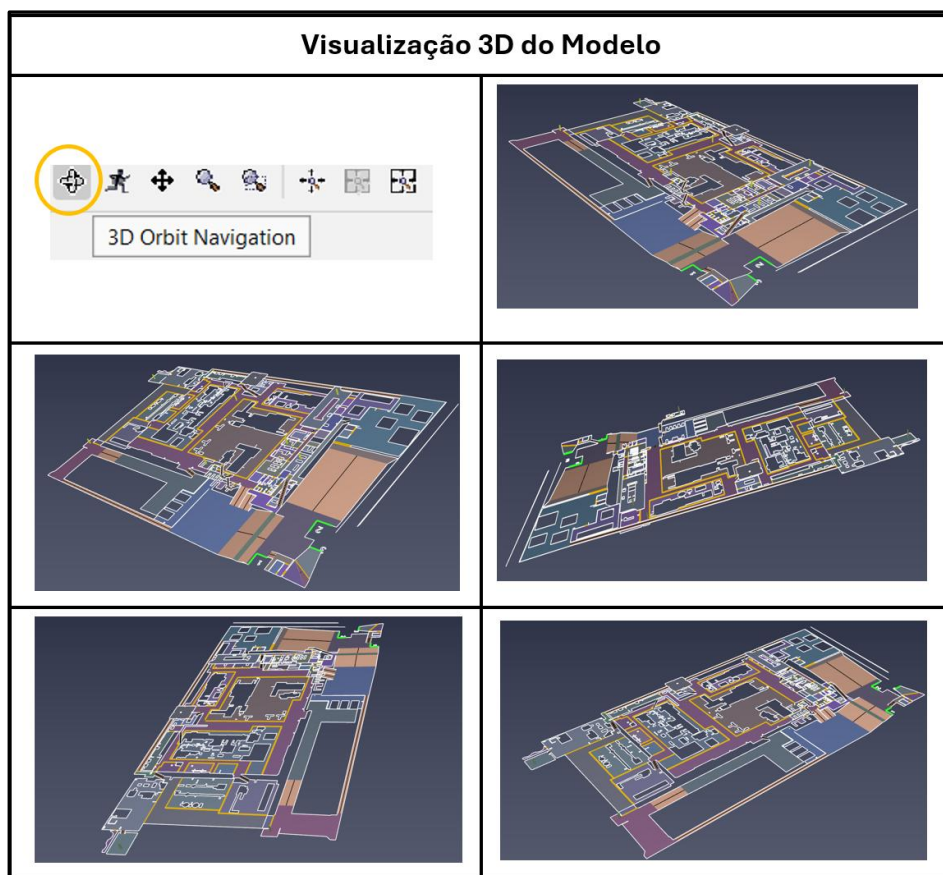


Figura 31- Visualização 3D do Modelo

Com a ferramenta *3D Orbit Navigation*, obtém-se a possibilidade de inspeção visual do modelo tridimensional de forma livre; utilizado para verificar primeiramente a importação da geometria de cada pavimento, a interligação das malhas e seus conectores; e futuramente para acompanhar o comportamento dos agentes nos movimentos de evacuação da edificação em cada um dos cenários. A visualização ocorre em torno de um ponto, pivotante ao centro da zona de visualização do ecrã, permitindo a visualização por diversos ângulos, com recursos adicionais de ampliação e redução (*Zoom*) e *Reset* voltando a visualização inicial. O modelo 3d computacional foi constituído pelo conjunto de diversas malhas, interligadas por elementos conectores, que compuseram o modelo de gémeo digital da estrutura da empresa para a simulação proposta.

3.3. Definição dos Ocupantes da Edificação

O processo de definição do perfil dos ocupantes dentro do modelo de simulação é um dos pilares fundamentais para a construção do gémeo digital e para a análise dos resultados, pois determina como o fator humano interage através da malha de navegação dentro da arquitetura da edificação. No Pathfinder, cada indivíduo ou grupo foi associado a perfis específicos, que englobam características físicas e biomecânicas, como a velocidade de deslocamento, o tamanho dos ombros para definição do raio corporal e possíveis limitações de mobilidade. Para além dos atributos físicos, os atribuídos referentes ao comportamento direcionam cada agente

para a tomada de decisão lógica durante o evento de evacuação, desde o tempo de resposta inicial até à escolha de rotas de saída ou saídas específicas. Esta configuração e parametrização permitiu simular a diversidade de uma população real dentro de um ambiente virtual. Tais definições visaram garantir que os resultados do modelo de simulação demonstrassem as mesmas características e situações de tomada de decisão complexas de um evento real de evacuação da fábrica.

3.3.1. Perfil dos Ocupantes (*Profile*)

O perfil dos ocupantes dentro da ferramenta Pathfinder foi constituído do conjunto de definições que caracterizam as capacidades físicas e restrições de cada agente dentro do modelo. Para a parametrização dos dados físicos dos agentes foram utilizados os dados do estudo de Correa (2025) na mesma região onde a empresa deste trabalho está instalada. Para o grupo de visitantes, com uma variabilidade maior dos padrões de estatura e largura dos ombros, optou-se pelo uso dos valores médios para estatura e largura do ombro de toda a população do estudo (Correa, 2025), com 1.657 metros e 37.0 centímetros nomeadamente. A Tabela 4 consolida os dados utilizados neste trabalho para os grupos de ocupantes definidos. Para cada grupo foi verificado os valores que mais se aproximavam das características dos ocupantes atuais da empresa, adotando-se na parametrização o valor médio da variável ou o respetivo percentil.

Tabela 4 - Tabela de Medidas Antropométricas

Medidas de tendência central e dispersão para os sexos feminino e masculino																
Variável	Média	DP	CV	Sexo feminino					Média	DP	CV	Sexo Masculino				
				5th	25th	50th	75th	95th				5th	25th	50th	75th	95th
Estatura (cm)	158,7	7,1	4,4	147,4	154,5	158,3	163,5	172,1	169,3	6,5	3,8	160,4	165,2	168,9	172,7	181,3
Largura do Ombro (cm)	34,4	2,4	7,0	31,4	32,8	34,2	35,3	38,6	38,4	2,6	6,8	34,5	36,8	38,2	39,9	43,3

Nota. Adaptado de Correa (2025), com dados das medidas de tendência central e dispersão para os sexos feminino e masculino de trabalhadores na região do Amazonas, Brasil

A configuração de cada grupo foi executada primeiramente com a criação do Perfil (*Profile*) correspondente e suas características, como demonstrado na Figura 32 para a criação da equipa de Segurança.

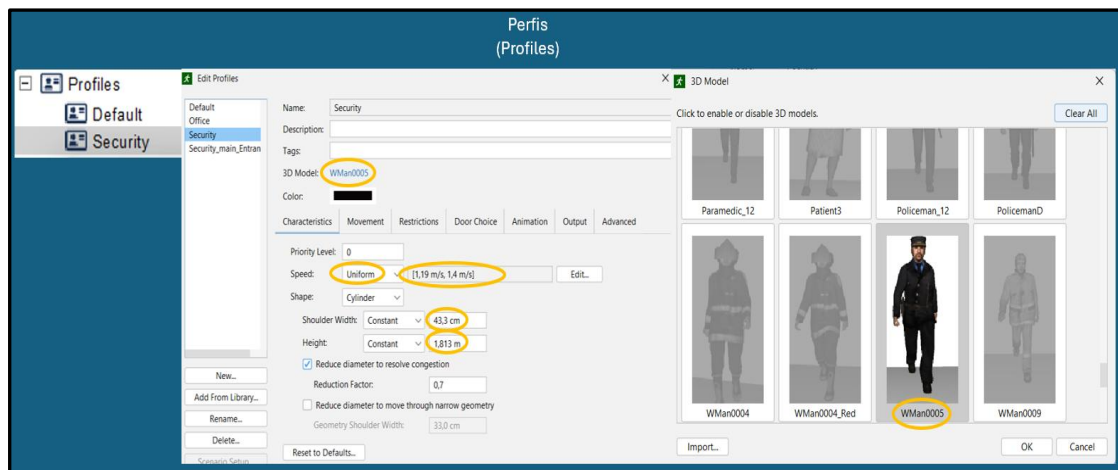


Figura 32 - Criação e Configuração do Perfil - Profile

Para a criação do perfil da equipa de Segurança foi escolhido um modelo (*Model 3d*) para representar o agente durante a simulação. Para outros perfis criados para o modelo de simulação no Pathfinder foram selecionados outros modelos 3d de agentes com semelhança ao grupo abordado, ilustrados na Figura 33, de modo a apresentar uma população heterogênea dentro do ambiente virtual.



Figura 33 - Modelos de Agentes por Grupo - Model 3d

Com a criação e configuração dos perfis como o uso dos modelos 3d que melhor representam, totalizou-se quatro tipos para os grupos de visitantes e para a equipa da produção, um tipo para a diretoria e dois para as equipas de refeitório, manutenção, administrativo masculino e administrativo feminino. Com o perfil para a equipa de segurança, criando inicialmente, estabeleceu-se o número de nove perfis para uso dentro do modelo de simulação.

3.3.2. Comportamento dos Ocupantes (*Behavior*)

No contexto da simulação no software Pathfinder, a configuração e parametrização do comportamento (*Behavior*) representou a dimensão cognitiva e lógica dos agentes, definindo regras de decisão que estes agentes deveriam seguir durante o processo de evacuação de emergência da edificação. Esta etapa da configuração, direciona o modo de reação do agente aos estímulos encontrados durante a saída. No modelo de simulação a configuração do comportamento, descrita na Figura 34, permitiu atribuir aos agentes uma sequência de ações, como o tempo de atraso de pré-evacuação, a procura por saídas específicas de modo a trazer o realismo ao modelo permitindo que comportamentos fossem incorporados ao modelo de simulação.

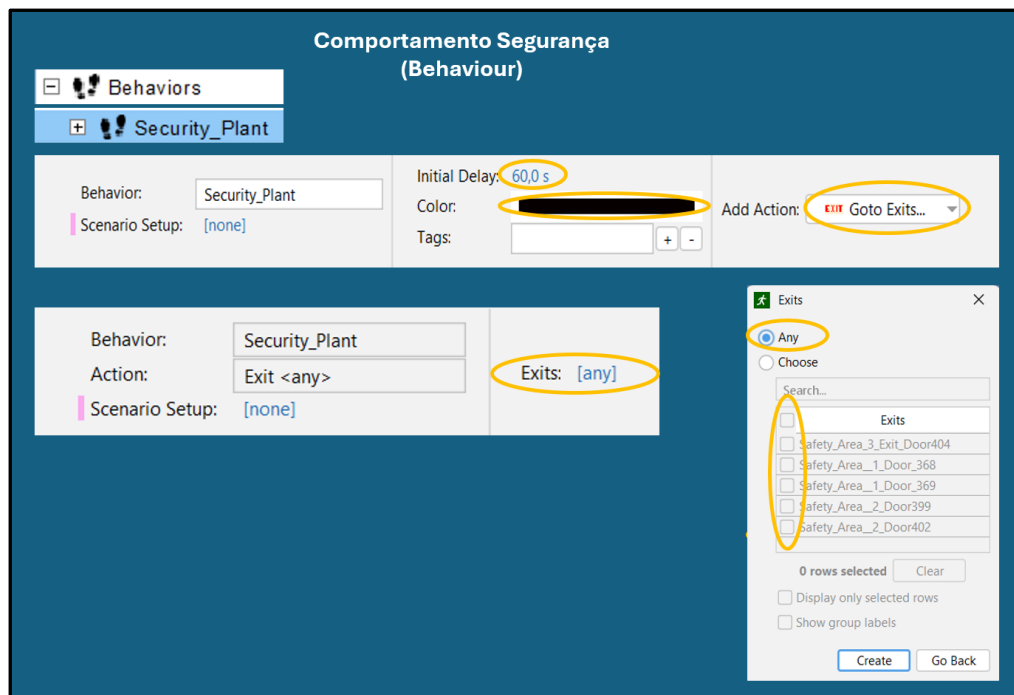


Figura 34 - Parametrização do Comportamento dos Agentes - Behavior

A parametrização do comportamento para um grupo de segurança da fábrica com hesitação de saída de 60.0 segundos, de modo a acompanhar o comportamento real de orientação passada para a equipa de segurança, em relação ao comportamento e direcionamento dos demais ocupantes quanto à rota de saída mais próxima durante o evento de evacuação. A escolha da cor do cilindro que representa o agente dentro do modelo e a saída que deverá se dirigir, sendo possível marcar mais de uma opção neste ponto da parametrização.

3.3.3. Parametrização dos Ocupantes

A parametrização final de cada grupo de ocupante foi realizada com a combinação das configurações anteriores de *Profile* e *Behavior*. A Tabela 5 demonstra a consolidação dos parâmetros por grupo de ocupantes, que foram utilizados na alocação em cada uma das zonas de trabalho, com a atribuição do respetivo perfil e velocidade de deslocamento a serem usados na simulação.

Tabela 5 - Parametrização por Grupo de Ocupantes

Grupo de Ocupantes	Profile	Behaviors	3d model	Shoulder Width (cm)	Height (m)	Speed1	Speed2 (m/s)	Initial Delay
Plant_Manager	Mangment	Adm_G	AsMan0001	38,4	1,693	Constant	1,19	20
Security_Main_Entrance	Security	Security_Main_Entrance	WMan0005	43,3	1,811	Uniform	1,19 -1,41	90
Security_Plant	Security	Security_Plant	WMan0005	43,3	1,811	Uniform	1,19 -1,41	60
(1)	Adm_M		CMan0001, CMan002	38,4	1,693	Constant	1,19	-
(2)	Adm_F		BWom0001, BWom0011	34,4	1,587	Constant	1,19	-
Office	Adm_F (50%) , Adm M (50%)	Adm_1	(1) e (2)	(1) e (2)	(1) e (2)	(1) e (2)	(1) e (2)	2
Trainee	Adm_F (50%) , Adm M (50%)	Adm_1	(1) e (2)	(1) e (2)	(1) e (2)	(1) e (2)	(1) e (2)	9
Production	Prod	Prod	Cman0022, CMan0023, CMan0026, CMan0027	38,4	1,693	Uniform	1,19 -1,41	2
Maintenance	Maintenance	Maintenance	WMan0202, WMan0009	39,9	1,727	Uniform	1,19 -1,41	1
Visitors	General	General	AsMan001, AsMan002, BWom002, CWom0024	37,0	1,657	Constant	1,19	10
Canteen	Canteen	Canteen	CMan0028, CWom0029	34,4	1,587	Constant	1,19	10

Nota. (1) Modelos 3D, estatura, largura do ombro e padrão de velocidade para os ocupantes masculinos que compõem os grupos Office e Trainee. (2) Modelos 3D, estatura, largura do ombro e padrão de velocidade para os ocupantes femininos que compõem os grupos Office e Trainee.

A opção pela velocidade uniforme (*uniform*) para os grupos de produção, manutenção e segurança teve o objetivo de garantir uma maior proximidade destes grupos a realidade com uma distribuição do valor da velocidade entre 1.19 e 1.41 m/s; para os demais grupos foi atribuída a caracterização de velocidade constante (*constant*) de 1.19 m/s. Os perfis Adm_M (1) e Adm_F (2) foram utilizados para compor outros dois grupos de ocupantes, *Office* e *Trainee*, nomeadamente para a equipa administrava e de estagiários nomeadamente. A introdução dos ocupantes no ambiente virtual de simulação foi realizada de forma estruturada, utilizando as ferramentas de alocação por piso (*Floor*) e por compartimento (*Room*). Com as informações recebidas da empresa sobre o número de trabalhadores por turno de trabalho e por departamento de atuação e utilizando-se ferramenta do menu de inserção de ocupantes, foi possível determinar a densidade populacional específica para cada setor da unidade industrial, utilizando a opção de preenchimento por número fixo de indivíduos (*By Number*).

Para inclusão do respetivo número de ocupantes nas zonas da edificação da empresa, dentro do modelo de simulação, um processo de quatro passos detalhado na Figura 35, permitiu a representação da distribuição e da alocação dos trabalhadores dentro da empresa.

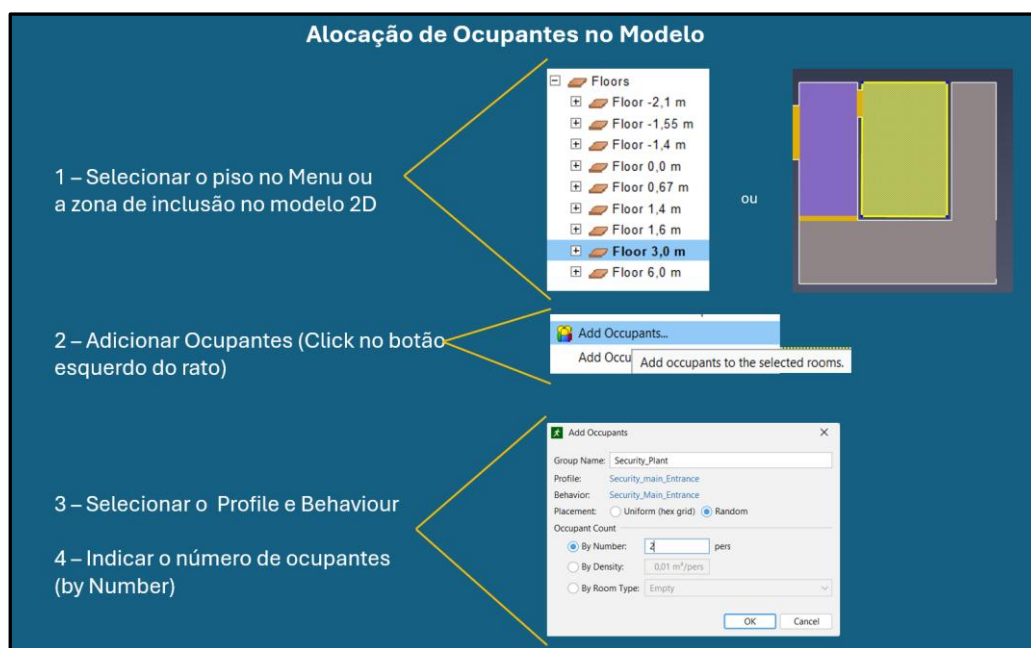


Figura 35 - Alocação de Ocupantes no Modelo

Durante este processo, cada grupo de agentes foi associado ao seu respetivo perfil antropométrico (*Profile*) e conjunto de regras de decisão (*Behavior*) previamente parametrizados. Esta metodologia de alocação por zonas de trabalho garantiu que a distribuição dos trabalhadores no modelo espelhasse a usual distribuição real nos postos de trabalho e nas demais áreas da unidade fabril. Com uma condição próxima à realidade buscou-se com o uso do *software* Pathfinder utilizar seu algoritmo nas escolhas das rotas de evacuação para cada ocupante, tendo como ponto de partida as localizações prováveis de cada trabalhador e ocupante do pavilhão industrial, sem desta forma direcionar os agentes para uma determinada saída; exceção aos dois agentes de segurança que foram os únicos direcionados para saída de número 3.

3.3.4. Modo de Simulação (SFPE e *Steering*)

A simulação de evacuação no software Pathfinder pode ser executada através de dois paradigmas de cálculo distintos, que diferem na forma como processam a interação entre os agentes e o ambiente, o modo SFPE e o modo *Steering*. O primeiro modo foi baseado nas equações apresentadas no manual da Sociedade de Engenheiros de Combate à Incêndios, nomeado SFPE (Hurley et al., 2016), em que a velocidade de deslocamento dos ocupantes, utilizada pelo Pathfinder, foi definida pelo capítulo do manual que trata de Utilização do Modelo Hidráulico na Avaliação do Movimento de Emergência, como a velocidade em percursos sem obstáculos do ponto de partida em direção a uma das saídas, sendo a velocidade de um agente ou de um grupo uma função direta da densidade populacional na referida zona.

O modelo hidráulico sustenta-se como título do capítulo do manual SFPE pelo fato de que o autor (Gwynne, 2016) analisam o fluxo de pessoas como um fluxo de um fluido através de canais, com analogia aos corredores, e orifícios que são as portas e passagens no modelo de simulação proposto.

Tabela 6 - Velocidade Máxima dos Ocupantes - SFPE

Tipo de Fluxo	Densidade (pess/m ²)	Velocidade máxima (m/s)
Fluxo Livre	< 0,54	1,19
Fluxo Condicionado	0,54 a 3,8	$k - (a * k * D)$
Fluxo Interrompido	> 3.8	(1)

Nota. (1) Movimento cessa até que a Densidade diminua. Adaptado do Capítulo 59 (Gwynne, 2016) do Manual SFPE

Neste modo, SFPE, o algoritmo do simulador segue a metodologia de movimento baseados na densidade, onde são considerados o fluxo livre, o fluxo condicionado e o fluxo interrompido, como definido para cada regime de fluxo na Tabela 6. Para o primeiro regime para densidades inferiores a 0,54 pess/m² a velocidade máxima define-se para deslocamentos horizontais, corredores, portas e rampas. O fluxo condicionado calculado por meio de uma função linear; o valor da constante k ajusta-se pelo *software* quando o agente se desloca por rampas e escadas, por sua vez a constante a determina o quanto a velocidade é penalizada por pessoa que entra na área de cálculo. Por fim, no fluxo interrompido ocorre uma suspensão no movimento até que a densidade no ponto diminua e o fluxo possa ser retomado.

Para o segundo modo, modelo de forças sociais (*Steering*), temos um paradigma que se fundamenta em conceitos de inteligência artificial e dinâmica de peões, permitindo que cada agente seja modelado como um agente autónomo que possui um raio físico e procura atingir seu objetivo, que é o de encontrar uma saída enquanto evita colisões, (Thunder Head Engineering, 2026). Neste modo a redução da velocidade ocorre devido à obstrução física de outros ocupantes ou obstáculos relativos à geometria do ambiente, mimetizando de forma mais fidedigna a questão de tomada de decisão humana e o efeito de afunilamento em zonas de gargalos de passagem criados pelo aumento do número de ocupantes em determinadas linhas de passagem, como portas e escadas.

Para o presente trabalho, optou-se pela utilização do segundo método *Steering*. A decisão de escolha justificou-se pela necessidade de integrar os dados antropométricos específicos da população do Polo Industrial de Manaus, obtidos através do estudo de (Correa, 2025), aproximando o modelo virtual de simulação da situação real. Salientando-se que o modo *Steering*, considera a busca dos agentes pelo caminho mais curto e utiliza-se do diâmetro ocupado por cada agente, demonstrando que os resultados da simulação passam a ser sensíveis às características físicas reais dos trabalhadores locais. Ao contrário do modo SFPE, que aproxima o modelo de simulação de um modelo puramente matemático.

3.4. Validação do Modelo

A validação do modelo computacional constitui uma etapa importante para garantir a fiabilidade da simulação face ao ambiente real estudado. Para aferir a acuidade do software Pathfinder, procedeu-se a uma análise comparativa entre os tempos de evacuação obtidos *in situ* e os resultados gerados em ambiente virtual.

3.4.1. Ensaio Experimental e Simulação Computacional

A metodologia de ensaio consistiu na cronometragem de trajetórias em pontos estratégicos de cada compartimento do piso em análise, selecionando-se algumas localizações incluindo maior ou menor proximidade aos pontos finais de cronometragem. Para o levantamento experimental, cada ocupante iniciou o movimento em simultâneo com a cronometragem, sendo desta forma o tempo de hesitação marcado para a análise do modelo igual a 0 segundos. A velocidade do agente foi constante, e sem interrupções durante o trajeto. Utilizando-se os valores de simulação e os valores médios cronometrados no ensaio experimental foi calculado o erro percentual para cada trajeto, Figura 36.

**Fórmula do Erro Percentual
(Tempo Simulado x Tempo Real)**

$$e = \frac{|T_{simulado} - T_{real}|}{T_{real}} \times 100$$

E: Erro percentual entre simulação e ensaio real

T_{simulado}: Tempo de evacuação obtido pelo Pathfinder

T_{real}: Tempo de evacuação cronometrado

Figura 36- Fórmula do erro Percentual para o Trajeto

No ensaio experimental, oito amostragens de tomada de tempo foram realizadas para cada trajeto, sendo o valor da média utilizado para se obter o valor do erro percentual e realizar comparações com o valor da simulação computacional. Os valores obtidos no ensaio experimental e de simulação constam da Figura 37.

Tempos do Ensaio Experimental e Simulação Computacional												
Amostragem dos tempos de trajeto (s)												
Trajeto	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	Média	Desvio Padrão
1	67,3	78,3	70,2	66,1	73,6	70,9	73,8	69,3	75,7	67,4	71,26	3,79
2	52,2	64,1	57,6	55,8	61,1	58,5	60,2	54,1	63,3	58,4	58,53	3,62
3	36,6	43,8	39,3	37,9	42,3	40,4	42,8	37,3	44,2	39,4	40,40	2,61
4	85,3	102	91,3	89,6	99,4	95,6	97,2	88,2	103,6	97,3	94,95	5,80
5	148,3	175,3	157,8	152,3	168,7	161,9	165,1	150,9	178,6	156,4	161,53	9,79
6	74,2	89,4	81,3	79,6	85,2	82,1	84,3	76,3	90,5	80,4	82,33	4,94
7	44,3	53,9	48,6	46,1	51,8	49,5	50,1	45,4	54,7	50,4	49,48	3,30
8	52,7	63,4	57,1	55,7	61,3	58,4	59,4	53,7	64,4	58,7	58,48	3,66

id	name	exit time (s)	active time (s)	congestion time total (s)	time max continuous (s)	level congestion time	stair congestion time	ramp congestion time	start time(s)	finish time(s)	distance (m)	num triggers used
0	1	73,925	73,925	0,275	0,275	0,275	0	0	0	73,925	83,257	0
1	2	61,525	61,525	0,325	0,325	0,325	0	0	0	61,525	68,738	0
2	3	35,625	35,625	0,275	0,275	0,275	0	0	0	35,625	33,206	0
3	4	102,500	102,500	0,275	0,275	0,275	0	0	0	102,500	117,354	0
4	5	142,225	142,225	0,275	0,275	0,275	0	0	0	142,225	157,035	0
5	6	76,125	76,125	0,275	0,275	0,275	0	0	0	76,125	57,486	0
6	7	46,150	46,150	0,200	0,200	0,200	0	0	0	46,150	39,038	0
7	8	53,575	53,575	0,275	0,275	0,275	0	0	0	53,575	54,288	0

Figura 37 - Tempos do Ensaio Experimental e Simulação Computacional

Na Simulação computacional, no que tange a movimentação dos agentes considerada pelo Pathfinder, com foco na velocidade de deslocamento, a abordagem para a validação foi a da adoção da velocidade constante, com o intuito de comparar os tempos simulados com os ensaios de campo. O erro percentual foi calculado para cada trecho selecionado para a validação, considerando pelo menos um trajeto em cada um dos três pavimentos principais, seguindo o fluxo de validação descrito na Figura 38.

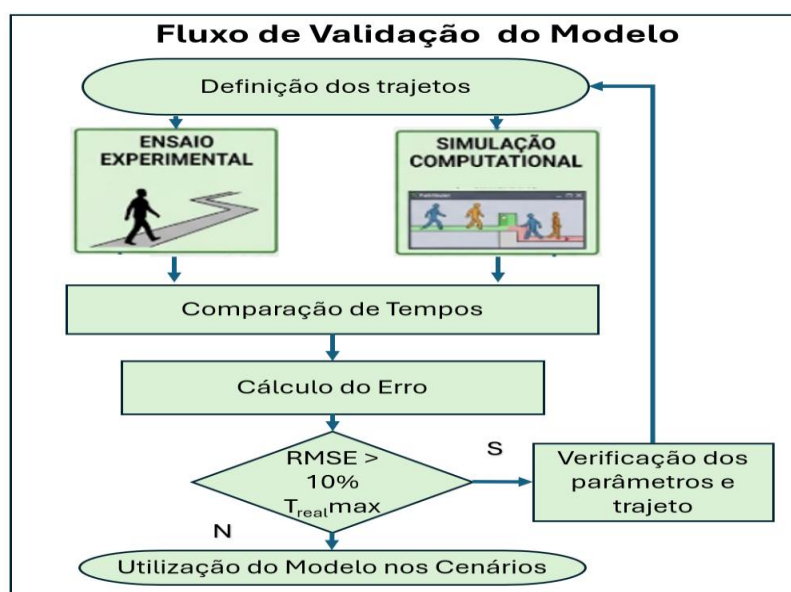


Figura 38 – Fluxo de Validação do Modelo

A validação do modelo computacional foi estruturada em um processo comparativo sistemático entre os ensaios experimentais em campo, com a coleta de tempos entre os pontos de partida e saída, e as simulações realizadas no software Pathfinder para determinação do tempo de chegada no ponto de evacuação; para o trajeto de cada agente devidamente posicionado. A Tabela 7 apresenta o resultado do tempo real para cada trajeto com a devida comparação ao tempo simulado resultando no valor do erro percentual dos trajetos.

Tabela 7 - Tabela Comparativa para Validação do Cenário

Trajeto	Ponto de Partida	Ponto de Chegada	T _{real} (s)	T _{simulado} (s)	e (%)	Diferença de Tempo T _{simulado} - T _{real} (s)	Erro Quadrático (T _{simulado} - T _{real}) ² (s ²)
1	Manutenção (Pav. 1, 0 m)	Ponto de Encontro 1	71,26	73,925	3,74	2,665	7,102
2	Corredor Principal (Pav. 1, 0 m)	Ponto de Encontro 1	58,53	61,525	5,12	2,995	8,970
3	Refeitório (Pav. 1, 0 m)	Ponto de Encontro 2	40,4	35,625	11,82	-4,775	22,801
4	Setor de Solda (Pav. 1, -1.55 m)	Ponto de encontro 3	94,95	102,500	7,95	7,550	57,002
5	Sala de Compressores (Pav. 1, -2.10 m)	Ponto de Encontro 3	161,53	152,225	5,76	-9,305	86,583
6	Produção (Pav. 2, 3.0 m)	Ponto de Encontro 2	82,33	76,125	7,54	-6,205	38,502
7	Sala Gerente (Pav. 2, 3 m)	Ponto de Encontro 2	49,48	46,150	6,73	-3,330	11,089
8	Sala Diretor (Pav. 3, 6 m)	Ponto de Encontro 2	58,48	53,575	8,39	-4,905	24,059
						Média	32,014

A diferença do tempo simulado e o real permitiu obter-se do erro quadrático de cada trajeto. Onde o valor da média dos erros quadráticos será utilizado para concluir a validação do modelo.

3.4.2. Critério de Validação do Modelo

Para que o modelo fosse considerado validado, estabeleceu-se como critério de aceitação um erro quadrático médio (RMSE) inferior a 10% do tempo real máximo observado. A definição do critério de aceitação de 10% para o RMSE foi baseada na variabilidade intrínseca do comportamento humano. Utilizou-se como referência a velocidade média de caminhada livre de 1,19 m/s e o desvio padrão de 0,15 m/s estabelecidos pela SPFE. Com isso foi possível encontrar o valor do Coeficiente de Variação (CV), resultado da divisão do desvio padrão pela média da velocidade, aproximadamente 12,6%. Esse indicador demonstrou que a velocidade da população real está posicionada naturalmente nessa proporção devido à individualidade dos ocupantes. Portanto, ao estipular um teto de erro para o modelo de 10%, valor este inferior à dispersão natural do fenômeno físico observado, buscou-se que os desvios matemáticos do simulador permaneçam contidos dentro da margem aceitável de variabilidade da dinâmica humana, conferindo alta fiabilidade à validação.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (T_{simulado,i} - T_{real,i})^2}{n}}$$

RMSE (s)	5,658
-----------------	--------------

Figura 39 - Erro Quadrático Médio - RMSE

Na etapa de validação, o cálculo do RMSE, como definido na Figura 39, resultou no valor de 5,658 segundos, representando 3,5% do T_{real} máximo de 161,53 segundos apurado no ensaio experimental. Desta forma, o RMSE encontrado ficou significativamente abaixo do limite de tolerância estipulado, confirmando a alta acuidade da simulação e parâmetros de velocidade adotados para representar a dinâmica de evacuação da edificação em estudo.

4. Resultados e Discussão

Diferentes cenários foram propostos com o objetivo de analisar e aperfeiçoar o processo de evacuação do pavilhão industrial e empresa. Os cenários considerados levaram em consideração diferentes horários de operação para perceber o impacto na estratégia de evacuação para condições que variam entre o mínimo e máximo histórico de ocupantes, consonante as informações da empresa onde a investigação foi desenvolvida.

As variações introduzidas no modelo de simulação criado com o auxílio do Pathfinder, permitiram a verificação de situações com potencial de criticidade, nas quais as zonas de ponto de encontro ou saídas, com localização dentro dos limites da empresa, estivessem bloqueadas. O intuito deste bloqueio foi o de avaliar a capacidade de direcionamento do fluxo de ocupantes, para uma evacuação total, totalmente canalizada pelo portão de acesso de peões.

O bloqueio proposital de uma rampa de acesso ao pavilhão principal, no pavimento térreo; a obstrução do lanço de escada que permite o acesso principal para a zona administrativa de escritórios, no primeiro pavimento; e uma simulação reportando as condições do último exercício dirigido de evacuação real constituíram o conjunto de cenários analisados dentro deste trabalho.

Diante da ausência de uma legislação nacional, local ou política da empresa sobre o tempo de pré evacuação, tempo entre o início do sinal sonoro de emergência e o início da evacuação, adotou-se a cronometragem a partir do momento de alarme, com a diferenciação quando necessária dentro dos perfis de cada grupo de ocupantes, na configuração do tempo de resposta ao início da evacuação (*Wait Time*). Para as avaliações em relação ao tempo total final de evacuação o valor de pré-evacuação de 120 segundos foi escolhido e respaldado pelos valores de distribuição comportamental da engenharia de segurança contra incêndio, apresentados pelo padrão britânico, (BSI, 2019) e discutido por Spearpoint et al. (2021), ao revisarem dados experimentais, demonstrando o tempo de pré evacuação como uma barreira temporal onde uma parcela significativa da população ainda se encontra no estágio de transição para o reconhecimento efetivo da emergência e início do movimento de evacuação, apresentando uma variação consonante a familiaridade dos ocupantes e inversamente proporcional ao nível de automação direcionada das rotas de fuga como fator de auxílio aos ocupantes.

4.1. Cenários de Evacuação

O gémeo digital desenvolvido por meio de modelagem computacional da evacuação de emergência permitiu a análise preditiva dos cenários estruturados, consolidando-se como ferramenta essencial para antecipar o comportamento dinâmico dos ocupantes sob diferentes condicionantes físicas e operacionais. A principal vantagem de gestão de produção e de engenharia de segurança desta abordagem baseada em simulação, com o uso do gémeo digital, consistiu na possibilidade de testar hipóteses críticas e em condições de interferências no trajeto habitual sem a necessidade real de impacto nas atividades dos ocupantes ou paragens da atividade fabril. Dessa forma, esta secção apresenta a caracterização dos cenários simulados no software Pathfinder. A conceção dos modelos com o objetivo de refletir fielmente as condições de movimentação observadas nos ensaios de campo quanto para testar hipóteses de gargalos e redução do tempo total de abandono do local, ao levar em conta variáveis como alterações nas rotas de saída e inserção de obstáculos geométricos.

Para a definição dos cenários, foi levantado junto à empresa o número de ocupantes por Zona/Departamentos durante diferentes períodos dos dias úteis de operação na semana, Tabela 1.

Tabela 8 - Número de Ocupantes Por Turno de Trabalho

Zona / Departamentos	Número de Ocupantes por turno				Número de Ocupantes por horário			Perfil dos Ocupantes		
	Turno Manhã	Turno Tarde	Turno Noite	Turno Comercial	03h00 (mínimo)	7h00 (Início Turno Comercial)	14h00 (pico)	Profile	Behaviour	Observação
ADESIVADORA	6	5	5		5	6	11	Prod	Prod	
ALMOXARIFADO	3	3	2	2	2	5	8	Prod	Prod	
ESTAGIÁRIOS				9		9	9	Adm_F/Adm_M	Adm_1	40/60, Estagiários em Turno parcial
COMPOSTO	3	3	3		3	3	6	Prod	Prod	
CONTABILIDADE				3		3	3	Adm_F/Adm_M	Adm_1	60/40
CORTE	2	2	2	1	2	3	5	Prod	Prod	
LÍDER	1	1	1		1	1	2	Prod	Adm_1	
LOGÍSTICA		1		5		5	6	Adm_F/Adm_M	Adm_1	40/60, 1 trabalhador em Turno Parcial
MANUTENÇÃO	5	5	3	1	3	6	11	Maintenance	Maintenance	
BOLHA	1	1				1	2	Prod	Prod	
SEGURANÇA	2	2	1		1	2	4	Security_Main_Entrance/ Security	Security_Main_Entrance/ Security_Plant	50/50, 1 na Portaria e outro em ronda
RECICLAGEM				1		1	1	Prod	Prod	
REFEITÓRIO	4	3	2		2	4	7	Cantine	Cantine	
GERENTE				1		1	1	Managment	Managment	
DIRETOR				1		1	1	Managment	Managment	
RH				3		3	3	Adm_F	Adm_1	
LIMPEZA	2	2	1	1	1	3	5	Cantine	Cantine	
COMPRAS	0	0	0	1		1	1	Adm_F	Adm_1	
CQ	2	2	1		1	2	4	Prod	Prod	
VENDAS	0	0	0	2		2	2	Adm_F/Adm_M	Adm_1	50/050
VISITANTES	0	0	0	5		5	5	General	General	
REVISÃO	0	0	0	2		2	2	Prod	Prod	
Total	31	30	21	38	21	69	87			

Para a definição precisa dos cenários, realizou-se um levantamento populacional junto à gestão da empresa para determinar o número provável de ocupantes por zona e departamento durante os diferentes períodos de operação nos dias úteis da semana, a Tabela 8 apresentou um resumo do número de ocupantes por turno de trabalho, por horário sugerido para análise e o perfil de cada grupo. A listagem completa de *profile* e *behavior* (ver Figura 40) para a configuração de cada cenário pode ser verificada e editada caso necessário no *software* de simulação.



Figura 40 - Listagem do Perfil dos Ocupantes - Profile / Behavior

Para cada grupo de ocupantes, foi atribuído um perfil computacional específico (*Profile*) e um padrão de comportamento (*Behavior*), composto das características físicas e das velocidades de deslocamento nas malhas de navegação. Para os grupos de Estagiários, Contabilidade, Logística e Vendas, foi atribuído um percentual de mulheres e homens, nomeadamente discriminado na coluna de observação. Para a equipa de Portaria atribui-se um agente fixo na guarita de controlo de entrada e saída e um segundo agente de segurança posicionado no interior do pavimento térreo da fábrica, prevendo a realização de rondas regulares de verificação de segurança física e patrimonial.

Com a consolidação quantitativa dos grupos, foi possível mapear os períodos de maior densidade ocupacional da edificação ao longo de 24 horas de um dia de operação regular da empresa. O gráfico da Figura 41, mostra o resultado da distribuição dos ocupantes ao longo do dia, observando-se a flutuação populacional em 3 períodos, decorrente principalmente das trocas de turnos de trabalho operacional e intervalo de horário previsto para atendimento de visitantes.

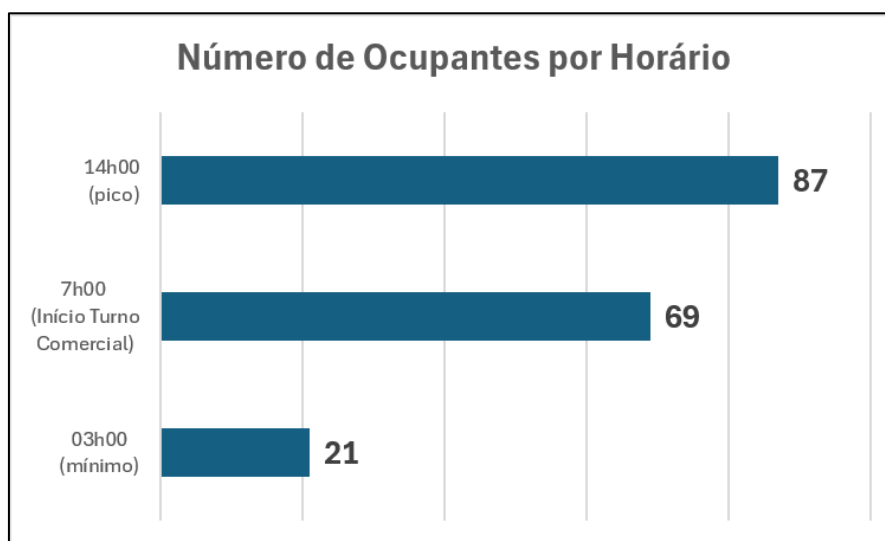


Figura 41 - Número de Ocupantes por Horário

Os horários previstos para as trocas das equipas de produção acontecem normalmente às 06h00, 14h00 e 22h00. O gráfico do número de ocupantes nestes horários evidencia a flutuação do número de ocupantes de forma concomitante ao início de novos turnos ou devido a sobreposições temporárias das equipas, resultantes da permanência simultânea da equipa que está a finalizar a jornada de trabalho e da equipa que está na condição de iniciar a jornada. Cada um dos cenários propostos foi devidamente configurado no modelo de simulação de forma a adequar-se a quantidade de ocupantes relativas ao respetivo horário avaliado.

Nos três horários selecionados, o pico da ocupação da edificação contabilizou 87 indivíduos e ocorreu no horário das 14h00. Este momento destacou-se pela permanência do turno Comercial, os momentos finais do turno da Manhã e o início das atividades do turno da Tarde. O horário das 07h00, com 69 ocupantes coincidiu com o início do turno Comercial e dos que cumprem um horário parcial; o horário parcial para determinados trabalhadores do escritório e para o grupo de estagiários; que em conjunto com as equipas que iniciaram o turno da manhã completam o efetivo de ocupação. O período de menor ocupação das instalações da fábrica, com 21 ocupantes, teve seu registo na madrugada, contando com as equipes do turno da Noite e serviços de apoio à operação de forma reduzida.

Para as condições relativas ao pico de ocupação e ao horário do início do turno Comercial foram estabelecidos, primeiramente cenários de referência sem restrições e, na sequência cenários com variações; com a inclusão de bloqueios para áreas de ponto de encontro e saída da fábrica, interdição de lanço de escada e rampa como alternativas de saída dos pavimentos e edificação. Para o cenário do turno da Noite avaliou-se apenas a condição sem restrições ou obstáculos devido ao efetivo reduzido, e não utilização da zona de escritórios do pavimento 02. Por fim, um último cenário com base na evacuação real realizada em julho de 2025, retomando o número de ocupantes exatos e condições estimadas de armazenamento interno da empresa para fins de comparação e ajustes para futuros eventos de evacuação.

4.1.1. Cenário 1 – 69 Ocupantes Sem Restrições de Saída

O cenário 1, primeiro cenário de referência, consistiu na utilização da malha de navegação do modelo validado aplicado ao número total de 69 ocupantes mapeados dentro das dependências da empresa no período da manhã. Tal cenário consistiu na presença de trabalhadores do horário do primeiro turno de operação, equipas do horário Comercial, colaboradores do horário Parcial, prestadores de serviço do refeitório, limpeza e visitantes. Neste cenário 1, de referência para o período das 07h00 e 69 ocupantes, não foram inseridas restrições ou obstáculos nas rotas de fuga existentes. A distribuição espacial dos trabalhadores decorreu da proximidade com seu posto de trabalho e atividades habituais, de modo a preservar com fidelidade o censo populacional da empresa por zona e departamento.

Com a versatilidade do software de simulação, o mesmo ficheiro do modelo de simulação comportou diferentes cenários. Para cada um dos cenários, ficheiros adicionais e distintos foram abertos para arquivamento dos resultados. O detalhamento da característica do respetivo cenário, como descrito na caixa de diálogo *Edit Scenarios* representado na Figura 42, possibilitou a inclusão de uma descrição para identificação do cenário configurado.

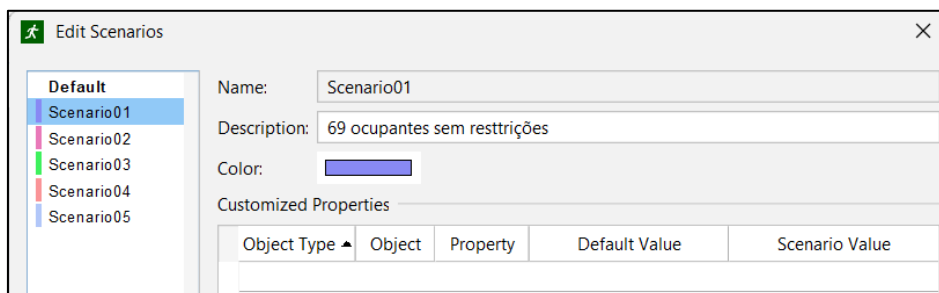


Figura 42 - Edição de Cenários - Cenário 1

No início da rotina prevista pelo software de simulação Pathfinder, uma caixa de diálogo aberta pelo simulador retorna possíveis mensagens de erro sobre os agentes em situações que impossibilitem a evacuação, como a sobreposição inicial de agentes ou localizações inconsistentes em relação ao posicionamento na malha de navegação de determinadas zonas ou departamentos. Garantindo a correta análise e interpretação dos resultados, todos os cenários apresentados não demonstraram nenhuma inconsistência ou mensagem de erro. Com a validação da consistência do cenário, o simulador retorna o resumo (*Summary*), Figura 43, com as primeiras informações do resultado da execução da simulação.

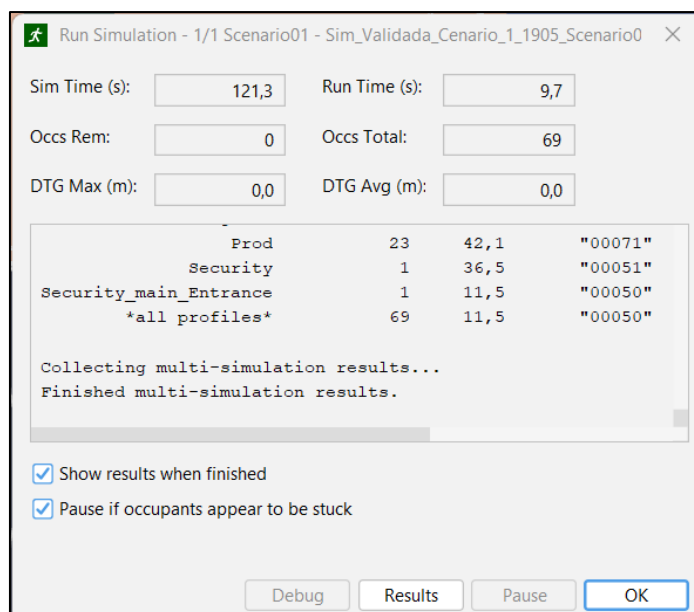


Figura 43 - Resultado Inicial da Simulação (*Summary*) - Cenário 1

A caixa de diálogo com o resumo sintetizou os indicadores macro da simulação, destacando o tempo necessário para a evacuação completa de todos os agentes (*Sim Time*), medido em segundos; o tempo computacional em segundos requerido pela CPU do computador para processar o modelo (*Run Time*); o número total de ocupantes no cenário (*Occs Total*) e o trecho de um relatório pouco mais detalhado gravado em ficheiro. Os dados detalhados que complementam esta interface são extraídos diretamente do ficheiro de resumo de saída do programa, *Summary.txt*, cujo fragmento textual é apresentado na Figura 44.

Resultados e Discussão

```

***SUMMARY***SUMMARY***SUMMARY***SUMMARY***SUMMARY***
Simulation:      Sim_Validada_Cenario_1_1905_Scenario01
Scenario:        Scenario01
Version:         2026.1.0121
Mode:           Steering
Total Occupants: 69

Completion Times for All Occupants (s):
Min:            27,0 "00026"
Max:            121,2 "00048"
Average:        66,4
StdDev:         20,0

Completion Times by Behavior (s):
Behavior Count Min Min_Name Max Max_Name Avg StdDev
Adm_1      28 27,0 "00026" 86,0 "00038" 52,8 12,4
Cantine    7 34,1 "00073" 94,7 "00074" 60,5 20,5
General     1 60,3 "00063" 60,3 "00063" 60,3 0,0
Maintenance 7 73,4 "00049" 121,2 "00048" 91,1 16,2
Managment   2 75,6 "00057" 84,5 "00064" 80,1 4,4
Prod       22 53,1 "00093" 108,0 "00029" 74,3 15,5
Security_Main_Entrance 1 99,6 "00050" 99,6 "00050" 99,6 0,0
Security_Plant 1 90,0 "00051" 90,0 "00051" 90,0 0,0
*all behaviors* 69 27,0 "00026" 121,2 "00048" 66,4 20,0

```

Figura 44 - Conteúdo Inicial do Ficheiro Summary.txt

O trecho inicial do conteúdo do ficheiro summary.txt que resume os resultados principais de tempos de evacuação, distâncias percorridas, e detalhamento por *Behavior* e *Profile*, e os valores médios para cada perfil analisado no cenário avaliado. Este relatório permitiu monitorizar os resultados mínimos, máximos e médio de cada agente no modelo, com destaque individual aos ocupantes com os desempenhos mínimos e máximos. Com o objetivo de estruturar estas saídas de forma analítica e para fins de comparação, as principais informações dos ficheiros, foram consolidadas na Tabela 9 com as informações de resumo (*summary*) e dos ocupantes (*occupants*).

Tabela 9 - Resultados Cenário 1

Métrica	Cenário 1
Ocupantes (peões)	69
Tempo Mínimo de Evacuação (s)	27,0
Ocupante Mais Rápido	0026 - Estagiário
Tempo Máximo de Evacuação (s)	121,2
Ocupante Mais Lento	0048 - Manutenção
Tempo Médio de Evacuação (s)	66,4
Distância Mínima Percorrida (m)	11,5
Ocupante com Menor Trajeto	0050 - Segurança
Distância Máxima Percorrida (m)	132,8
Ocupante com Maior Trajeto	0048 - Manutenção
Distância Média Percorrida (m)	62,7

Neste cenário 1 proposto como referência para o horário, sem nenhuma restrição as saídas ou acessos da edificação, o tempo total de evacuação simulado foi de 121.2 segundos. Foi possível observar um conjunto de distâncias percorridas entre 62.7 e 132.8 metros, o que reflete a dispersão dos ocupantes dentro da edificação fabril. Com a o modo *Steering* selecionado garantiu-se a autonomia dos agentes nas escolhas das suas rotas de fuga. A evolução no decorrer do tempo de evacuação do número de ocupantes dentro das dependências da unidade fabril (*Remaining*) e os que concluíram e alcançaram uma das saídas (*Exited*) foi

apresentada com o uso de um gráfico de linhas para cada um dos parâmetros observados na Figura 45.

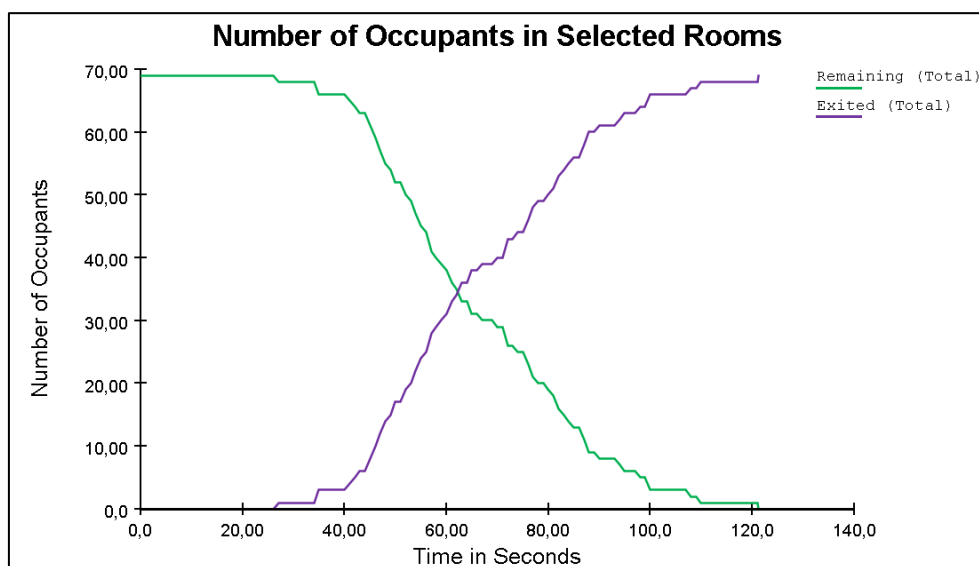


Figura 45 - Evolução do Número de Ocupantes na Evacuação - Cenário 1

Conforme indicado na curva de evacuação ocorreu o registro de saída do primeiro trabalhador exatamente ao tempo de 27,0 segundos. Este intervalo inicial representa o tempo de deslocamento do peão localizado mais próximos a uma das portas externas, transcorrendo de forma livre antes que congestionamentos pudessem saturar e causar retenções no trajeto até à saída escolhida. A somatória da área sob os gráficos do instante zero até o instante 121,2 segundos, que registra a última saída, permanece constante com a compensação de acrescentar um ocupante ao número dos que finalizaram o objetivo da evacuação (*Exited*) para cada decréscimo no número de ocupantes que permanecem dentro das instalações da empresa (*Remaining*).

O comportamento do fluxo de pessoas, no momento de pico de ocupação, na área externa localizada na área frontal da empresa entre as linhas de saída dos pontos de encontro 1 e 2, e a rampa de saída do pavilhão, podem ser visualizados na modelagem tridimensional apresentada na Figura 46.



Figura 46 - Vista 3d da Ocupação do Pátio Frontal (A) da Empresa - Cenário 1

O destaque (A), com 141,63 m², demonstrou os ocupantes no pátio frontal da empresa em deslocamento às saídas 1 e 2. O contexto do modelo e do cenário 1 é de que cada um dos ocupantes tem livre escolha para chegar a um dos pontos de encontro, indicados com os números 1, 2 e 3 dentro de círculos demarcados no piso. O pico de 14 ocupantes, no tempo de 44 segundos da evacuação de emergência, tempo em que se obteve a maior quantidade de agentes no trecho da malha de navegação (*Room687*) nomeada como área frontal (*Front Area*), pode ser verificado simultaneamente na vista 3d da zona (A) e no gráfico da Figura 47.

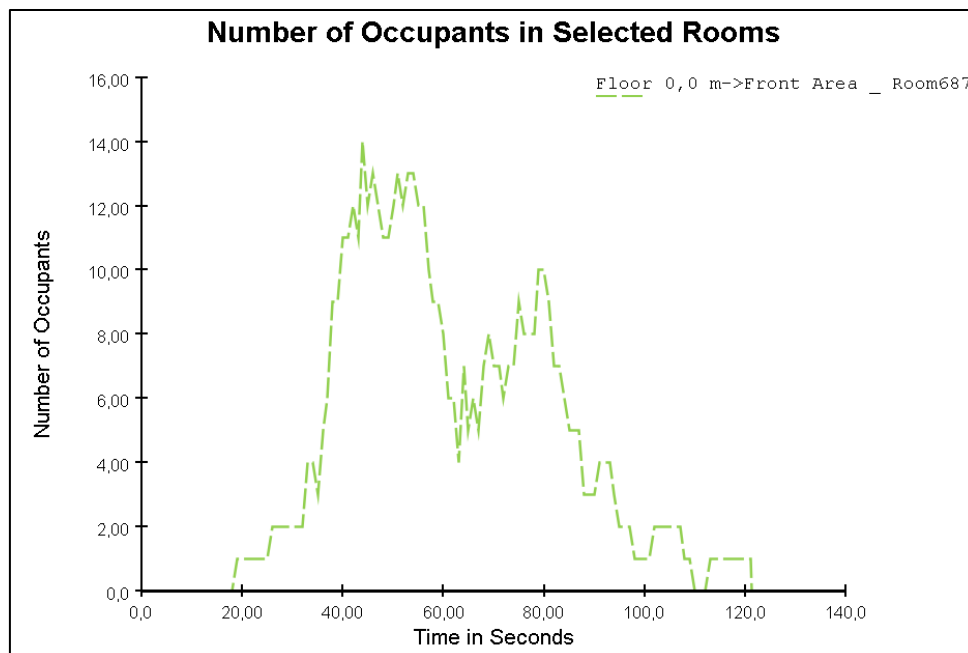


Figura 47 - Número de Ocupantes no Pátio Frontal da Empresa - Cenário 1

O gráfico permitiu quantificar e detalha o número de ocupantes no pátio frontal durante todo o evento de evacuação. No momento do pico aos 44.0 segundos a densidade foi de 0,10 pessoas/m². Este trecho da malha de navegação foi escolhido para ser analisado por canalizar a passagem dos agentes antes da finalização de seu respectivo trajeto de saída na evacuação; independentemente da saída escolhida. À exceção do agente de segurança, posicionado na portaria de entrada peões, os demais ocupantes passam pela área frontal. Ao longo do tempo é possível observar a variação do número de pessoas neste local, com um movimento de redução na parte final da evacuação, após decorridos 80.0 segundos.

Sem restrições para as saídas, e a liberdade de escolha dos agentes para a saída mais próxima, monitorizou-se a taxa de escoamento, detalhada na , Figura 48, em cada acesso criado par as áreas de saída 1, 2, e 3.

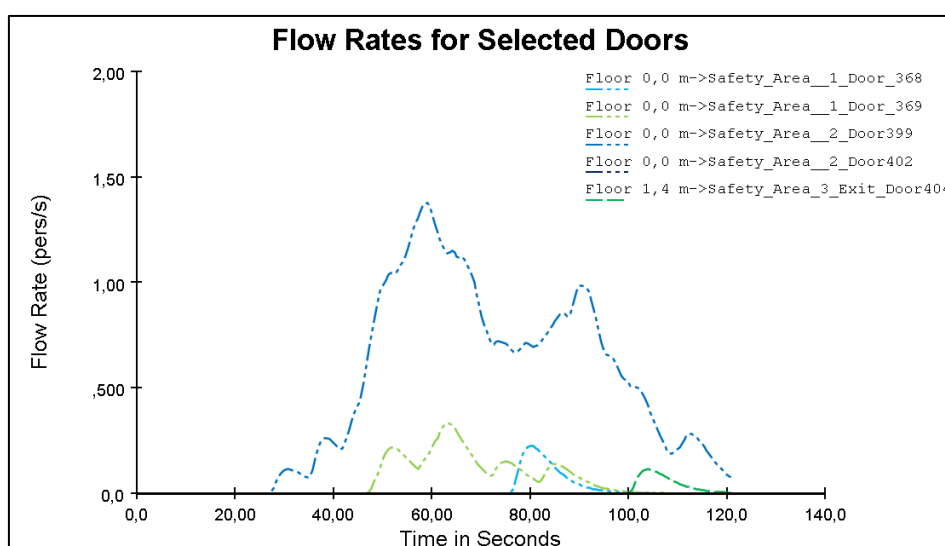


Figura 48 - Fluxo de Pessoas nas Zonas de Saída - Cenário 1

Representado graficamente na Figura 48, o comportamento do fluxo dinâmico através destas passagens, tendo maior taxa de fluxo na Zona 2 (*Door399*) e na sequência com a utilização da zona 1 em suas duas linhas de passagem (*Door368* e *Door369*) e por fim da zona 3 (*Door404*) utilizada apenas pelo agente de segurança no intervalo compreendido entre 100 e 120 segundos.

A análise combinada da taxa do fluxo de pessoas saídas e da acumulação no pátio frontal revela que a orientação da decisão dos agentes para a decisão de rota de saída restrições geométricas permitiu aos agentes usufruir de total liberdade de escolha, orientando as suas decisões de rota em direção à saída geometricamente mais próxima. Tendo o pátio frontal com liberdade de deslocamento para as zonas de saída 1 e 2, a redução no número de ocupantes demonstrados no intervalo entre 60 e 80 segundos do evento, não caracterizou um gargalo, demonstrando uma consequência do deslocamento dos agentes de diferentes pontos das instalações fabris, fazendo com que o fluxo não fosse constante neste ponto e, configurando outros quatro aumentos da densidade de pessoas no pátio frontal no mesmo intervalo da evacuação. O tempo total de evacuação de 121.2 segundos servirá como linha de base referencial para confrontar

com os resultados dos próximos cenários deste horário, com mesma ocupação e com restrições de *layout*.

4.1.2. Cenário 2 – 69 Ocupantes com Zonas de Saída 1 e 2 Bloqueadas

O Cenário 2 foi concebido com o propósito de observar a capacidade de escoamento da infraestrutura utilizada neste trabalho sob a condição de ter apenas uma saída das instalações via o portão de acesso de peões, mantendo a matriz populacional de 69 ocupantes parametrizada no período da manhã. Diferentemente da condição de referência avaliada no Cenário 1, este modelo introduziu restrições físicas relacionadas as rotas de fuga, como demonstrado na Figura 49, simulando um sinistro ou evento operacional que resultasse no bloqueio total das zonas de ponto de encontro 1 e 2, zonas situadas dentro dos limites perimetrais da empresa e selecionadas pelos ocupantes prioritariamente no cenário 1.

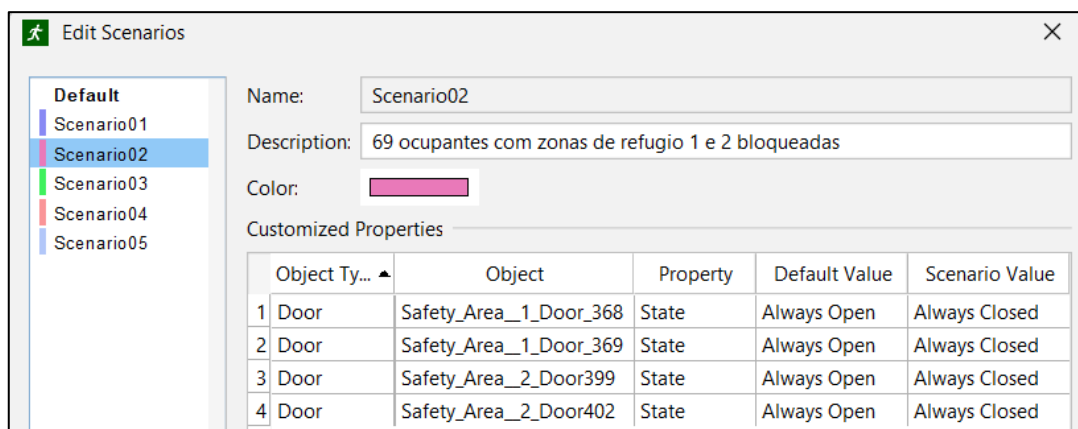


Figura 49 - Edição de Cenários - Cenário 2

A imposição destas barreiras físicas, nas zonas 1 e 2, alterou o valor por defeito (*Default*) de sempre aberto (*Always Open*) para a situação de sempre fechado (*Always Closed*), impactando na forma de conectividade da malha de navegação, eliminando as alternativas de saída que a princípio proporcionaram a redução dos tempos de evacuação no cenário anterior. À semelhança do protocolo executado no Cenário 1, o algoritmo do software Pathfinder correu uma rotina automática de consistência antes da compilação dos dados numéricos, garantindo que nenhum agente ficasse isolado em zonas da edificação sem saída. Após a validação estrutural do modelo modificado, a interface gráfica do simulador reportou o sumário inicial, apresentado na Figura 50, com os novos macro indicadores de processamento.

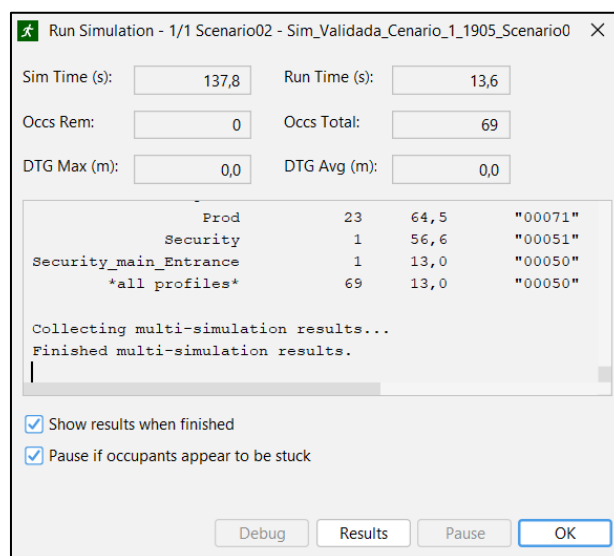


Figura 50 - Resultado Inicial da Simulação (Summary) - Cenário 2

Os indicadores macro exibidos evidenciam o impacto imediato das obstruções sobre a cinemática global dos peões. O tempo necessário para o abandono total do ambiente (*Sim Time*) e o tempo computacional requerido pelo processador (*Run Time*) sofreram acréscimos significativos devido à complexidade acrescida no cálculo dinâmico de desvios de rota efetuado pelo simulador Pathfinder. Para uma decomposição detalhada deste comportamento, o simulador exportou o arquivo de resumo. A consolidação dos principais tempos limites e distâncias encontram-se reproduzidos na Tabela 10 e em comparação com o Cenário 1.

Tabela 10- Resultados Cenário 2

Métrica	Cenário 1	Cenário 2	Diferença Absoluta (s)	Variação Relativa (%)
Ocupantes (peões)	69	69	-	-
Tempo Mínimo de Evacuação (s)	27,0	44,1	17,1	63,33%
Ocupante Mais Rápido	0026 - Estagiário	0026 - Estagiário	-	-
Tempo Máximo de Evacuação (s)	121,2	137,7	16,5	13,61%
Ocupante Mais Lento	0048 - Manutenção	0048 - Manutenção	-	-
Tempo Médio de Evacuação (s)	66,4	86,1	19,66	29,59%
Distância Mínima Percorrida (m)	11,5	13,0	1,5	13,04%
Ocupante com Menor Trajeto	0050 - Segurança	0050 - Segurança	-	-
Distância Máxima Percorrida (m)	132,8	150,8	18	13,55%
Ocupante com Maior Trajeto	0048 - Manutenção	0048 - Manutenção	-	-
Distância Média Percorrida (m)	62,7	80,8	18,15	28,97%

Para o Cenário 2, com a necessidade da utilização da saída com um trajeto alargado contemplando adicionalmente um lanço de escada e passagem no portão de acesso de peões, o primeiro impacto foi no tempo de saída do primeiro ocupante que teve um acréscimo de 17.1 segundos, notando-se que o tempo comparado tem como referência o mesmo ocupante (0026 – Estagiário). O tempo médio de evacuação demonstrou um aumento de 29.59% com um aumento de 19.66 segundos. A máxima distância percorrida, ocorrida para o mesmo agente nos dois cenários, foi acrescida de 18.0 metros chegando a 150.8 metros para o trabalhador do departamento de Manutenção. Com um aumento de 28.97% nas distâncias médias percorridas, onde os agentes percorreram trajetórias mais longas para superar as zonas interdidas, o

tempo total de evacuação teve um acréscimo equivalente a 13.61% e alcançou 137.7 segundos, demonstrando uma performance com 16.5 segundos de acréscimo ao Cenário 1.

A nova dinâmica cronológica associada as saídas das instalações fabris sob estas condições adversas foram mapeadas graficamente no gráfico de linhas da Figura 51, com o deslocamento do ponto de início da saída efetiva de 27.0 para 44.1 segundos para o primeiro ocupante em situação de fora de risco.

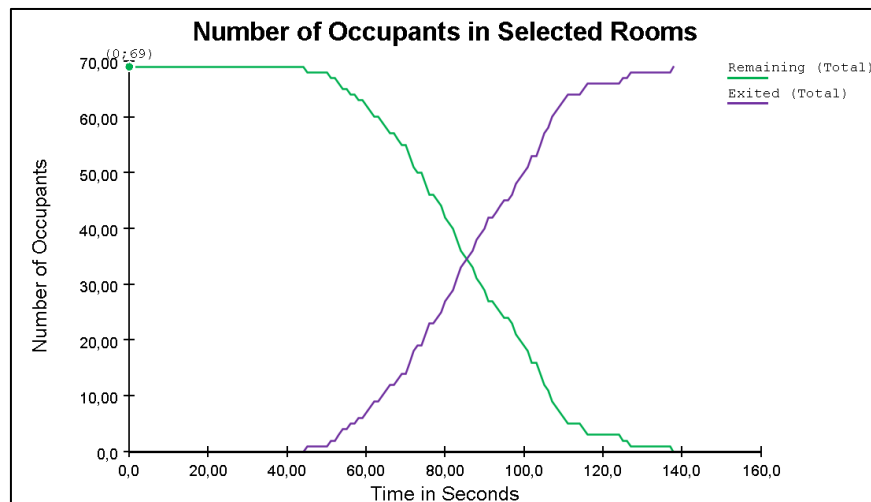


Figura 51 - Evolução do Número de Ocupantes na Evacuação - Cenário 2

Este atraso inicial é o resultado direto do tempo gasto pelos agentes no reconhecimento do bloqueio e na subsequente tomada de decisão para reorientar a sua caminhada em direção a outra saída disponível. A alteração no comportamento do fluxo e a acumulação física de peões nas zonas frontal da empresa pode ser observada na perspectiva tridimensional do modelo, ilustrada na Figura 52.



Figura 52- Vista 3d da Ocupação do Pátio Frontal (A) da Empresa - Cenário 2

A vista 3d do pátio frontal (A), ilustrou o bloqueio das zonas 1 e 2 de saída e o redirecionamento para a zona de saída 3. A densidade de agentes acumulados na zona do pátio frontal, que continuou a atuar como o único recetor da quase totalidade dos ocupantes do edifício, está representada graficamente na Figura 53.

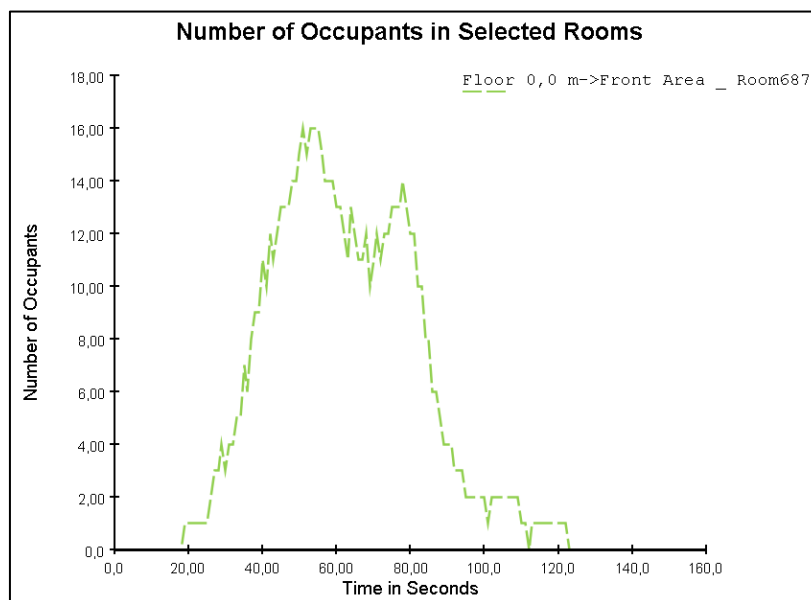


Figura 53 - Número de Ocupantes no Pátio Frontal da Empresa - Cenário 2

Em comparação com o Cenário 1, o gráfico do número de ocupantes na zona frontal da empresa demonstra uma curva de acumulação com um pico superior ao registado no Cenário 1, com uma densidade de 0.11 pessoas/m², sem apresentar queda expressiva entre 20 e 80 segundos, mantendo-se um maior contingente de pessoas em direção a única saída via passagem principal de entrada de peões na empresa. Nota-se também que a diferença entre o tempo final do gráfico analisado e do tempo total de evacuação decorre da necessidade do último ocupante percorrer o trajeto de deslocamento em direção a zona 3 depois de sair da zona frontal.

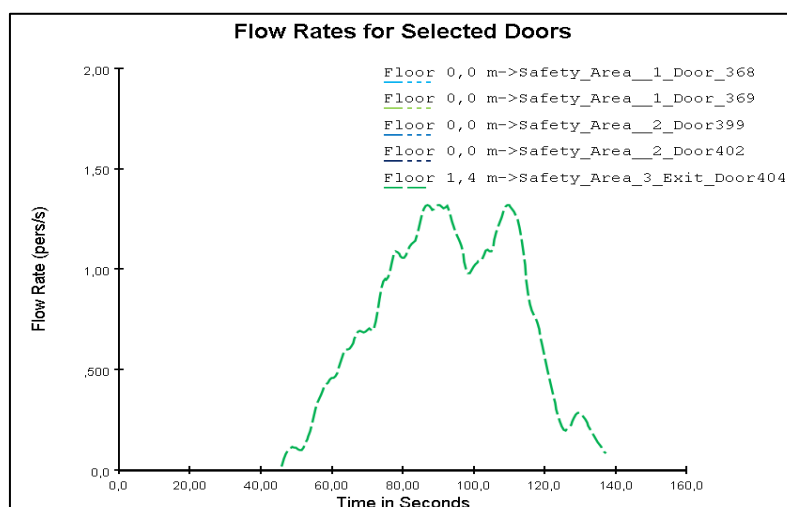


Figura 54 - Fluxo de Pessoas nas Zonas de Saída – Cenário 2

A curva do gráfico de fluxo apresentou na Figura 54 a única saída disponível (*Door404*), possuindo similaridades com a curva de ocupação do pátio frontal. Com este cenário é possível aproximar a situação onde o abandono completo das instalações seja necessário, tendo em vista que a única zona de ponto de encontro do cenário localiza-se na área externa à empresa, trazendo resultados de um cenário de abandono completo das instalações.

4.1.3. Cenário 3 – 69 Ocupantes com Rampa de Entrada da Edificação Bloqueada

Para o cenário 3 utilizou-se a base do cenário 1 de referência em relação a distribuição dos ocupantes e horário de simulação das 07h00, com a inserção da obstrução física completa de uma rampa de acesso ao pavilhão principal.

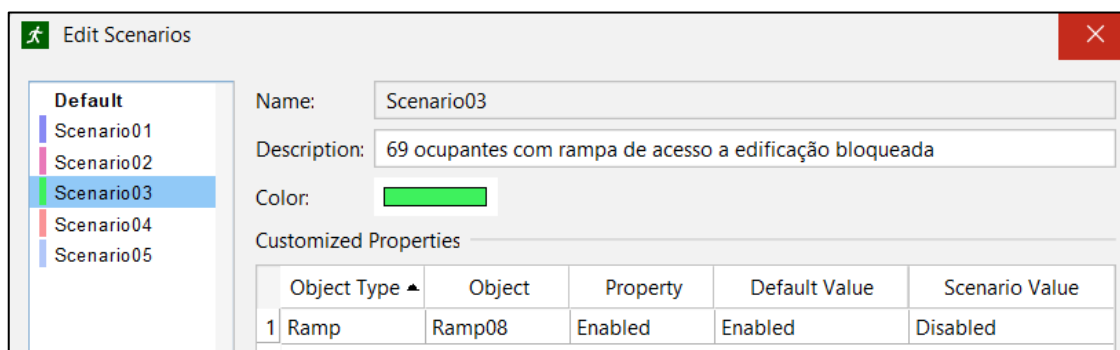


Figura 55 - Edição de Cenários - Cenário 3

O bloqueio da rampa de acesso (*Ramp08*) ao pavimento de produção foi registado na Figura 55, para ajustar o cenário de referência para esta simulação com a preservação das demais características e número de ocupantes por zonas de produção e departamentos. Com a rampa bloqueada os agentes com direcionamento para a região de saída do pavimento 01, na cota de nível de 0 metro, Figura 56, tinham como opção a passagem pela zona em frente aos banheiros e corredor de acesso ao restaurante.



Figura 56 - Saída da Zona de Produção com Rampa Bloqueada - Cenário 3

Esta configuração teve como objetivo observar e analisar o comportamento dos agentes e alterações no fluxo de pessoas por uma passagem (B) em direção a zona (A). Na prática esta rota é usualmente utilizada como acesso aos balneários, refeitório e ao lance de escada para o pavimento de escritórios, e que no limite permite acesso a zona frontal da empresa. A passagem (B) analisada foi selecionada pelos ocupantes durante a evacuação com o bloqueio total da rampa, utilizada prioritariamente no cenário 1.

A Tabela 11 lista as métricas do Cenário 3 e compara com o Cenário 1, avaliando a diferença absoluta e a variação relativa para determinadas métricas.

Tabela 11 - Resultados Cenário 3

Métrica	Cenário 1	Cenário 3	Diferença Absoluta (s)	Variação Relativa (%)
Ocupantes (peões)	69	69	-	-
Tempo Mínimo de Evacuação (s)	27,0	27,0	0,0	0,00%
Ocupante Mais Rápido	0026 - Estagiário	0026 - Estagiário	-	-
Tempo Máximo de Evacuação (s)	121,2	119,5	-1,7	-1,40%
Ocupante Mais Lento	0048 - Manutenção	0027 - Composto	-	-
Tempo Médio de Evacuação (s)	66,4	67,2	0,8	1,14%
Distância Mínima Percorrida (m)	11,5	11,5	0,0	0,00%
Ocupante com Menor Trajeto	0050 - Segurança	0050 - Segurança	-	-
Distância Máxima Percorrida (m)	132,8	142,0	9,2	6,93%
Ocupante com Maior Trajeto	0048 - Manutenção	0027 - Composto	-	-
Distância Média Percorrida (m)	62,7	60,6	-2,1	-3,27%

Mesmo com um cenário de bloqueio de uma rampa de acesso ao pavimento principal de produção observou-se uma redução no tempo de evacuação total de 1.7 segundos, com uma redução de 1,40% em comparação ao cenário de referência nomeado como cenário 1. O tempo mínimo de evacuação não foi impactado, com o mesmo agente do cenário de referência finalizando o percurso em 27.0 segundos. Em relação às distâncias percorridas a mínima não teve alteração, por considerar o agente de segurança dentro do posto de vigilância próximo a entrada principal de peões. Para o valor médio da distância percorrida houve uma redução de 3.27% registrando o valor de 60.6 metros. Ao observar o valor da máxima distância percorrida nota-se a maior variação percentual dos parâmetros avaliados neste cenário com um acréscimo de 6,93% ao computar a distância de 142.0 metros percorridos para o peão do departamento de Composto na zona de produção.

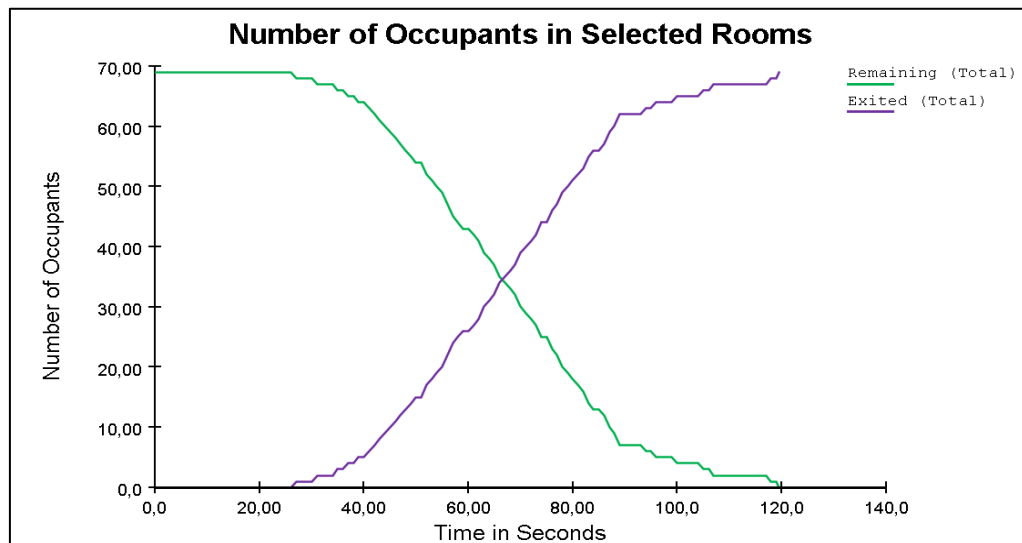


Figura 57 - Evolução do Número de Ocupantes na Evacuação - Cenário 3

Semelhante ao indicado na curva de evacuação do cenário 1, a curva na Figura 57, registra a saída do primeiro ocupante exatamente ao tempo de 27.0 segundos. Este intervalo inicial representa o tempo de deslocamento do agente localizado, próximo ao restaurante e mais próximo a uma das portas externas, transcorrendo de forma livre antes da chegada de mais peões na zona em frente ao corredor do restaurante, corredor que teve seu fluxo alterado pelo bloqueio da rampa dentro deste cenário. Em comparação ao cenário 1 as curvas de ocupantes dentro das instalações e que já realizaram a evacuação demonstram grande similaridade, reforçando a questão de um menor tempo final neste cenário. Para este cenário foi necessário resgatar um gráfico do cenário de referência, para efeito de comparação como ilustrado na Figura 58, para avaliação do número de peões na zona em frente aos balneários.

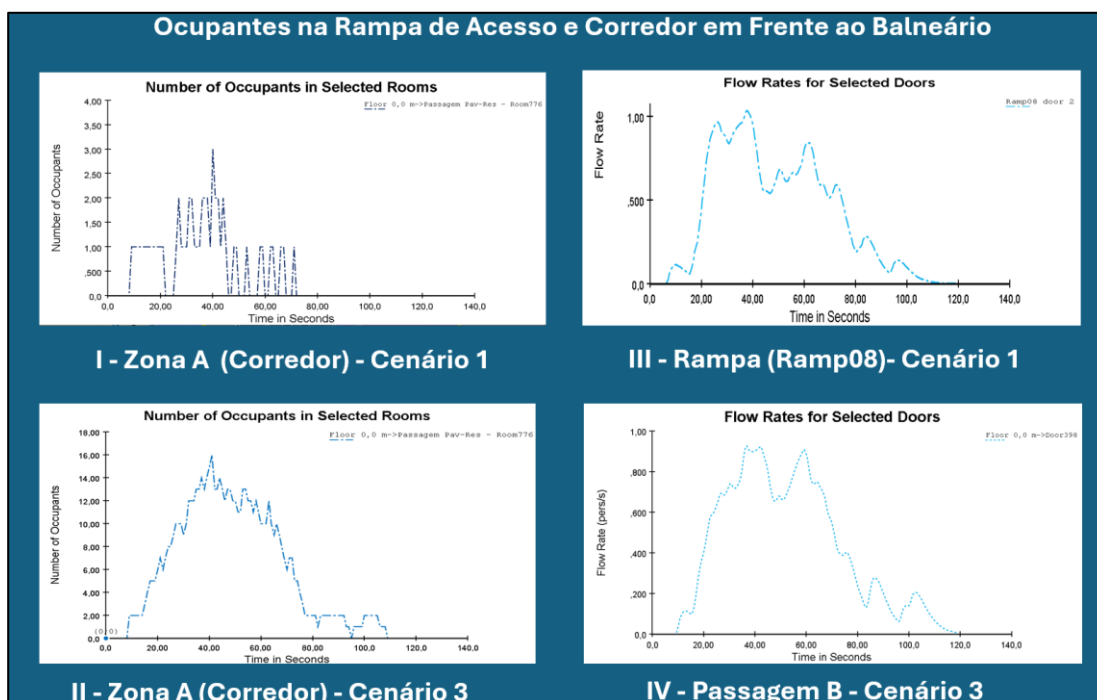


Figura 58 - Ocupantes e Fluxo na Rampa e Corredor de Saída do Pav. 01 - Cenários 1 e 3

Nota-se, no Cenário 3, um aumento expressivo do número de peões no corredor (II), Figura 58, sem tão pouco comprometer o resultado da evacuação, em relação ao tempo total, enquanto o cenário 1 apresenta um número de ocupantes menor no corredor (I), oriundos exclusivamente das áreas de balneários e restaurante. Os resultados tendem a demonstrar a resiliência da edificação, para o nível de ocupação de 69 pessoas, em relação a opções em situações críticas na evacuação de emergência. Com uma análise adicional dos gráficos dos cenários 1 e 3, foi possível observar que todo o fluxo original e exclusivo da saída do pavimento de produção por meio da rampa no cenário 1 (III), migrou para a passagem B (IV) durante a simulação do cenário 3, com uma distribuição aproximada entre os dois cenários, o que se justifica nos tempos próximos de evacuação total dos modelos em ambos cenários.

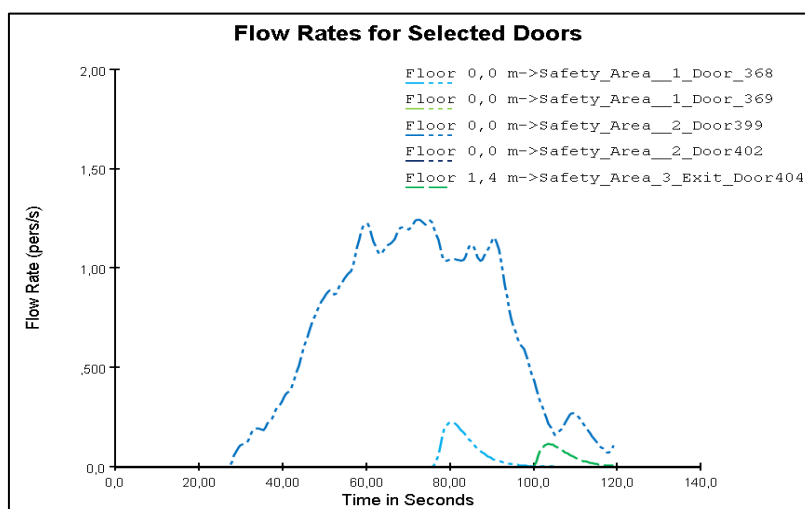


Figura 59 - Fluxo de Pessoas nas Zonas de Saída - Cenário 3

Ao Contrário do Cenário 1, em qual alguns peões selecionaram a zona de ponto de encontro e saída 1, ocorreu uma maior escolha pela zona de saída 2 como observa-se na Figura 59. A nova escolha justifica-se pela mudança do redirecionamento do fluxo de peões do pátio em frente ao armazém para a zona em frente ao lance de escada de acesso aos escritórios, zona mais próxima a saída 2. A opção de escolha prioritária da saída 2, motivada pelo redirecionamento e não aumento do fluxo de pessoas no pátio central, colaborou diretamente para a melhor performance do tempo total de evacuação registada neste cenário, para 69 ocupantes.

4.1.4. Cenário 4 – 69 Ocupantes com Lanço de Escada aos Escritórios Bloqueada

Com o impedimento para o uso do lanço de escada principal de acesso à zona de escritórios no pavimento localizado acima do pavimento principal, nomeado Cenário 4; preservou-se as demais condições do cenário 1. A impossibilidade do uso do lanço de escada que serve a zona administrativa de escritórios no pavimento 02 teve como objetivo analisar a utilização de outro lanço de escada alternativo. O segundo lanço de escadas interliga o pavimento 02 ao pavimento 01 na zona de produção. A Tabela 12 consolida os resultados do cenário proposto em comparação ao cenário 1.

Tabela 12 - Resultados Cenário 4

Métrica	Cenário 1	Cenário 4	Diferença Absoluta (s)	Varição Relativa (%)
Ocupantes (peões)	69	69	-	-
Tempo Mínimo de Evacuação (s)	27,0	27,0	0,0	0,00%
Ocupante Mais Rápido	0026 - Estagiário	0026 - Estagiário	-	-
Tempo Máximo de Evacuação (s)	121,2	121,2	0,0	0,00%
Ocupante Mais Lento	0048 - Manutenção	0048 - Manutenção	-	-
Tempo Médio de Evacuação (s)	66,4	68,4	2,0	2,95%
Distância Mínima Percorrida (m)	11,5	11,5	0,0	0,00%
Ocupante com Menor Trajeto	0050 - Segurança	0050 - Segurança	-	-
Distância Máxima Percorrida (m)	132,8	132,8	0,0	0,00%
Ocupante com Maior Trajeto	0048 - Manutenção	0048 - Manutenção	-	-
Distância Média Percorrida (m)	62,7	67,8	5,2	8,22%

O tempo mínimo e máximo de evacuação encontrados para o Cenário 4 e para o Cenário 1 demonstraram que a obstrução não causou impacto no resultado da evacuação. Entretanto, para este cenário, com valores de tempo de evacuação muito próximos, fez-se necessário uma análise envolvendo outro ficheiro gerado pelas simulações incluindo o tempo de congestionamento durante o evento de evacuação apresentados na Tabela 13.

Tabela 13 – Resultados com Métricas de Congestionamento - Cenário 4

Métricas	Cenário 1	Cenário 4	Diferença Absoluta (s)	Variação Relativa (%)
Restrições	Nenhuma	Escada Bloqueada	-	-
Tempo de Evacuação (s)	121,2	121,2	0,0	0,00%
Tempo mínimo de evacuação (s)	26,95	26,95	0,00	0,00%
Tempo máximo de evacuação (s)	121,18	121,18	0,00	0,00%
Tempo médio de evacuação das pessoas (s)	66,44	68,42	1,98	2,98%
Distância Mínima percorrida (m)	11,51	11,51	0,00	0,00%
Distância Máxima percorrida (m)	132,79	132,79	0,00	0,00%
Distância média percorrida (m)	62,65	67,78	5,13	8,19%
Tempo Mínimo de Congestionamento	0,83	0,83	0,00	0,00%
Tempo Máximo de Congestionamento	30,25	13,10	-17,15	-56,69%
Tempo Médio de Congestionamento	3,68	1,97	-1,71	-46,41%
Pico zona Frontal (occ)	14	12	-2,0	-14,29%
Densidade na Zona frontal (occ/m2)	0,10	0,08	-0,01	-14,29%

O primeiro impacto foi o de se obter o mesmo tempo de evacuação no cenário proposto em relação ao cenário sem restrições, 121.2 segundos. Com a análise dos demais resultados, observa-se que com os mesmos tempos mínimos e máximos de evacuação o tempo médio teve um acréscimo da ordem de 2.98%, passando de 66.4 segundos para 68.42 segundos. Com efeito similar nas distâncias percorridas, impulsionadas pela necessidade da utilização de um lanço de escada, localizada em direção a princípio contrário a saída, com os mesmos valores mínimos e máximos aconteceu um deslocamento do valor médio de 62.65 m para 67.78 m, um aumento de 8.19% no cenário atual. Em direção contrária ao tempo de evacuação e a distância percorrida o tempo de congestionamento médio reduziu 46,41%, passando de 3.68 segundos para 1.97 segundos; com o tempo máximo de congestionamento reduzindo 56,69%, apresentando queda de 30.25 segundos para 13.10 segundos.

Uma alternativa de menor congestionamento durante um evento de evacuação de emergência pode colaborar para não se aumentar o pânico, nervosismo ou *stress*, normalmente gerado em situações reais de emergência. A evolução da saída dos peões durante o evento de evacuação pode ser observada na Figura 60, incluindo uma comparação com o Cenário 1.

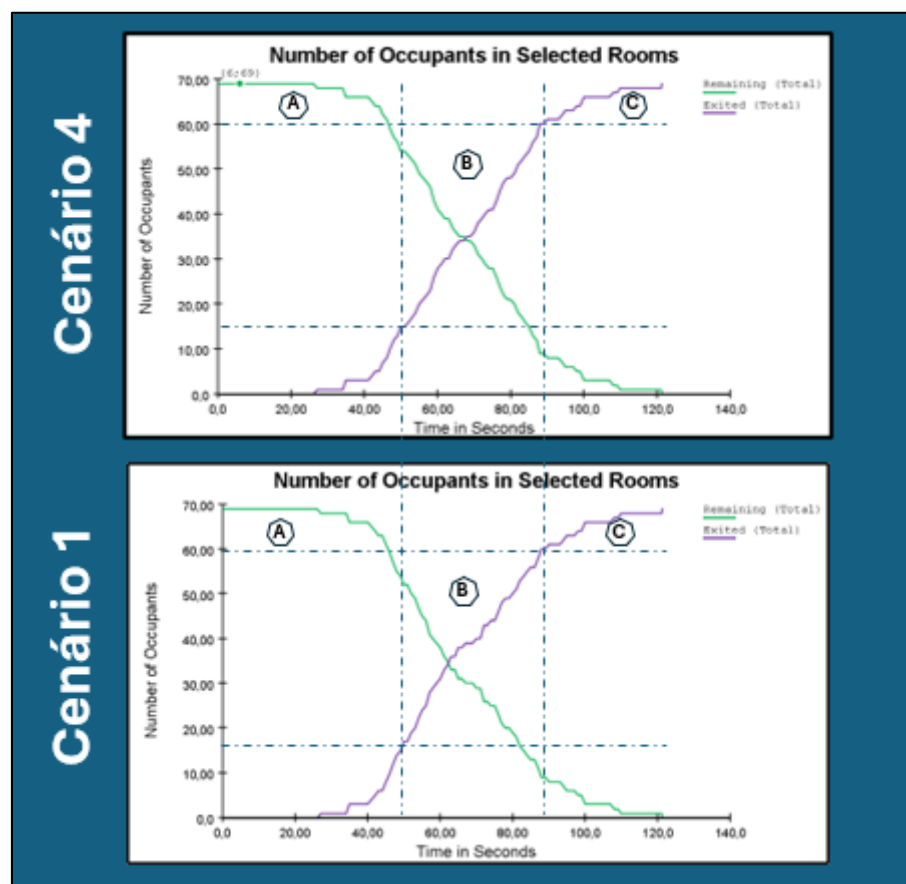


Figura 60 – Evolução do Número de Ocupantes - Cenários 1 e 4

A Figura 60 apresentou o comportamento das curvas de ocupantes na edificação e ocupantes que finalizaram a evacuação para os Cenários 1 e 4. O tempo total de evacuação foi dividido em três intervalos, nomeadamente, A, B e C. Graficamente é possível observar a similaridade nos intervalos A e C quanto ao número de ocupantes, internos e externos a edificação, no mesmo tempo decorrido do evento de evacuação em cada um dos cenários. No Cenário 4, na fase intermédia identificada no intervalo B, observa-se uma simetria entre as duas curvas com um processo mais constante do que o apresentado no Cenário 1. Embora ambos cenários atinjam marcas muito próximas ao final da evacuação a velocidade interna de escoamento durante a primeira metade do fragmento B para o Cenário 4 sofreu uma leve desaceleração, quando comparada com o cenário 1. Este fenómeno traduz graficamente o efeito da restrição de leiaute introduzidas com o bloqueio do lanço de escada, com aumento da distância média percorrida. A Figura 61 apresenta as restrições de leiaute com o bloqueio imposto neste Cenário 4.

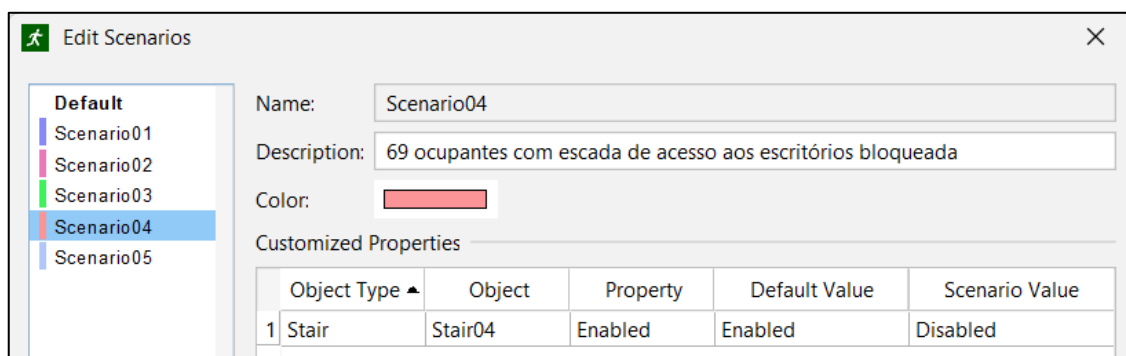


Figura 61 - Edição de Cenários - Cenário 4

Com uma alteração em relação ao Cenário 1, este novo cenário foi desenhado para inibir o acesso ao lance de escada (*Stair04*), que durante a simulação do cenário 1 teve seu uso de modo preferencial pelos ocupantes da área de escritório.



Figura 62 - Bloqueio de Saída do Pav. 02 com Lanço de Escada Bloqueada - Cenário 4

A situação de bloqueio e posicionamento dos lanços de escadas disponíveis para o pavimento 02 foram apresentadas na Figura 62. Com o bloqueio do lanço de escada (A), que permitia um acesso mais próximo a zona frontal e as zonas de saídas, os ocupantes da zona de escritórios tiveram apenas a opção da utilização do lanço de escada (C) com conexão dentro do pavimento de produção (D). O maior percurso ocasionado pela obstrução foi percebido no aumento médio

das distâncias percorridas pelos ocupantes durante a simulação deste cenário, com a necessidade de encontrar a opção válida de saída do pavimento 02.

O número de ocupantes simultâneos na área do pátio frontal da empresa foi representado para o cenário em estudo na Figura 63 e comparado com o Cenário 1.

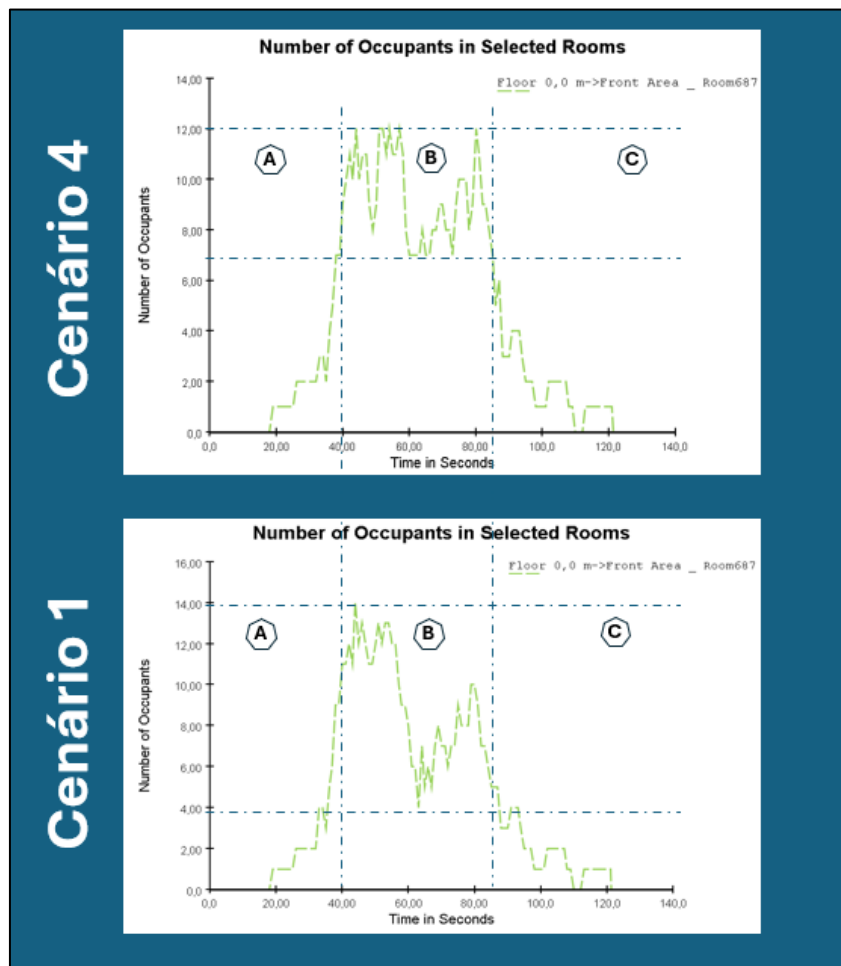


Figura 63 - Evolução do Número de Ocupantes no Pátio frontal - Cenários 1 e 4

Com a comparação das curvas de ocupação no pátio frontal, para os cenários 1 e 4, pode-se observar a similaridade dos resultados para os intervalos A e C das curvas dos cenários comparados. A diferença entre os cenários nota-se no trecho intermédio B, com cinco picos de 12 ocupantes simultâneos no Cenário 4, enquanto o Cenário 1 apresentou quatro picos superiores ao número de 12 ocupantes. A partir dos 40.0 segundos se evidenciam-se as maiores assimetrias, enquanto no Cenário 1 o pico de ocupação atinge os 14 indivíduos e decresce acentuadamente para um patamar mínimo de 4 agentes próximo dos 64.0 segundos, o Cenário 4 estabiliza num patamar elevado e persistente, flutuando entre os 7 e os 12 ocupantes durante quase todo o intervalo B. Este comportamento de elevado número de ocupantes e o vale menos pronunciado no fragmento B do Cenário 4 indicam que o obstáculo e o layout da fábrica provocaram um efeito de amortecimento e retenção, distribuindo a chegada dos peões de forma mais homogênea e lenta, o que evitou o mesmo pico de ocupação evidenciado no

primeiro cenário de estudo, mas estendeu a permanência do fluxo maior em relação ao primeiro cenário.

A análise do comportamento das linhas de saída por meio das taxas de fluxo especificadas na Figura 64, permite quantificar, sob a perspectiva da vazão de pessoas (*pers/s*), o impacto induzido pelas alterações de leiaute do Cenário 4 quando confrontadas com o Cenário 1.

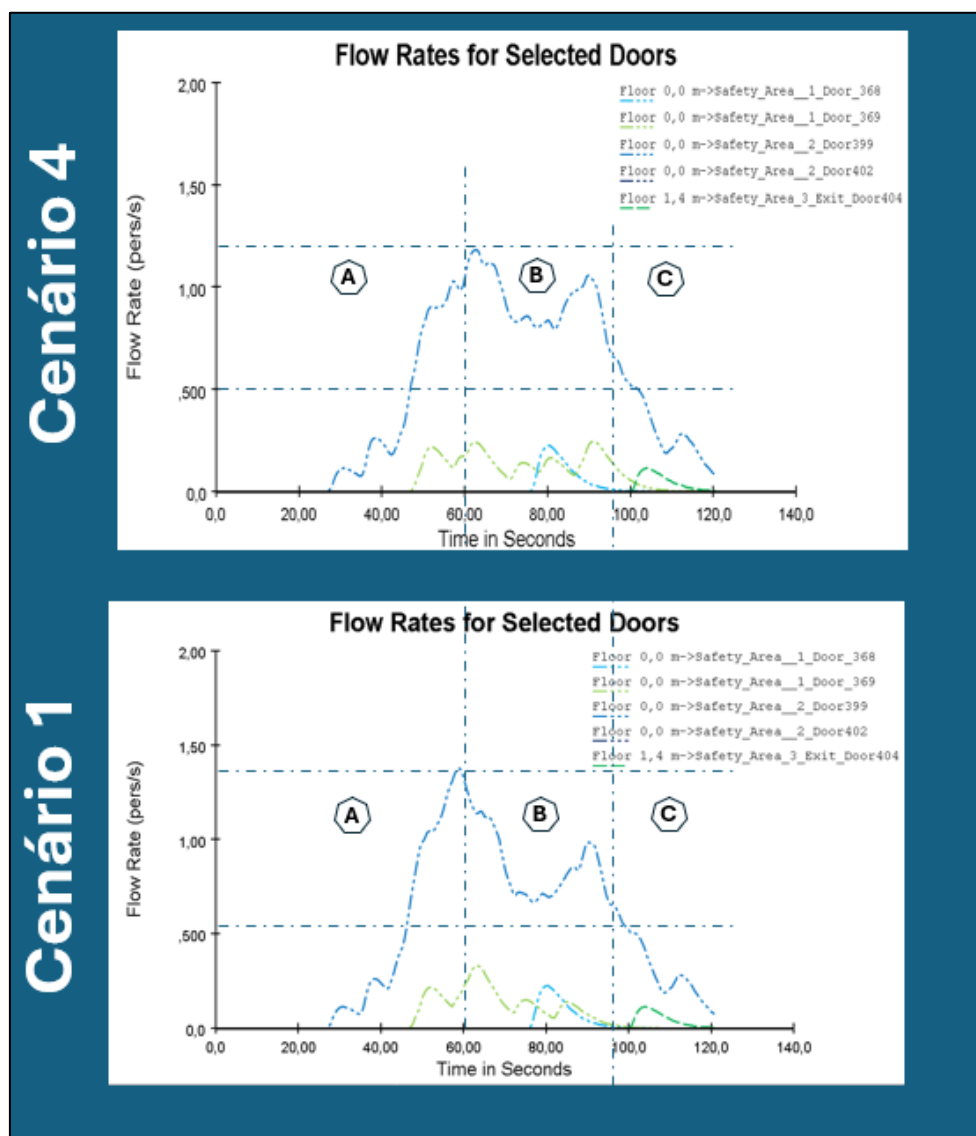


Figura 64 - Fluxo de Pessoas nas Zonas de Saída - Cenários 1 e 4

Na fase inicial de acréscimo de tráfego, no intervalo A, até aos 60.0 segundos, observa-se um perfil de convergência muito semelhante em ambos os cenários, no qual a curva da saída 2 (*Door_399*) assume o protagonismo do escoamento a partir dos 27.0 segundos, escalando de forma acentuada. Contudo, no limite de transição para o intervalo B, aos 60.0 segundos, o Cenário 4 atinge um pico de fluxo menos acentuado do que o Cenário 1, que apresentou um pico agudo e elevado. Esta diferença demonstra que a obstrução introduzida no cenário 4, com a retirada da opção de um dos lanços de escada, atuou como uma barreira ao impor uma restrição na velocidade de aproximação dos agentes as zonas de saída.

O cenário 4 diferentemente do cenário 1, exibiu uma curva de escoamento mais estável, homogênea, sem um vale profundo e sustentada no tempo dentro do intervalo B, mantendo-se firmemente acima do limiar aproximado de 0.80 pessoas por segundo, durante a maior parte do intervalo. Do ponto de vista da segurança contra incêndio, estes resultados comprovam que as obstruções aplicadas ao Cenário 4, embora tenham reduzido a vazão instantânea máxima na porta principal, geraram um efeito benéfico de regularização do fluxo, garantindo um escoamento contínuo e sem congestionamentos junto às saídas.

4.1.5. Cenário 5 – 21 Ocupantes Sem Restrições

O Cenário 5, o segundo cenário de referência, foi estruturado com o propósito de avaliar a dinâmica e a eficiência do sistema de evacuação sob uma condição de calma operacional, caracterizada pelo período de menor ocupação da unidade fabril. Para este efeito, o modelo computacional foi parametrizado com um contingente reduzido de 21 ocupantes, o qual reflete fielmente o censo populacional do turno da Noite que opera continuamente entre as 22h00 e as 06h00. O horário específico selecionado para a colheita de dados e avaliação do tempo de evacuação foi o das 03h00. À semelhança do protocolo adotado na linha de base do Cenário 1, esta configuração não incluiu quaisquer restrições geométricas, barreiras de armazenamento ou bloqueios físicos nas rotas de fuga, permitindo o livre escoamento dos agentes em direção às zonas de ponto de encontro originais da empresa.

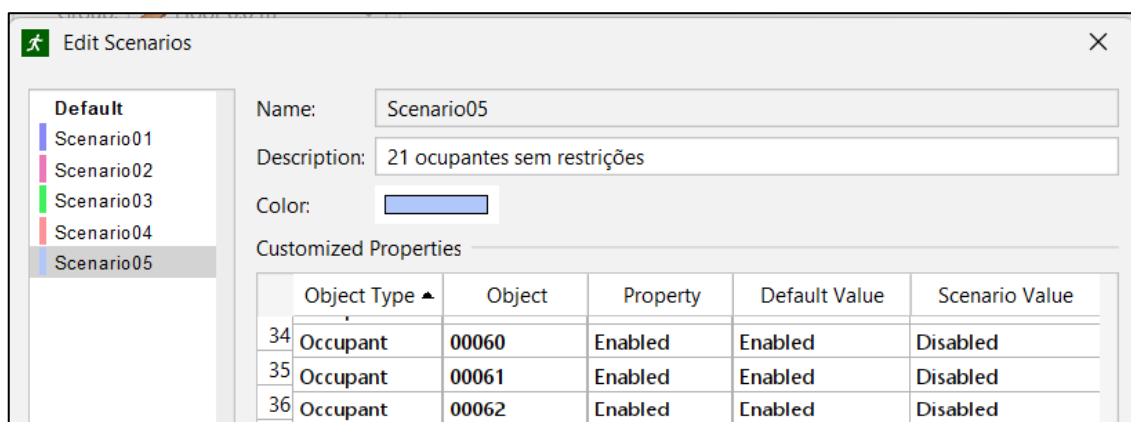


Figura 65 - Edição de Cenários - Cenário 5

A imagem da configuração do cenário 5, ilustrado na Figura 65, contemplou a redução de ocupantes de modo a adequar a condição da operação da empresa as 03h00 com uma ocupação reduzida e total de 21 trabalhadores, entre operadores e prestadores de serviço.

O algoritmo do *software* Pathfinder correu a sua rotina interna de diagnóstico estrutural, validando a integridade das trajetórias e a ausência de sobreposições de agentes. Após a conclusão bem-sucedida deste procedimento, a interface principal do programa exibiu a caixa de diálogo com os primeiros macro indicadores globais de processamento.

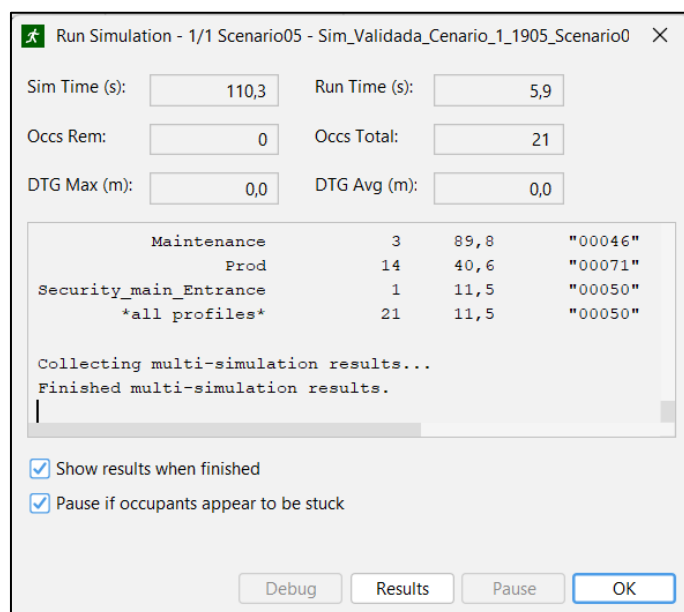


Figura 66 - Resultado Inicial da Simulação (Summary) – Cenário 5

A apresentação dos macro indicadores na Figura 66 evidenciam de forma imediata o impacto da redução populacional nos tempos de processamento. Tanto o tempo de desocupação (*Sim Time*) quanto o esforço computacional requerido pela CPU (*Run Time*) registaram os valores mais baixos de toda a matriz de ensaios, decorrente da menor complexidade algorítmica no cálculo de caminhos autónomos. De forma a extrair a decomposição dos principais parâmetros avaliados, a Tabela 14 reportou valores do ficheiro descritivo de resumo gerado pelo Pathfinder.

Tabela 14 - Resultados Cenário 5

Métrica	Cenário 5
Ocupantes (peões)	21
Tempo Mínimo de Evacuação (s)	34,1
Ocupante Mais Rápido	0073 - Limpeza
Tempo Máximo de Evacuação (s)	110,2
Ocupante Mais Lento	00044 - Manutenção
Tempo Médio de Evacuação (s)	74,9
Distância Mínima Percorrida (m)	11,5
Ocupante com Menor Trajeto	0050 - Segurança
Distância Máxima Percorrida (m)	122,3
Ocupante com Maior Trajeto	0048 - Manutenção
Distância Média Percorrida (m)	77,9

Neste Cenário 5, operando sob uma condição de fluxo livre e sem obstruções, o Tempo Total de Evacuação Simulado fixou-se em 110.2 segundos. Sob a perspetiva espacial, observou-se uma amplitude de distâncias percorridas compreendida entre 11.5 e 122.3 metros. Esta contração na distância máxima percorrida, quando comparada com os cenários diurnos, justifica-se pelo facto de as áreas administrativas e de escritórios se encontrarem totalmente desocupadas na madrugada, concentrando-se a população exclusivamente no pavimento 01, nas zonas de produção e portaria. A evolução cronológica associada à taxa de desocupação do pavilhão (*Remaining*) e à curva cumulativa de egressos (*Exited*) foi mapeada na Figura 67.

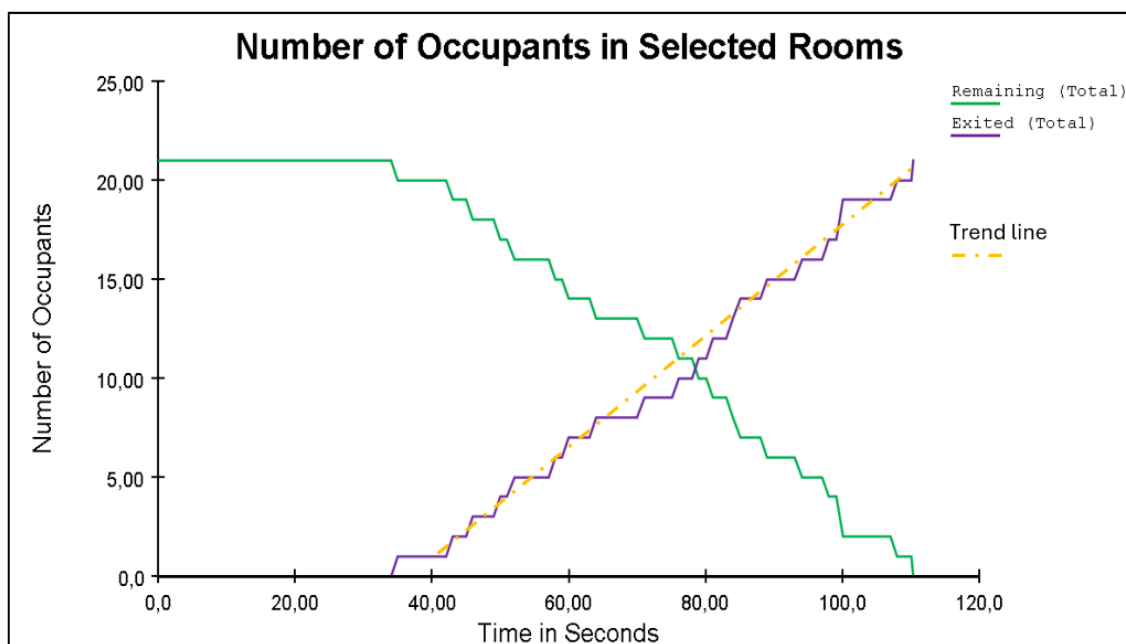


Figura 67 - Evolução do Número de Ocupantes na Evacuação - Cenário 5

O perfil da curva apresentado na Figura 67, a partir da saída do primeiro peão exibe um comportamento gráfico com maior espaçamento entre as movimentações que os cenários diurnos, o que proporcionou quando no limite de uma curva de tendência (*Trend Line*), para o intervalo com início após a primeira saída, um comportamento próximo ao linear. O registo de saída do primeiro ocupante pelas linhas de saída externas ocorreu aos 34.1 segundos. Com uma condição amena durante a madrugada e a diminuição de congestionamentos a fluidez do tráfego interno ao longo de toda a simulação podem ser visualizadas na Figura 68 com a perspectiva tridimensional (3d) do modelo.



Figura 68 - Vista 3d da Ocupação do Pátio Frontal (A) da Empresa - Cenário 5

O momento da simulação capturado no pátio frontal da empresa com a condição de pico de ocupação, evidencia que a densidade populacional teve um pico de 0,03 pessoas/m² na zona A. No acompanhamento da simulação de saída não se registou a formação de gargalos

operacionais (*bottlenecks*) internos. Uma vez efetuada a transição para o ambiente exterior (A), os agentes deslocaram-se diretamente para as zonas de saída. O comportamento numérico e a acumulação de pessoas identificados na Figura 69, apresenta o número de ocupantes no pátio frontal ao longo do tempo de simulação.

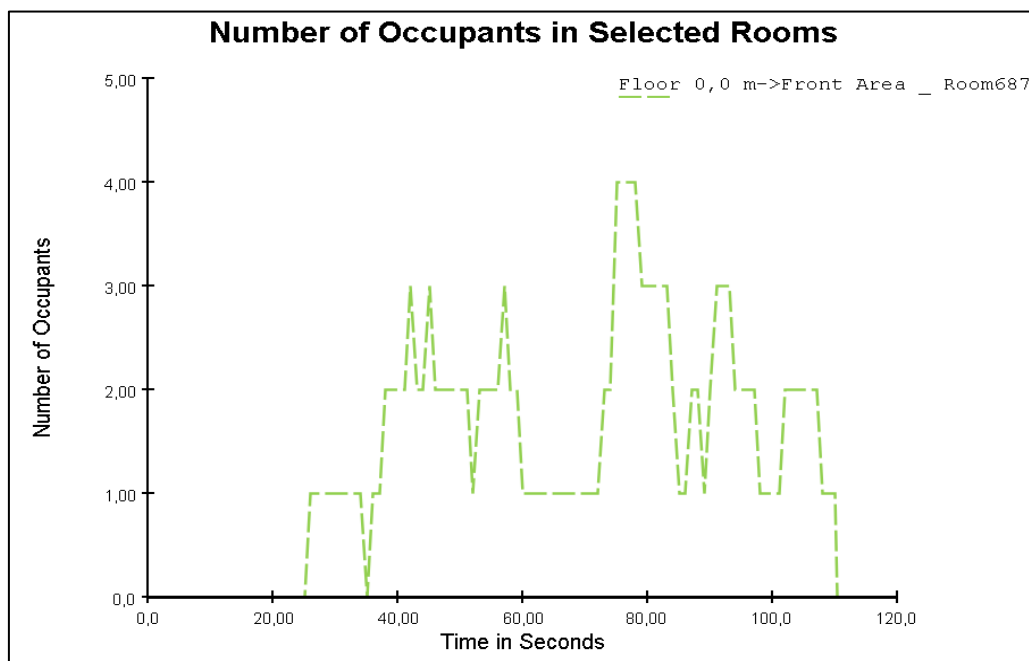


Figura 69 - Evolução do Número de Ocupantes no Pátio Frontal - Cenários 5

O número de ocupantes simultaneamente na zona frontal da empresa posicionou-se até 4 pessoas em função de uma melhor distribuição de saída, em decorrência do reduzido número de trabalhadores no horário analisado, proporcionando desta forma uma evacuação consistente.

A análise cruzada entre a taxa de fluxo e a acumulação no pátio, apresentadas nas Figura 69 e Figura 70 nomeadamente, esclarece o comportamento hidráulico da infraestrutura quando submetida a baixas cargas populacionais.

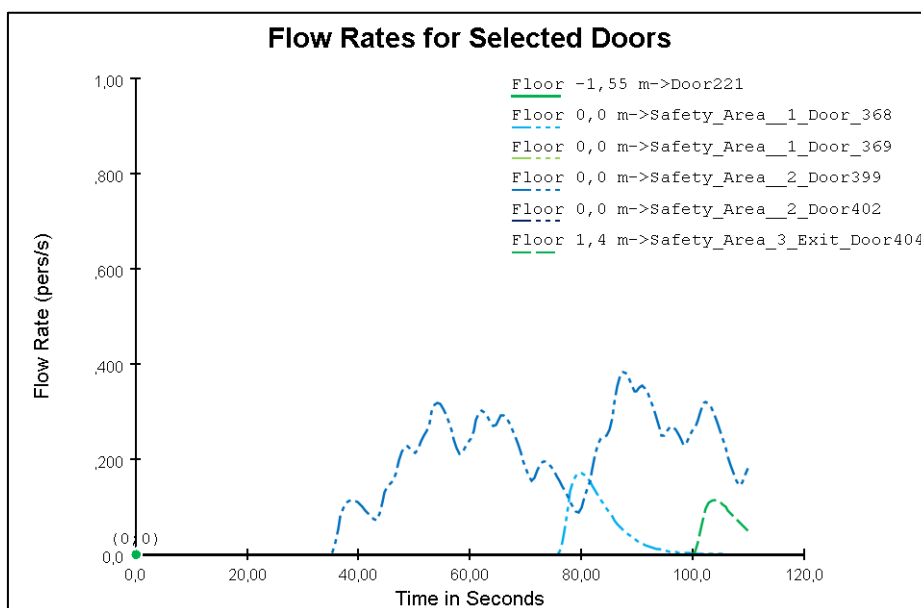


Figura 70 - Fluxo de Pessoas nas Zonas de Saídas – Cenário 5

Como o volume de pessoas convergentes foi reduzido, a procura pela zona de saída 2 foi usada como preferencial, pela proximidade ao ponto de saída do pavilhão fabril e por apresentar um escoamento livre e contínuo e sem efeitos de fricção ou desaceleração mútua entre os agentes. O gráfico de fluxo de ocupantes exibiu impulsos discretos e isolados, o que traduz a passagem individualizada dos operadores pelas linhas de descarga. Este cenário consolida-se como a linha de base de desempenho esperado da empresa, demonstrando que, em condições normais e com baixos volumes de ocupantes, a geometria atual da empresa garante excelentes margens de segurança para a evacuação.

4.1.6. Cenário 6 – 87 Ocupantes Sem Restrições de Saída

Para o terceiro cenário de referência foi configurado o Cenário 6, com 87 ocupantes no total, nomeado conforme a Figura 71, de modo a demonstrar a situação de pico de ocupação atual da empresa em condições normais de operação. A exemplo dos cenários de referência anteriores não foram inseridas restrições ou obstáculos nas rotas de saída existentes para a construção deste referencial.

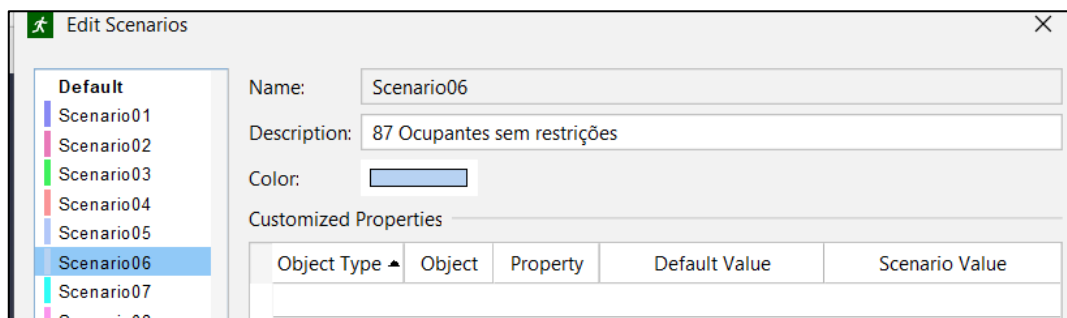


Figura 71 - Edição de Cenários - Cenário 6

A distribuição espacial dos trabalhadores decorreu da proximidade com seu posto de trabalho e atividades habituais, de modo a preservar com fidelidade o censo populacional da empresa por zona e departamento, conforme orientação e expertise da equipa de gestão da empresa. O simulador correu a validação do cenário e retornou a caixa de diálogo com os macro indicadores de processamento que serão utilizados na comparação com as variantes deste cenário.

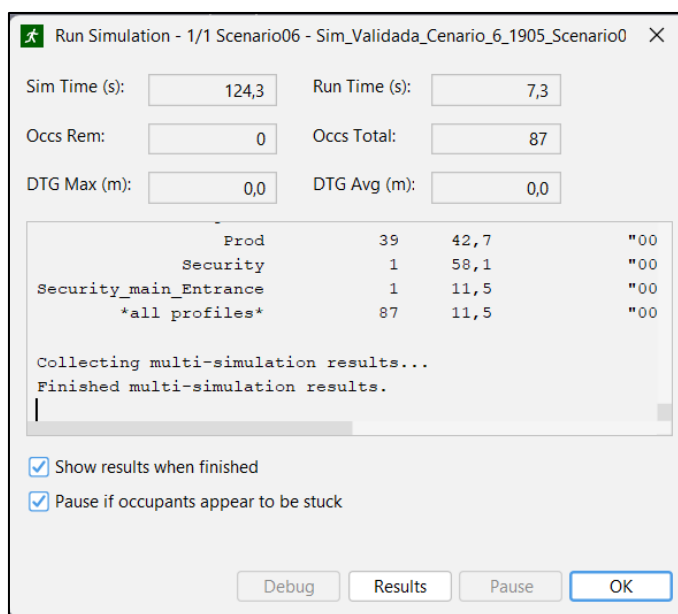


Figura 72 - Resultado Inicial da Simulação (Summary) – Cenário 6

Os macro indicadores apresentados na Figura 72 confirmam o número de ocupantes na simulação, o tempo de processamento do cenário em 7.3 segundos, e o tempo total de evacuação obtido em 124.3 segundos. Os demais dados apresentados na Tabela 15 compõe a extração a partir do ficheiro de resumo (*summary.txt*) para melhor visualização do cenário proposto.

Tabela 15 - Resultados Cenário 6

Métrica	Cenário 6
Ocupantes (peões)	87
Tempo Mínimo de Evacuação (s)	32,5
Ocupante Mais Rápido	0073 - Limpeza
Tempo Máximo de Evacuação (s)	124,2
Ocupante Mais Lento	0048 - Manutenção
Tempo Médio de Evacuação (s)	73,2
Distância Mínima Percorrida (m)	11,5
Ocupante com Menor Trajeto	0050 - Segurança
Distância Máxima Percorrida (m)	135,3
Ocupante com Maior Trajeto	0048 - Manutenção
Distância Média Percorrida (m)	71,7

Foi observado um tempo médio de evacuação de 73.2 segundos para o número de ocupantes do cenário proposto com tempos variando de 32.5 segundos, para um trabalhador do serviço de limpeza da fábrica, e 124.2 segundos para um trabalhador do departamento de Manutenção. O representante da equipa de Segurança apresentou a menor distância percorrida de 11.5 metros, devido ao fato de estar no posto de checagem próximo ao portão de entrada de peões, enquanto a maior distância foi percorrida em 135.3 metros pelo mesmo integrante da Manutenção que atingiu o maior tempo de deslocamento até uma das saídas. O valor médio das distâncias percorridas pelos 87 ocupantes foi de 71.7 metros. A distribuição gráfica do número de ocupantes na edificação e que alcançaram as saídas durante a evacuação foi demonstrada na Figura 73.

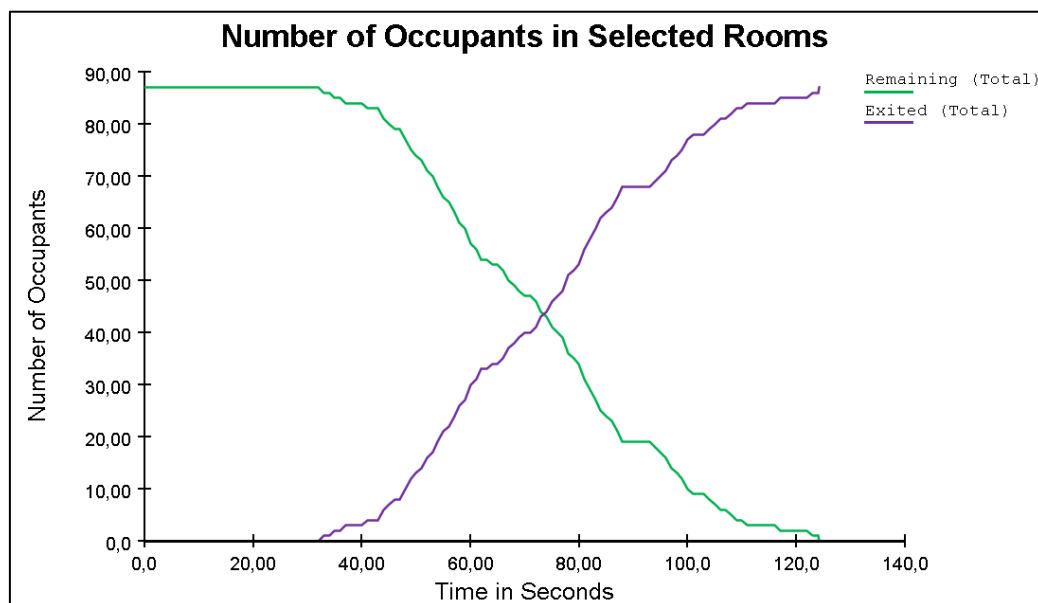


Figura 73 - Evolução do Número de Ocupantes na Evacuação - Cenário 6

A saída dos ocupantes inicia em 32.5 segundos e apresenta um comportamento muito próximo ao linear entre 40.0 e 90.0 segundos, retomando o comportamento após os 100.0 segundos de evacuação com a diminuição na variação de ocupantes dentro e fora das dependências da empresa até o momento final da evacuação.

O comportamento do fluxo de pessoas na área externa, localizada na área frontal da empresa entre a entrada dos peões e os acessos ao pavilhão, podem ser visualizados na modelagem tridimensional destacada, apresentada na Figura 74, com destaque para o Pátio Frontal (A).

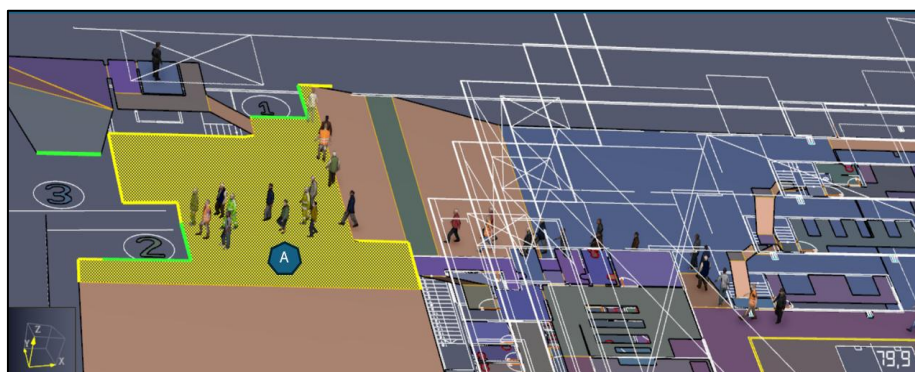


Figura 74 - Vista 3d da Ocupação do Pátio Frontal (A) da Empresa - Cenário 6

Com cada ocupante a ter livre escolha para chegar a um dos pontos de saída 1, 2 ou 3, no recorte da simulação, que reportou o tempo de 79.9 segundos, no qual obteve-se a maior quantidade de agentes no trecho da malha de navegação (A), com a presença de 15 ocupantes. O comportamento da evolução do número de ocupantes nesta zona demonstra-se no gráfico ilustrado na Figura 75.

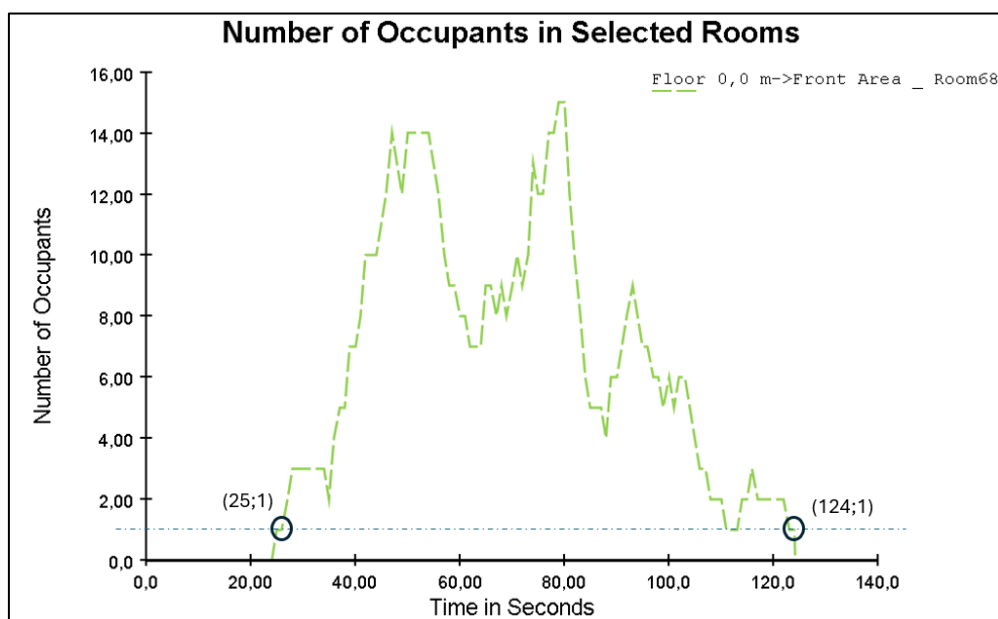


Figura 75 - Evolução do Número de Ocupantes na Evacuação - Cenário 6

O gráfico detalhou o número de ocupantes no pátio frontal durante todo o evento de evacuação do Cenário 6. No momento do pico aos 79.9 segundos a densidade calculada foi de 0,11 pessoas/m², com 15 ocupantes. Ao longo do tempo é possível observar a variação do número de agentes neste local, tendo a presença de pelo menos uma pessoa no intervalo compreendido entre os pontos destacados na curva e posicionados em 25.0 e 124.0 segundos. A zona frontal da empresa é analisada por ser o acesso para n-1 ocupantes nos cenários avaliados e conexão direta com duas saídas e suas respectivas portas de passagem. O fluxo de pessoas pelas passagens, visualizadas na Figura 76, demonstram a utilização de cada uma das saídas para o cenário.

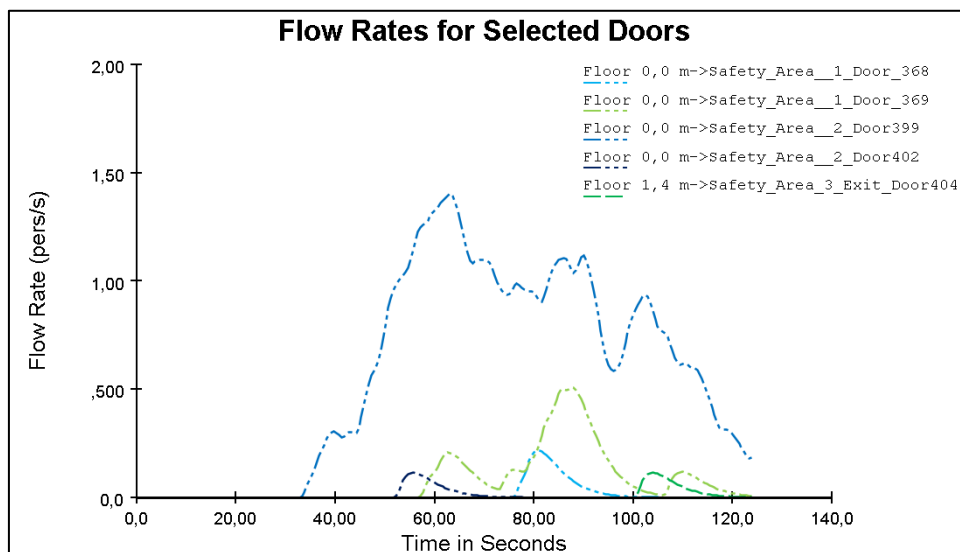


Figura 76 - Fluxo de Pessoas nas Zonas de Saídas – Cenário 6

Nota-se que a saída 2, devido à sua proximidade ao pavilhão industrial, foi a escolha preferencial da maioria dos ocupantes. A passagem *Door399*, por meio da zona frontal da empresa, recebeu o maior fluxo e neste cenário. A saída 2 teve a utilização de uma segunda passagem *Door402*, perpendicular a primeira, fato que ocorreu próximo ao pico de fluxo da primeira passagem, com repetição no intervalo entre 80.0 e 100.0 segundos da evacuação; apontando para situações pontuais de gargalo na primeira passagem. Fato semelhante ao ocorrido com a saída 1 com a passagem *Door_368* operando como recetor de transbordo para o pico de fluxo da outra passagem deste ponto. A Saída 3 rececionou apenas o agente de segurança que estava posicionado no posto de checagem mais próximo a respetiva saída.

4.1.7. Cenário 7 – 87 Ocupantes com Zonas de Saída 1 e 2 Bloqueadas

O Cenário 7 foi planeado com o objetivo de observar a capacidade de escoamento da infraestrutura da edificação utilizada neste trabalho, em sua capacidade máxima atual de 87 ocupantes. Neste cenário, com bloqueio das saídas utilizadas preferencialmente no Cenário 6, dispondo-se de uma única saída das instalações via o portão de acesso de peões, permitiu-se caracterizar o contexto de evacuação total das dependências da empresa.

De forma a definir o cenário, a Figura 77, demonstra a customização e alteração do valor *default* de “*Always Open*” para o valor do cenário de “*Always Closed*” das passagens para as zonas de saída 1 e 2, eliminando a opção de saídas pelas respetivas passagens.

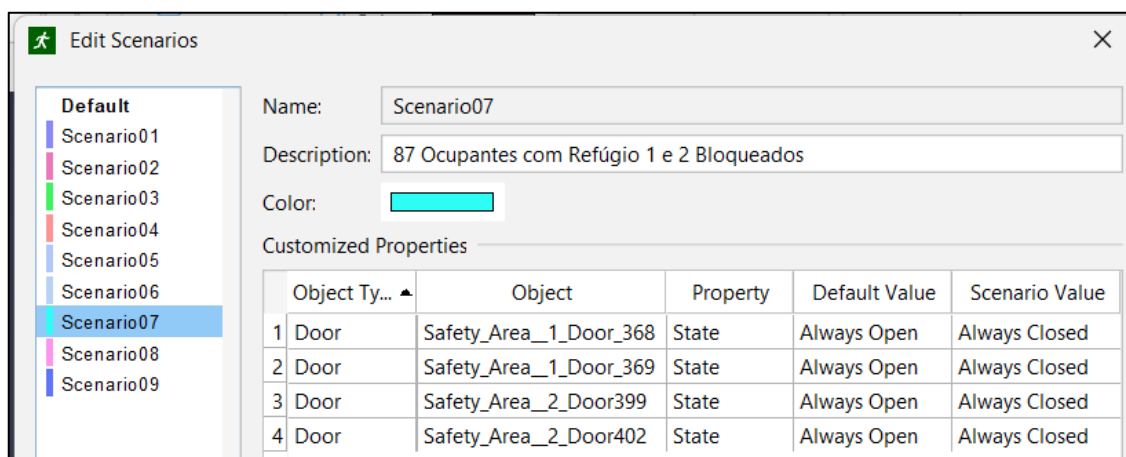


Figura 77 - Edição de Cenários - Cenário 7

Como visto no cenário 2, a alteração dos valores da situação das passagens causou impacto na conectividade da malha de navegação, eliminando as alternativas de saída prioritárias no cenário 6. O simulador Pathfinder correu a rotina automática de consistência e validou a estrutura do modelo atual, com a interface gráfica do simulador a reportar o resumo inicial com os novos macro indicadores de processamento.

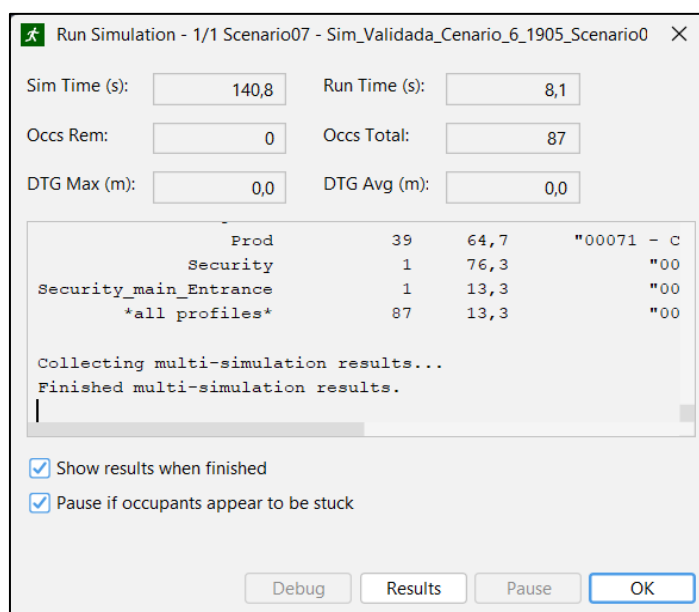


Figura 78 - Resultado Inicial da Simulação (Summary) – Cenário 7

Os macro indicadores, exibidos na Figura 78, evidenciam o impacto imediato das obstruções sobre a cinemática global dos ocupantes. O tempo necessário para o abandono total do ambiente (*Sim Time*) e o tempo computacional requerido pelo processador (*Run Time*) sofreram acréscimos significativos devido à complexidade acrescida no cálculo dinâmico de desvios de rota efetuado pelo Pathfinder. Para uma decomposição detalhada deste comportamento, a consolidação dos principais tempos limites e distâncias se encontra reproduzido na Tabela 16,

com dados obtidos dos ficheiros criados pelo Pathfinder para o cenário 7 em comparação aos resultados do Cenário 6.

Tabela 16 - Resultados Cenário 7

Métrica	Cenário 6	Cenário 7	Diferença Absoluta (s)	Varição Relativa (%)
Ocupantes (peões)	87	87	-	-
Tempo Mínimo de Evacuação (s)	32,5	49,6	17,1	52,62%
Ocupante Mais Rápido	0073 - Limpeza	0073.1 - Limpeza	-	-
Tempo Máximo de Evacuação (s)	124,2	140,7	16,5	13,29%
Ocupante Mais Lento	0048 - Manutenção	0048 - Manutenção	-	-
Tempo Médio de Evacuação (s)	73,2	94,3	21,1	28,83%
Distância Mínima Percorrida (m)	11,5	13,3	1,8	15,65%
Ocupante com Menor Trajeto	0050 - Segurança	0050 - Segurança	-	-
Distância Máxima Percorrida (m)	135,3	153,3	18,0	13,30%
Ocupante com Maior Trajeto	0048 - Manutenção	0048 - Manutenção	-	-
Distância Média Percorrida (m)	71,7	90,5	18,8	26,22%

De modo similar aos resultados obtidos para o Cenário 2, o Cenário 7 com a necessidade da utilização da única saída via um trajeto com trecho adicional com lanço de escada e portão de acesso. O impacto inicial foi no tempo de saída do primeiro agente que teve o acréscimo de 17.1 segundos, notando-se que o tempo comparado tem como referência o mesmo ocupante do serviço de Limpeza. O tempo médio de evacuação demonstrou um aumento de 28.83% com um aumento de 21.1 segundos. A máxima distância percorrida, sendo o mesmo agente nos dois cenários, foi acrescida de 18.0 metros alcançando o valor de 153.3 metros para o trabalhador do departamento de Manutenção. Com um aumento de 26.22% nas distâncias médias percorridas, onde os agentes percorreram trajetórias mais longas para superar as zonas interditadas, o tempo total de evacuação ficou em 140.7 segundos enquanto o cenário de referência demonstrou a performance em 124.2 segundos.

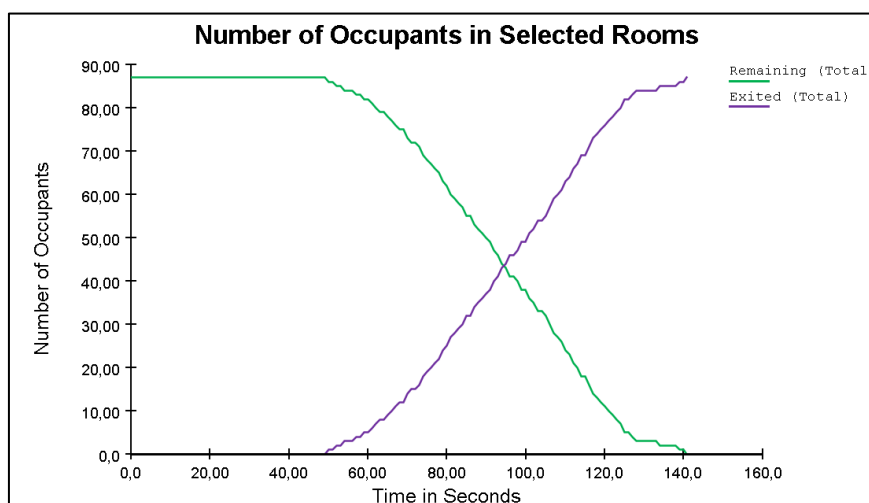


Figura 79 - Evolução do Número de Ocupantes na Evacuação - Cenário 7

A dinâmica cronológica associada as saídas das instalações fabris sob estas condições adversas foram mapeadas graficamente no gráfico de linhas da Figura 79, com o deslocamento do ponto de início da saída efetiva de 32.5 para 49.6 segundos; instante para o primeiro agente em situação de fora de risco. Este atraso inicial é o resultado direto do tempo gasto pelos agentes no reconhecimento do bloqueio e na subsequente tomada de decisão para reorientar a sua caminhada em direção à única saída disponível. A alteração no comportamento do fluxo, demonstrada na Figura 80, a densidade de ocupantes na zona frontal da empresa e no trecho adicional em direção a saída 3, pode ser observada na perspectiva tridimensional do modelo.



Figura 80 - Vista 3d da Ocupação do Pátio Frontal (A) da Empresa - Cenário 7

A imagem da simulação no momento 80.7 segundos do evento de evacuação evidencia o bloqueio das zonas de saída 1 e 2 de saída e a canalização do fluxo de ocupantes para a zona de saída 3. A densidade de agentes acumulados no pátio frontal, que continuou a atuar como o único recetor da quase totalidade dos egressos do edifício, está representada graficamente na Figura 81, com gráficos divididos em três intervalos.

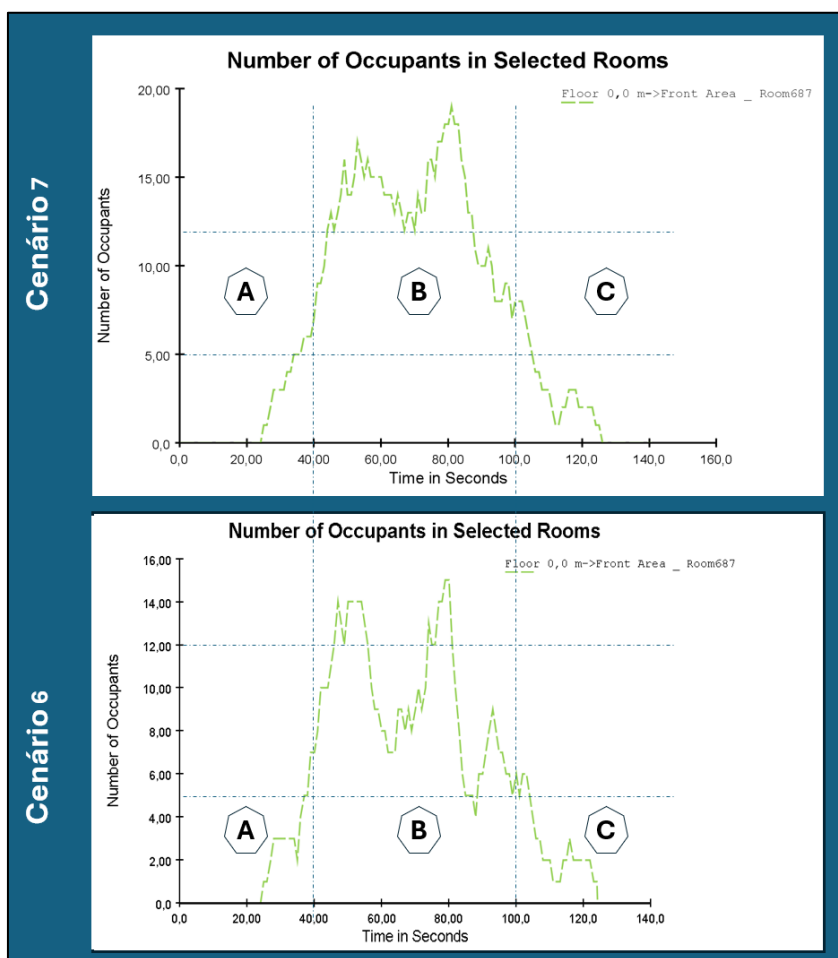


Figura 81 - Número de Ocupantes no Pátio Frontal da Empresa (A) - Cenários 6 e 7

Nota-se que o Cenário 7 apresentou número de ocupantes na zona frontal da empresa maior no intervalo intermédio B, uma curva com pico de ocupação superior ao registado no Cenário 6. Registando uma densidade de 0.13 pessoas/m², o Cenário 7, sem apresentar queda abaixo de 12 ocupantes no intervalo entre 40.0 e 100.0 segundos, sustentou-se com maior contingente de pessoas em direção a única saída disponível que o reportado no gráfico do Cenário 6.

Graficamente pode-se aproximar a análise da curva de ambos os cenários nas partes A e C. Nota-se que a diferença entre o tempo final do gráfico apresentado no cenário 7 e do tempo total de evacuação decorre da necessidade do último agente percorrer o trajeto em direção a zona 3, depois de sair da zona frontal.

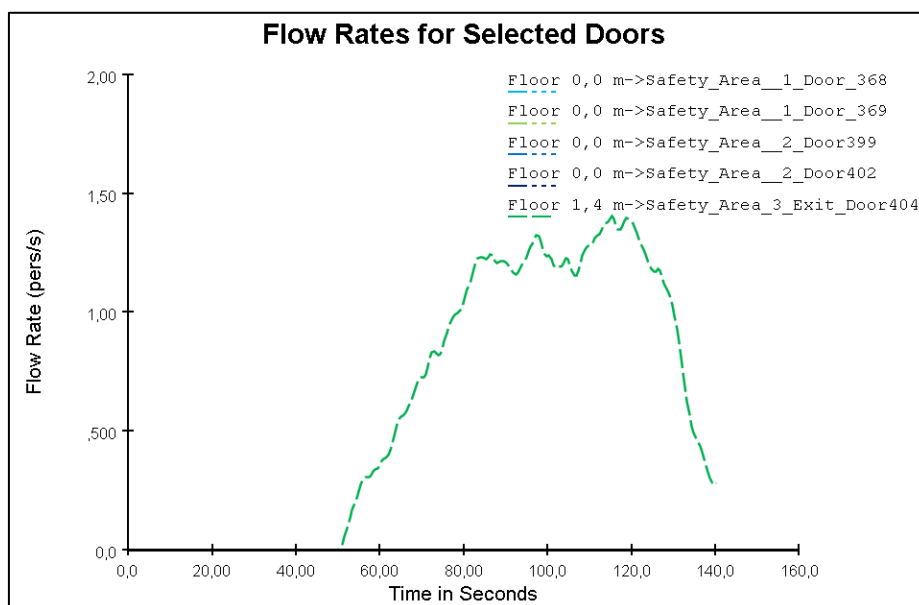


Figura 82 - Fluxo de Pessoas nas Zonas de Saída - Cenário 7

Com o gráfico da Figura 82 ilustra-se a curva de fluxo da única saída disponível, identificada no modelo como *Door404*. Observou-se o maior valor de fluxo em 1.40 pessoas por segundo no instante 115.32 segundos, permanecendo com valores acima de 1.00 pessoas por segundo no intervalo entre 80.0 e 130.0 segundos do evento de evacuação. Ressalta-se que o resultado demonstrou os resultados de uma situação crítica de evacuação com o abandono completo das instalações.

4.1.8. Cenário 8 – 87 Ocupantes com Rampa de Entrada da Edificação Bloqueada

Para a edição do Cenário 8, com 87 ocupantes na área da empresa, utilizou-se o Cenário 6 como base. De forma, a simular as condições de um cenário sem a possibilidade do uso da rampa de acesso para o pavilhão de fabricação, demonstra-se na Figura 83, a customização das propriedades desabilitando o uso da rampa (*Ramp08*).

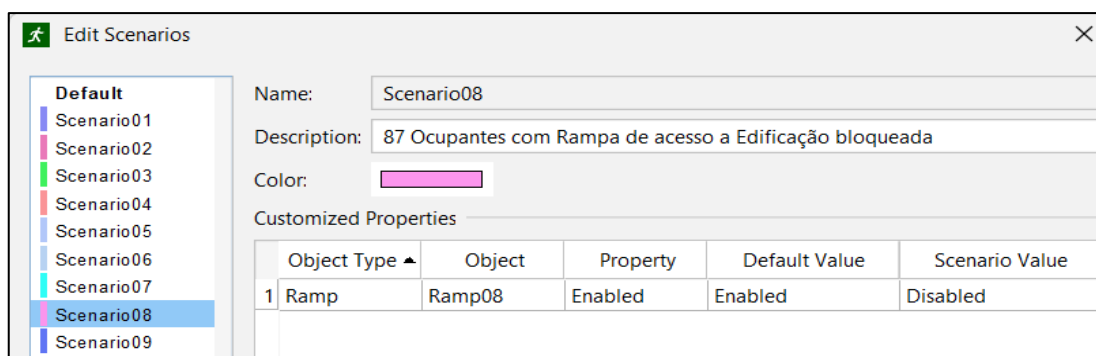


Figura 83 - Edição de Cenários - Cenário 8

O bloqueio da rampa de acesso ao pavimento de produção foi parametrizado para ajustar o cenário de referência para a simulação desejada, com a manutenção das demais características e número de 87 ocupantes por zonas de produção e departamentos do cenário 6. Com a rampa bloqueada, demonstrada na vista 3d da Figura 84, os agentes com direcionamento para a região de saída do pavimento tinham como opção a passagem pelo corredor em frente aos banheiros e corredor de acesso ao restaurante.

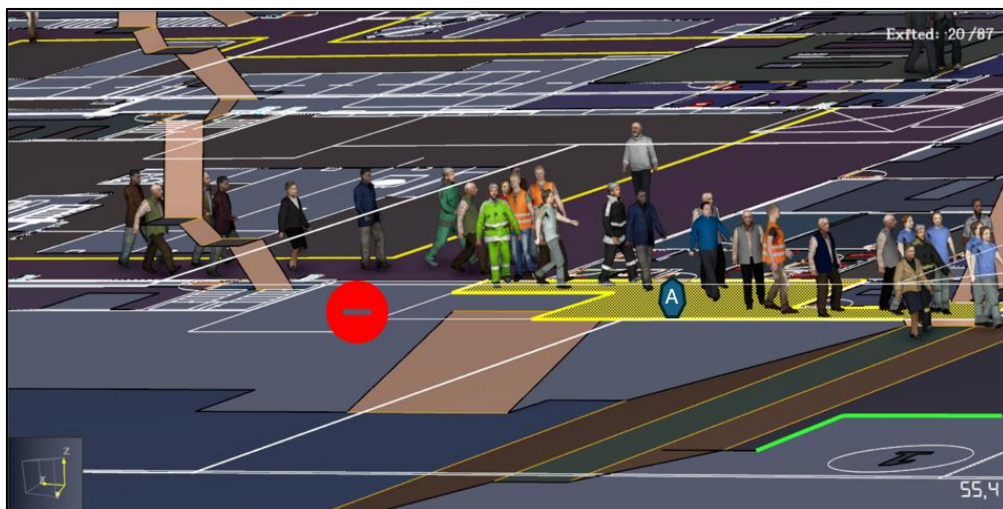


Figura 84 - Vista 3d dos Ocupantes em Passagem Pelo Corredor (A) - Cenário 8

Esta configuração teve como objetivo observar e analisar a alteração da canalização do fluxo originalmente preferencial pela rampa e com uma largura de passagem alargada em relação à nova rota, apresentada na Figura 85, utilizando-se a sequência de passagem (B), corredor (A) e passagem (C). Nota-se uma rota alternativa com zonas de passagem inicial (B) e final (C) mais estreitas em relação à rampa (D), e que ao final do corredor (A) encontra-se com o fluxo dos ocupantes do pavimento 02.



Figura 85 - Vista 2d do Corredor (A) e Rampa (D) Bloqueada - Cenário 8

A área do corredor (A) corresponde a 26.15m^2 com uma largura de passagem de entrada (B) de 1.10 metros. A área da rampa bloqueada (D) corresponde a 18.3 m^2 com largura de passagem

contínua de 3.00 metros. Os resultados iniciais fornecidos pelo software de simulação foram incluídos na Tabela 17 para as devidas comparações.

Tabela 17 - Resultados Cenário 8

Métrica	Cenário 6	Cenário 8	Diferença Absoluta (s)	Varição Relativa (%)
Ocupantes (peões)	87	87	-	-
Tempo Mínimo de Evacuação (s)	32,5	32,5	0,0	0,00%
Ocupante Mais Rápido	0073 - Limpeza	0073.1 - Limpeza	-	-
Tempo Máximo de Evacuação (s)	124,2	136,3	12,1	9,74%
Ocupante Mais Lento	0048 - Manutenção	0029 - Composto	-	-
Tempo Médio de Evacuação (s)	73,2	75,2	2,0	2,73%
Distância Mínima Percorrida (m)	11,5	11,5	0,0	0,00%
Ocupante com Menor Trajeto	0050 - Segurança	0050 - Segurança	-	-
Distância Máxima Percorrida (m)	135,3	148,2	12,9	9,53%
Ocupante com Maior Trajeto	0048 - Manutenção	0029 - Composto	-	-
Distância Média Percorrida (m)	71,7	70,6	-1,1	-1,53%

Com um cenário de bloqueio de uma rampa de acesso ao pavimento 01, piso principal de produção, observou-se um aumento no tempo de evacuação total de 12.1 segundos, com uma variação positiva de 9.74 % em comparação ao cenário de referência nomeado como Cenário 6. O tempo mínimo de evacuação não foi impactado, com o mesmo agente do cenário de referência finalizando o percurso em 32.5 segundos. Em relação às distâncias percorridas a mínima não teve alteração, por considerar o agente de segurança dentro do posto de vigilância próximo a entrada principal de trabalhadores. Para o valor médio da distância percorrida houve uma redução de 1.53%, registrando o valor de 70.6 metros. Ao observar o valor da máxima distância percorrida nota-se a maior variação percentual dos parâmetros avaliados neste cenário com um acréscimo de 9.53% ao computar-se a distância de 148.2 metros percorridos para o trabalhador da produção na zona de Composto.

Semelhante ao indicado na curva de evacuação do cenário 6, a curva na Figura 86, registra a saída do primeiro trabalhador exatamente ao tempo de 32.5 segundos. Este intervalo inicial representa o tempo de deslocamento do ocupante localizado, próximo ao restaurante e mais próximo a uma das portas externas, transcorrendo de forma livre antes da chegada de outros ocupantes na zona em frente ao corredor do restaurante, corredor que teve seu fluxo alterado pelo bloqueio da rampa dentro deste cenário.

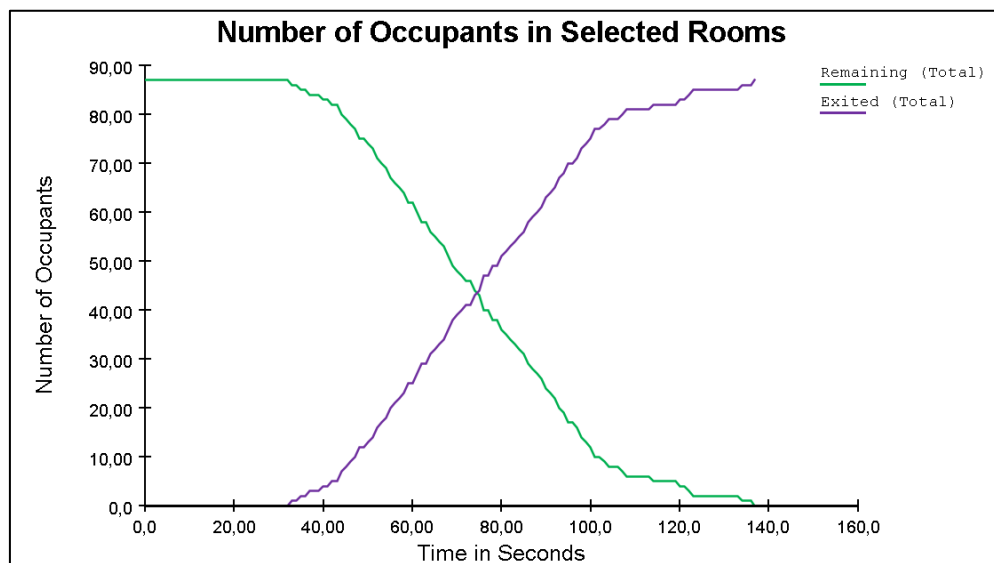


Figura 86 - Evolução do Número de Ocupantes na Evacuação - Cenário 8

Na comparação ao cenário 6 as curvas de ocupantes dentro das instalações e que já realizaram a evacuação demonstram grande similaridade. Ao verificar a métrica com um maior tempo final no Cenário 8, fez-se necessário resgatar um gráfico do cenário de referência para efeito de comparação. Para avaliação, a construção da Figura 87 permitiu a comparação e avaliação do número de ocupantes nas zonas impactadas pelo bloqueio da rampa entre os Cenários 6 e 8.

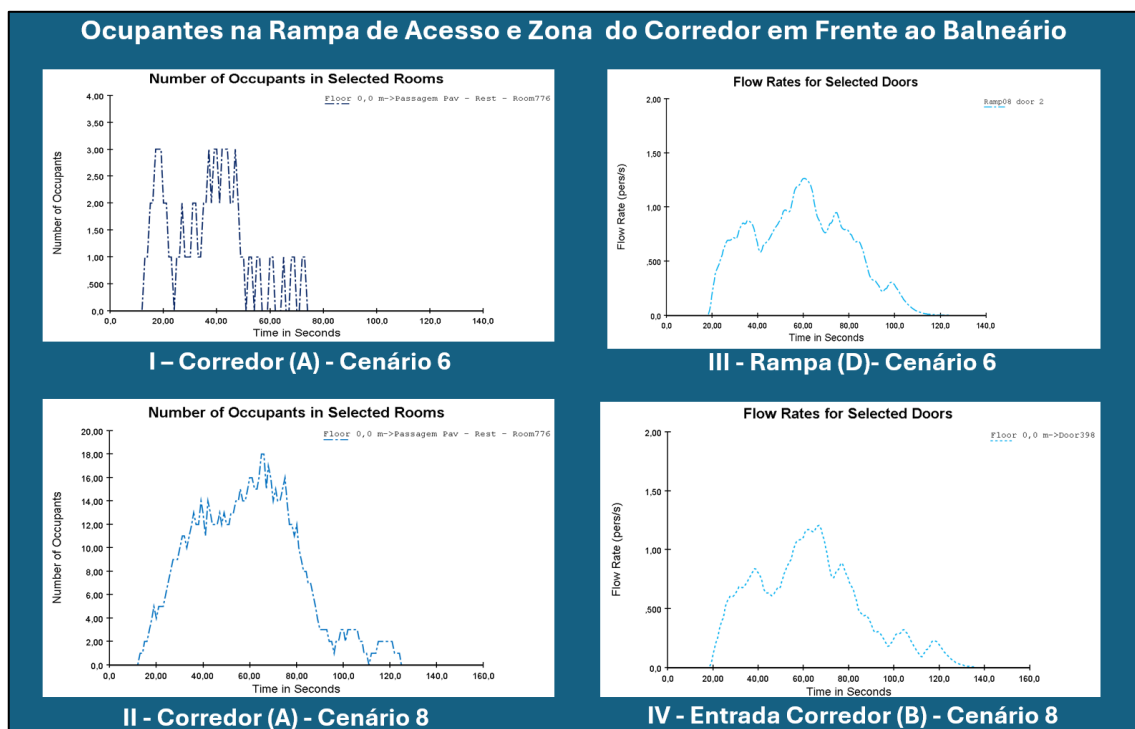


Figura 87 - Número de Ocupantes no Corredor e Rampa de Acesso - Cenários 6 e 8

Nota-se um aumento expressivo do número de pessoas no corredor (II) da zona do corredor (A), penalizando o resultado da evacuação, em relação ao tempo total final. De modo inverso a comparação dos Cenários 2 e 7, o ocorrido no Cenário 8 em relação ao Cenário 3 levanta pontos de atenção quanto a gargalos. A comparação de gráficos com as curvas do número de ocupantes no corredor para o cenário 6 (I) e para o cenário 8 (II), e em relação ao fluxo de pessoas original na entrada da rampa (III) no cenário 6 e na entrada do corredor (IV) no cenário 8, permitiu observar que o fluxo original na rampa da saída do pavimento de produção por meio da rampa (III), migrou para o corredor (IV) com o comportamento do fluxo de pessoas ao longo do tempo com características similares levando picos de ocupação que chegaram a valores seis vezes maiores que o de referência.

Os gráficos em condições facilitadas de comparação na Figura 88 revisitam os cenários 1 e 3 com o intuito de observar os limites da resiliência das edificações nas duas situações propostas nos cenários sem a utilização da rampa com dois conjuntos de ocupantes diferentes.

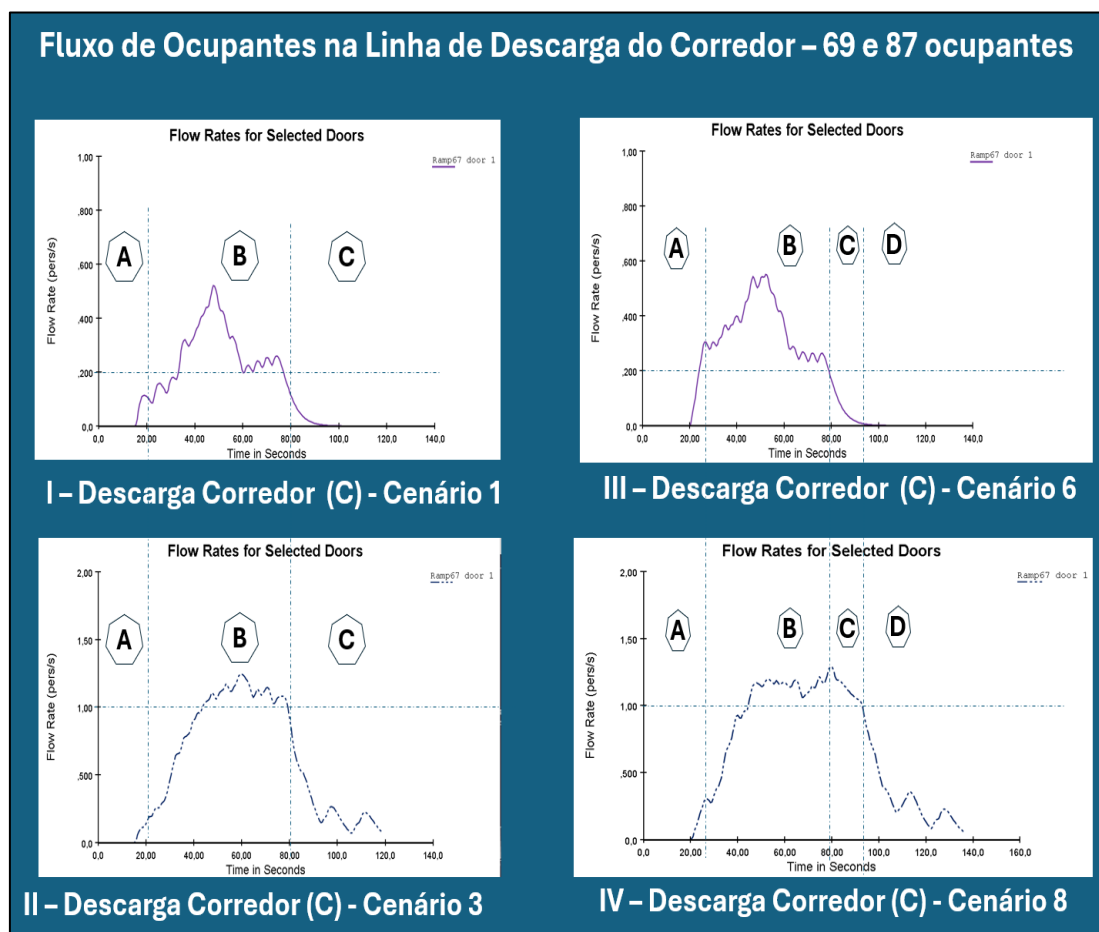


Figura 88 - Fluxo de Ocupantes na Linha de Descarga do Corredor - 69 e 87 Ocupantes

O bloqueio da mesma rampa, *Ramp08*, no cenário 3 não trouxe impactos negativos no tempo de evacuação, apresentando inclusive um ganho em relação ao de referência. Todavia o cenário 8 com o aumento da ocupação nas mesmas restrições reportou impacto negativo, com o

aumento do tempo de evacuação em relação ao de referência. Ao se dividir a curva IV, identificou-se um ponto de gargalo no intervalo a partir de 80.0 segundos, ausente com o número de ocupantes menor.

De forma geral, o início do fluxo nos cenários com 87 ocupantes tem início tardio em comparação aos cenários com 69 ocupantes. O nível do fluxo de pessoas no trecho final e de descarga do corredor no Cenário 8 estendeu-se até o tempo de 92.65 segundos, enquanto o cenário 3 iniciou a redução acentuada do fluxo de pessoas aos 80.00 segundos. O tempo adicional sob pressão na linha de descarga do corredor é observado no intervalo C do gráfico IV. Os trechos finais das curvas dos Cenários 3 e 8, gráficos II e IV, tem comportamento similar a exceção do deslocamento temporal causado pelo nível do fluxo durante o evento de evacuação.

O comportamento da curva do número de ocupantes descrito Figura 89 ao longo do tempo para o Cenário 8 atingiu valores de 11 ocupantes no pátio frontal da empresa.

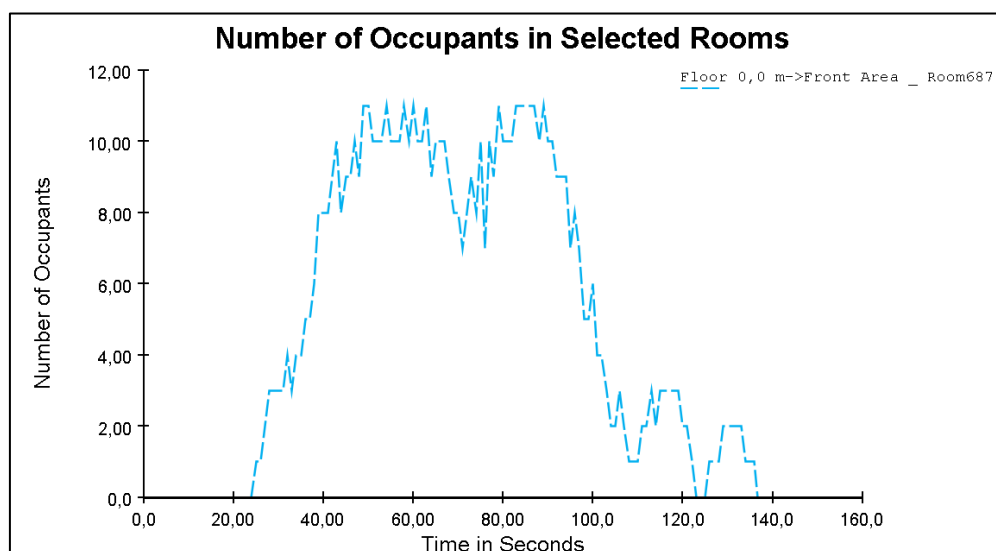


Figura 89 - Número de Ocupantes no Pátio Frontal da Empresa (A) - Cenário 8

Em comparação como o cenário 6, os picos de ocupação da área frontal foram menores, alcançando no máximo 11 ocupantes simultâneos enquanto no cenário de referência observou-se valores entre 12 e 15, no período compreendido entre 40.0 e 80.0 segundos. A manutenção dos níveis de ocupação no limite do tempo de 100.0 segundos pode ser explicada pelo gargalo e controle de fluxo “forçado” realizado pelo corredor alternativo de saída. O fluxo pelas linhas de saída de cada umas das zonas de descargas pode ser observado nas curvas dos gráficos da Figura 90 comparando os Cenários 6 e 8.

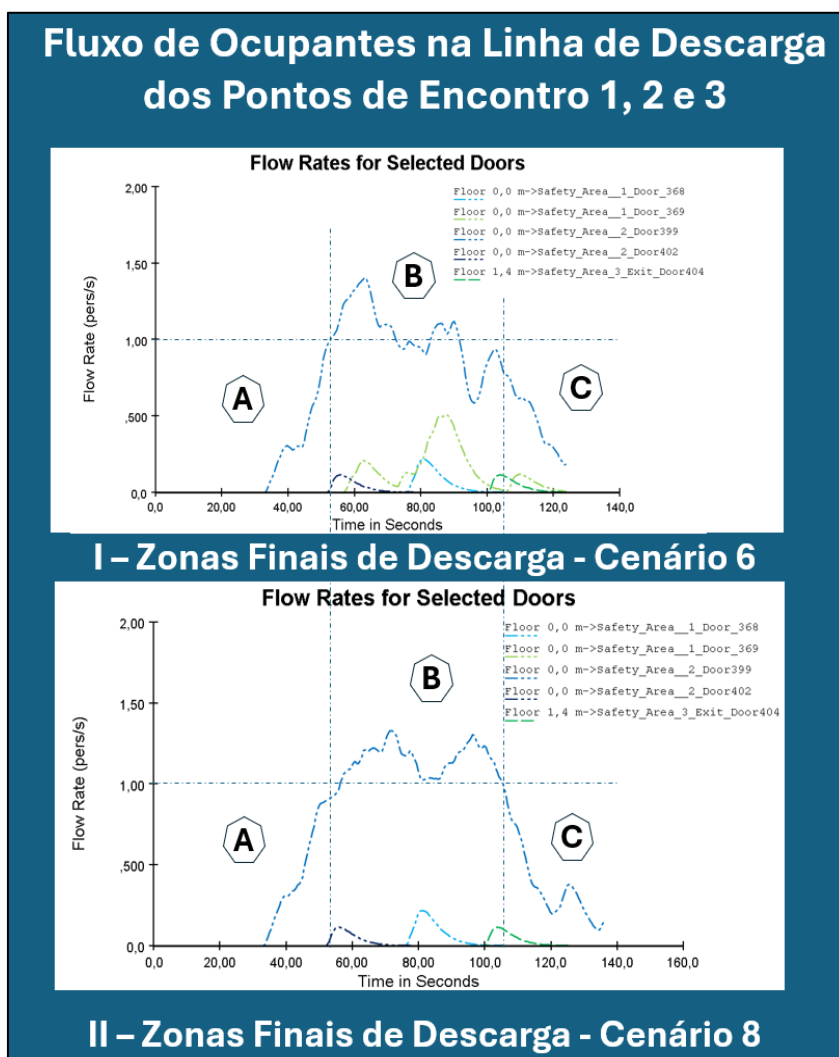


Figura 90- Fluxo de Pessoas nas Zonas de Saída - Cenários 6 e 8

Em comparação ao Cenário 6 (I), o ponto de saída 1 no cenário 8 (II) absorveu o fluxo em apenas uma de suas linhas de descarga, na linha *Door_368*, o que demonstrou uma redução do fluxo em direção à saída 1 no início do intervalo intermédio (B), sem gerar transbordos para a linha adicional (*Door_369*). No mesmo cenário 8, a linha de saída 2, identificada como *Door399*, aumentou seu fluxo no trecho intermédio (B), sustentando o valor acima de 1 pessoa/segundo, sem contar com transbordos para a linha de saída adicional *Door402*.

4.1.9. Cenário 9 – 87 Ocupantes com Lanço de Escada aos Escritórios Bloqueado

O impedimento para o uso do lanço de escada principal de acesso à zona de escritórios no pavimento 02 desenhou o Cenário 9 com 87 ocupantes no modelo de simulação. O cenário 9 teve como objetivo analisar a utilização alternativa de saída do pavimento 02, por meio do lanço de escada de interligação ao pavimento de produção. A Tabela 18, ilustra os resultados do cenário proposto e dos respectivos impactos em relação ao Cenário 6.

Tabela 18 - Resultados Cenário 9

Métrica	Cenário 6	Cenário 9	Diferença Absoluta (s)	Varição Relativa (%)
Ocupantes (peões)	87	87	-	-
Tempo Mínimo de Evacuação (s)	32,5	32,5	0,0	0,00%
Ocupante Mais Rápido	0073 - Limpeza	0073.1 - Limpeza	-	-
Tempo Máximo de Evacuação (s)	124,2	124,2	0,0	0,00%
Ocupante Mais Lento	0048 - Manutenção	0048 - Manutenção	-	-
Tempo Médio de Evacuação (s)	73,2	74,9	1,7	2,32%
Distância Mínima Percorrida (m)	11,5	11,5	0,0	0,00%
Ocupante com Menor Trajeto	0050 - Segurança	0050 - Segurança	-	-
Distância Máxima Percorrida (m)	135,3	135,3	0,0	0,00%
Ocupante com Maior Trajeto	0048 - Manutenção	0048 - Manutenção	-	-
Distância Média Percorrida (m)	71,7	75,9	4,2	5,86%

De modo análogo, os resultados dos cenários 1 e 4 com 69 ocupantes, em relação aos valores dos tempos de evacuação e distâncias percorridas extremos, mínimos e máximos, encontrados para o Cenário 9 e 6 demonstraram que a obstrução não causou impacto direto no resultado do tempo final da evacuação.

Para a verificação de impactos adicionais causados pelo bloqueio definido neste cenário, a Tabela 19, consolidou o complemento de métricas para análise em relação ao congestionamento em cada um dos cenários.

Tabela 19 - Resultados com Métricas de Congestionamento - Cenário 9

Métricas	Cenário 6	Cenário 9	Diferença Absoluta (s)	Varição Relativa (%)
Restrições	Nenhuma	Escada Bloqueada	-	-
Tempo de Evacuação (s)	124,3	124,3	0,0	0,00%
Tempo mínimo de evacuação (s)	32,53	32,53	0,0	0,00%
Tempo máximo de evacuação (s)	124,18	124,18	0,0	0,00%
Tempo médio de evacuação das pessoas (s)	73,19	74,89	1,7	2,33%
Distância Mínima percorrida (m)	11,51	11,51	0,0	0,00%
Distância Máxima percorrida (m)	135,29	135,30	0,0	0,01%
Distância média percorrida (m)	71,69	75,88	4,2	5,85%
Tempo Mínimo de Congestionamento	0,83	0,83	0,0	0,00%
Tempo Máximo de Congestionamento	30,53	17,30	-13,2	-43,33%
Tempo Médio de Congestionamento	3,64	2,10	-1,5	-42,45%
Pico zona Frontal (occ)	15	17	2,0	13,33%
Densidade na Zona frontal (occ/m2)	0,11	0,12	0,0	13,33%

Com o mesmo impacto inicial de obter-se o mesmo tempo de evacuação no cenário com restrição de acesso ao pavimento 02 em relação ao cenário sem restrições, ocorrido entre os Cenários 4 e 1, os Cenários 9 e 6 apresentaram tempos similares de 124.3 segundos como tempo de evacuação para os 87 ocupantes. Observa-se que com os mesmos tempos mínimos e máximos o tempo médio teve um acréscimo da ordem de 2.33%, passando de 73.19 segundos para 74.89 segundos. Com efeito similar nas distâncias percorridas e impulsionadas pela necessidade da utilização de um lanço de escada localizado em direção a princípio contrária à saída, pode-se verificar um deslocamento do valor médio de 71.69 metros para 75.88 metros, um aumento de 5.85% para o cenário atual. Em direção contrária ao tempo de evacuação e a distância percorrida, o tempo de congestionamento médio reduziu 42.45%, passando de 3.64

segundos para 2.10 segundos. Para a métrica de tempo máximo congestionamento foi evidenciada uma variação relativa negativa de 43.33%, com redução de 30.53 segundos para 17.30 segundos. Para o cenário similar com 69 ocupantes a redução do tempo médio de congestionamento apurado foi de 42.45%.

A evolução da saída dos ocupantes durante o evento de evacuação nos Cenários 9 e 6 pode ser observada na Figura 91, que apresenta o balanço do número de ocupantes dentro e fora da área da empresa.

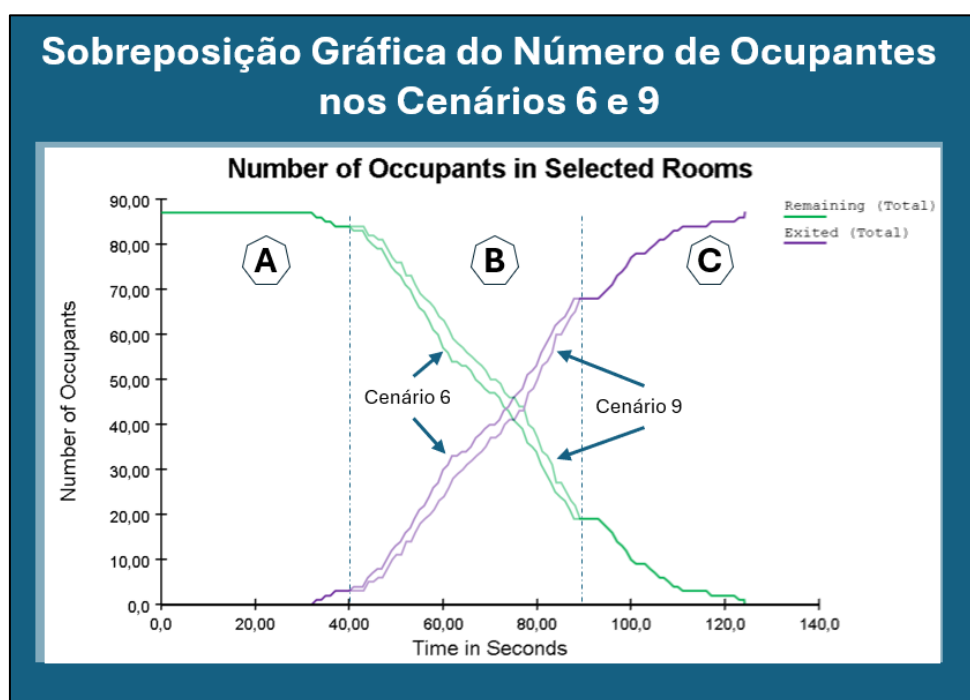


Figura 91 - Sobreposição Gráfica do Número de Ocupantes - Cenários 6 e 9

Com a sobreposição gráfica das curvas do número de ocupantes no Cenário atual 9 e no Cenário 6, observou-se que no intervalo intermédio das curvas (B) o cenário atual apresentou leve atraso no processo de evacuação, ficando deslocado à direita da curva do cenário de referência; atraso que não impactou no tempo total de evacuação. Com o recurso dos gráficos justamente sobrepostos no trecho (C) nota-se a completa similaridade na contagem de saída dos ocupantes no processo de evacuação. Reforça-se os resultados de análise do cenário 4, com 69 ocupantes, quanto à redução da velocidade interna de escoamento durante o mesmo trecho intermédio.

A restrição de leiaute introduzidas no cenário 9, com o bloqueio do lanço de escada, pode ser observada na imagem da Figura 92 com a customização das propriedades do cenário.

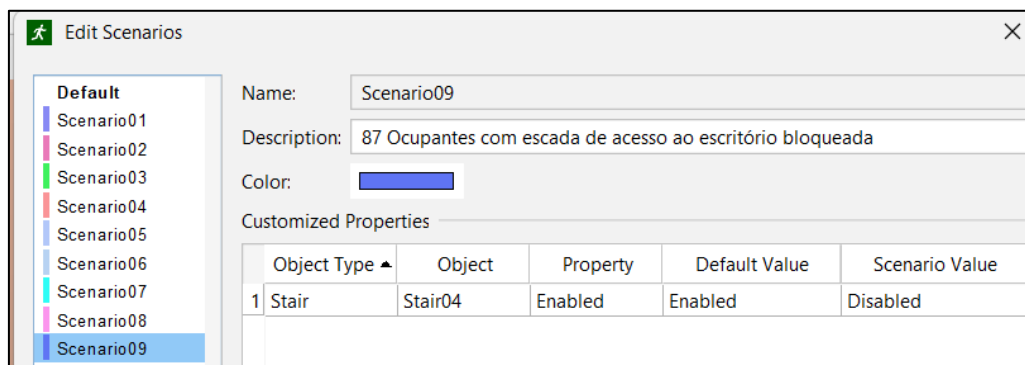


Figura 92 - Edição de Cenários - Cenário 9

Este novo cenário foi desenhado para inibir o acesso ao lanço de escada, *Stair04*, que durante a simulação do cenário 6 teve seu uso de modo preferencial pelos ocupantes da zona de escritórios. O fluxo dos ocupantes do pavimento localizado a 3.0 metros de altura em relação ao pavimento fabril teve alteração para o lanço de escada com ponto de saída dentro deste mesmo pavimento 01, ilustrado na vista 3d da Figura 93 apresentando o os ocupantes dentro do leiaute do modelo computacional.

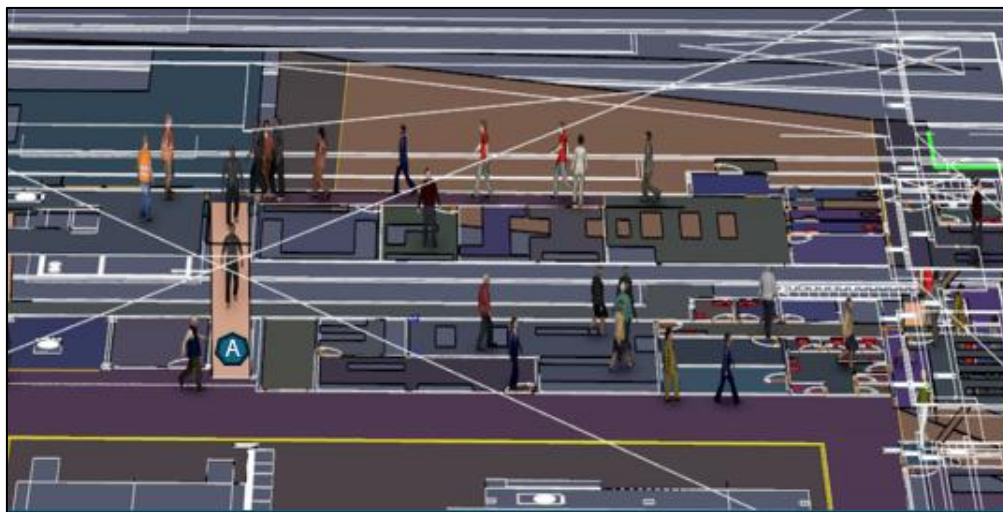


Figura 93 - Vista 3d do Fluxo de Ocupantes Evacuando o Pavimento 02 - Cenário 9

A ilustração da simulação demonstra a procura dos grupos de ocupantes posicionados na zona de escritórios e zona de produção do mezanino, através do lanço de escada (A). O maior percurso foi percebido no aumento médio das distâncias percorridas pelos ocupantes durante a simulação deste cenário, passando de 71.69 metros para 75.88 metros.

O número de ocupantes simultâneos na área do pátio frontal da empresa foi representado na Figura 94, que compara os resultados do Cenários 9 e 6, dividindo-se o tempo de evacuação em quatro intervalos.

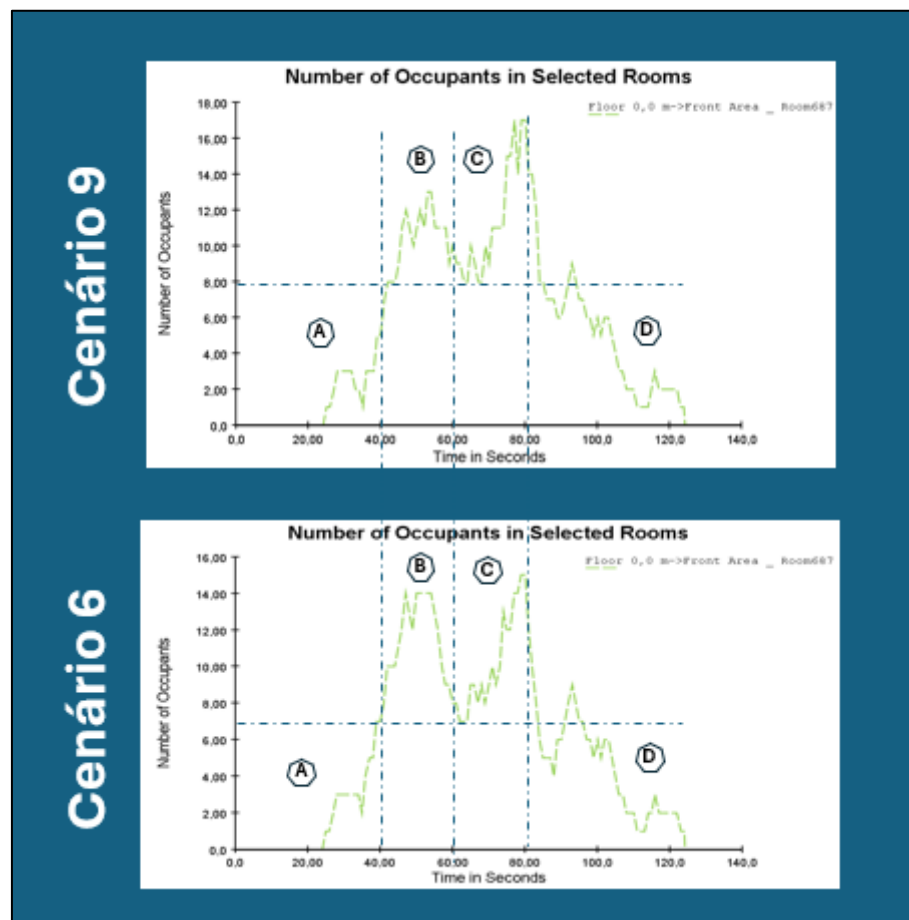


Figura 94 - Número de Ocupantes no Pátio Frontal da Empresa (A) - Cenários 6 e 9

Com a comparação das curvas de ocupação no pátio frontal, para os cenários 6 e 9, pode-se observar a similaridade dos resultados para os intervalos A, e D. A primeira diferença entre os cenários nota-se no intervalo B, com a redução dos picos de ocupantes simultâneos no cenário 6. Enquanto no cenário 6 o pico de ocupação atinge os 14 indivíduos o cenário 9 atinge apenas uma vez o pico de 13 ocupantes. Este comportamento, evidenciado no trecho B do cenário 9, indica que o obstáculo e o layout da fábrica provocaram um efeito de amortecimento e retenção, permitindo uma chegada mais lenta neste período do tempo de evacuação. Para o cenário 9, a retenção evidenciada no trecho B teve a compensação no trecho final do intervalo C, em que picos de 17 ocupantes foram observados durante a simulação representando a segunda diferença entre os cenários.

Para o cenário 9, o impacto induzido pelas alterações de layout nas linhas de saída finais pode ser observado na Figura 95, com o comportamento da linha de fluxo de pessoas em cada uma das zonas de saída em comparação com Cenário 6.

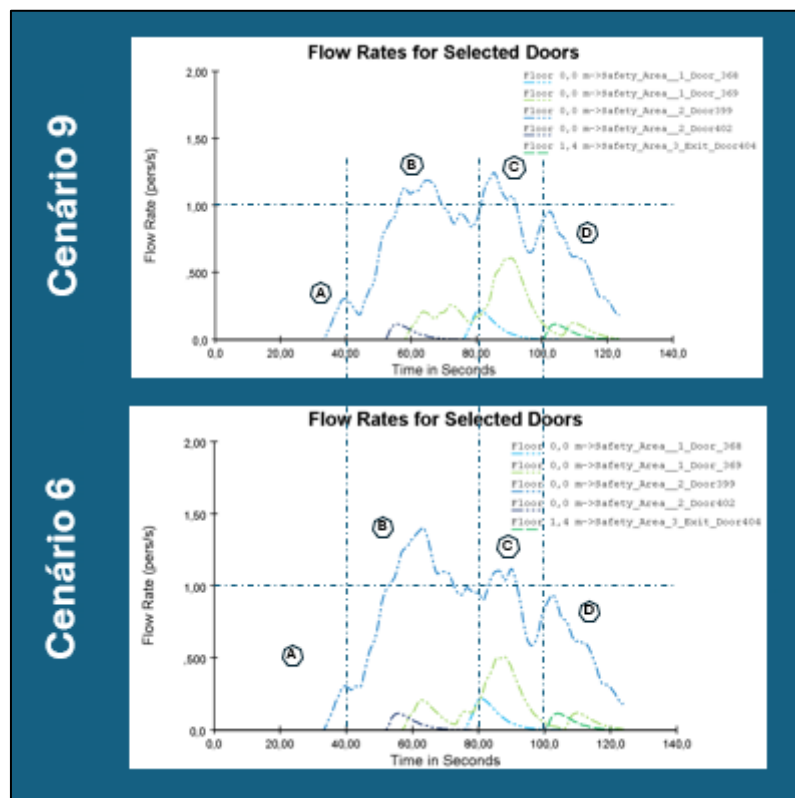


Figura 95 - Fluxo de Pessoas nas Zonas de Saída - Cenários 6 e 9

Nas fases inicial de acréscimo de tráfego (A) e final (D) observa-se um perfil de convergência muito semelhante em ambos os cenários, no qual a curva da saída 2, na passagem *Door_399*, assume o protagonismo do escoamento, escalando de forma acentuada. Contudo, no intervalo B, o cenário 9 atinge um pico de fluxo menos acentuado do que o Cenário 6, situação que se inverte no intervalo C. Esta diferença demonstra que a obstrução introduzida no cenário 9, com a retirada da opção de um dos lanços de escada, atuou como uma barreira ao impor uma restrição na velocidade de aproximação dos agentes às saídas de emergência; convergindo na necessidade de um maior escoamento no início do trecho C. Incluindo-se as alterações entre os cenários no intervalo B-C, ambos cenários finalizam com tempos de evacuação e com linhas de comportamento do fluxo nas linhas de saída com resultados similares.

4.1.10. Cenário 10 – 89 Ocupantes com Reconstrução de Evacuação Real

O último cenário simulado neste trabalho foi a reconstrução de um cenário similar ao da última atividade de evacuação real, executada e documentada pela empresa no ano de 2024. Na ocasião a empresa contava com um efetivo maior de trabalhadores, que em comparação ao Cenário 1, selecionado para ser a linha de base em decorrência do horário do simulado real, teve um acréscimo de 20 ocupantes e ajustes de leiaute. O cenário 10 foi construído com o total de 89 ocupantes com a distribuição dos agentes posicionados potencialmente em zonas de operação fabril utilizadas à época do exercício de evacuação; seguindo as orientações da equipa de gestão da empresa.

A configuração do cenário de reconstrução do último exercício de evacuação, sem restrições quanto aos acessos existentes na edificação e contando com o acréscimo dos trabalhadores nas zonas de produção, apresentado na Figura 96, para aproximar o cenário da evidência histórica.

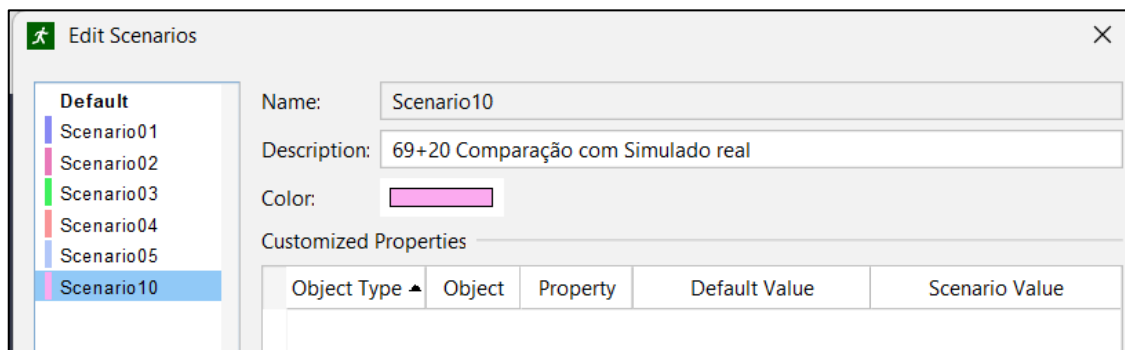


Figura 96 - Edição de Cenários - Cenário 10

A escolha de um horário sem sobreposição de equipes foi baseada na conduta histórica e relatório da empresa em realizar os exercícios de evacuação no período da manhã, Figura 97. Para a composição deste cenário, foi observado o posicionamento de agentes em zonas que a empresa não está momentaneamente operando.

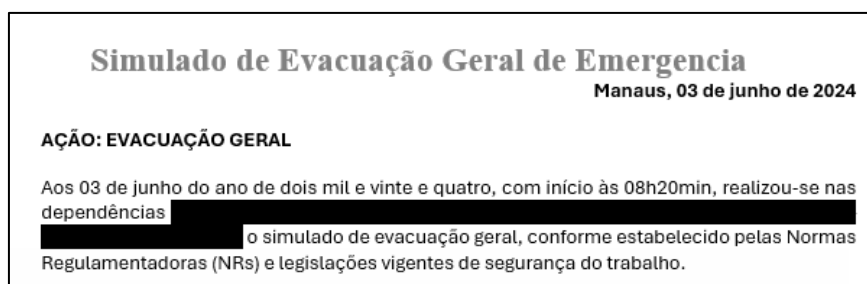


Figura 97 - Trecho Inicial do Relatório de Evacuação

Com informações da equipe de gestão, o modelo foi ajustado de modo a contemplar situações específicas de leiaute, Figura 98, com estações de trabalho (*WS – Work Station*) adicionais, zonas para armazenamento de material de produção (*WIP - Work in Progress*) e zonas de armazenagem de matéria-prima (*MP – Matéria Prima*).

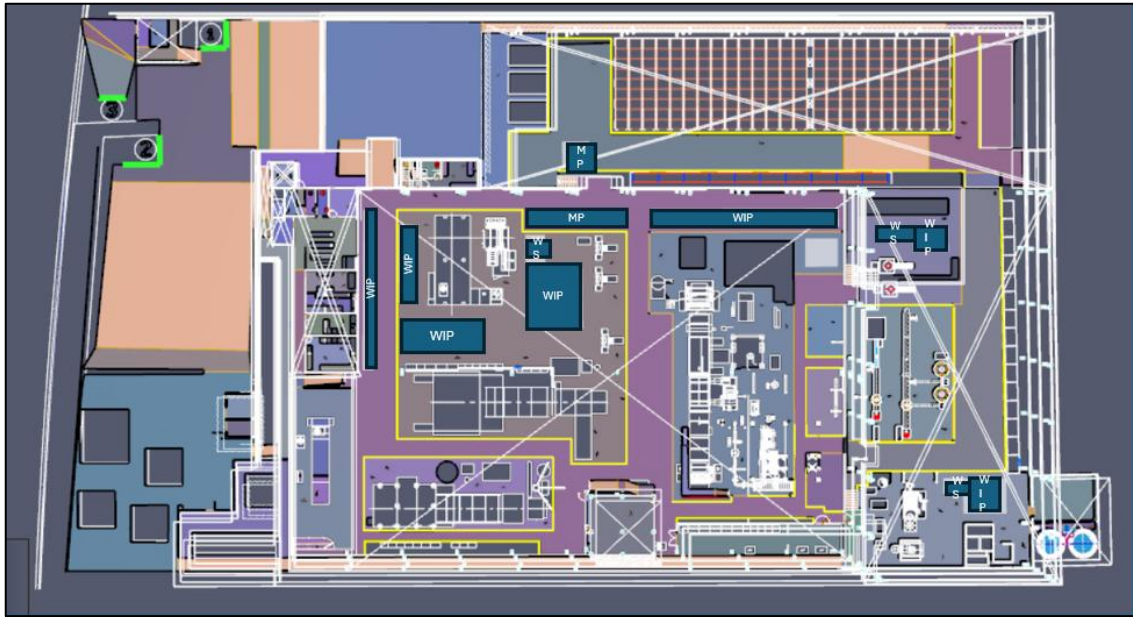


Figura 98 - Modelo Ajustado para o Layout 2024 - Cenário 10

Nas zonas de produção foram indicados pontos de ajustes na malha de navegação com a inclusão de áreas onde os agentes não poderiam transitar. Tais pontos correspondem ao armazenamento de matéria-prima (MP), inventário de produção (WIP) e estações de trabalho (WS); zonas utilizadas na altura do exercício de evacuação de emergência.

Os macro resultados desta simulação de reconstrução foram apresentados na Figura 99 para as devidas análises.

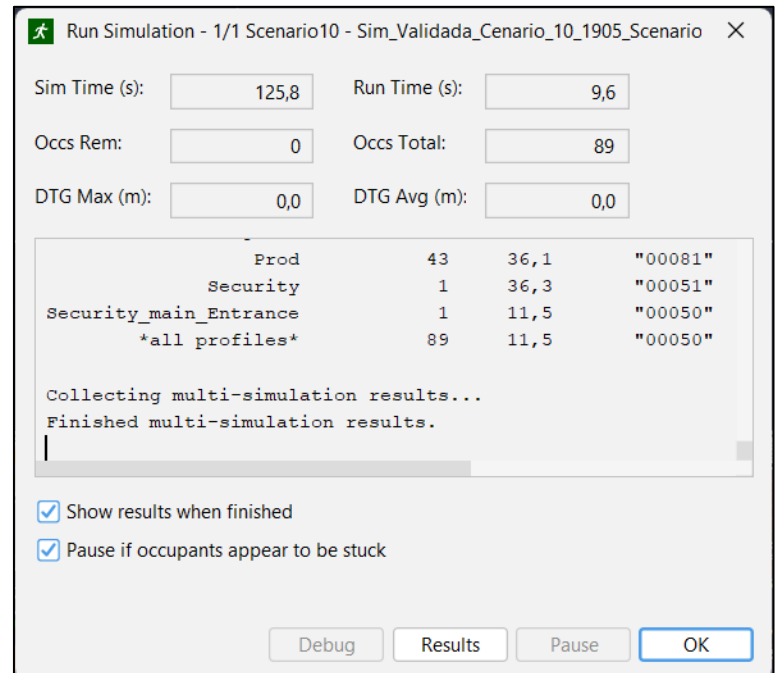


Figura 99 - Resultado Inicial da Simulação (Summary) - Cenário 10

O cenário correu em um tempo de processamento computacional de 9.6 segundos, reportando para os 89 ocupantes um tempo de evacuação de 125.98 segundos. Os macro resultados foram apresentados na Tabela 20, em conjunto com os Cenários 1 e 6 que foram simulados para o mesmo período da manhã.

Tabela 20 - Resultados Cenário 10

Métrica	Cenário 1	Cenário 6	Cenário 10
Ocupantes (peões)	69	87	89
Tempo Mínimo de Evacuação (s)	27,0	32,5	27,0
Ocupante Mais Rápido	0026 - Estagiário	0073 - Limpeza	0026 - Estagiário
Tempo Máximo de Evacuação (s)	121,2	124,2	125,7
Ocupante Mais Lento	0048 - Manutenção	0048 - Manutenção	0048 - Manutenção
Tempo Médio de Evacuação (s)	66,4	73,2	68,0
Distância Mínima Percorrida (m)	11,5	11,5	11,5
Ocupante com Menor Trajeto	0050 - Segurança	0050 - Segurança	0050 - Segurança
Distância Máxima Percorrida (m)	132,8	135,3	138,0
Ocupante com Maior Trajeto	0048 - Manutenção	0048 - Manutenção	0048 - Manutenção
Distância Média Percorrida (m)	62,7	71,7	67,4

Na altura do exercício de evacuação real, existiu uma sinalização da equipa interna de combate a incêndios, com o objetivo de direcionar os ocupantes para as zonas de descargas e garantir que todos os acessos estivessem desobstruídos. O tempo registado pela empresa para essa atividade foi de 6 minutos, onde não foi possível identificar o tempo de pré evacuação, provocado pelo aviso prévio do exercício e da orientação de uma equipa para organizar a saída.

Assumindo um tempo de pré evacuação de 120 segundos, constatou-se que o tempo de evacuação se fixou em torno de 240 segundos. Nota-se um tempo elevado quando comparado ao resultado obtido no *software* de simulação, com valor de 125.7 segundos.

Para a evolução do número de ocupantes que já finalizaram o evento a Figura 100 ilustra uma comparação entre o Cenário 10 de reconstrução e os Cenários 1 e 6 de referência.

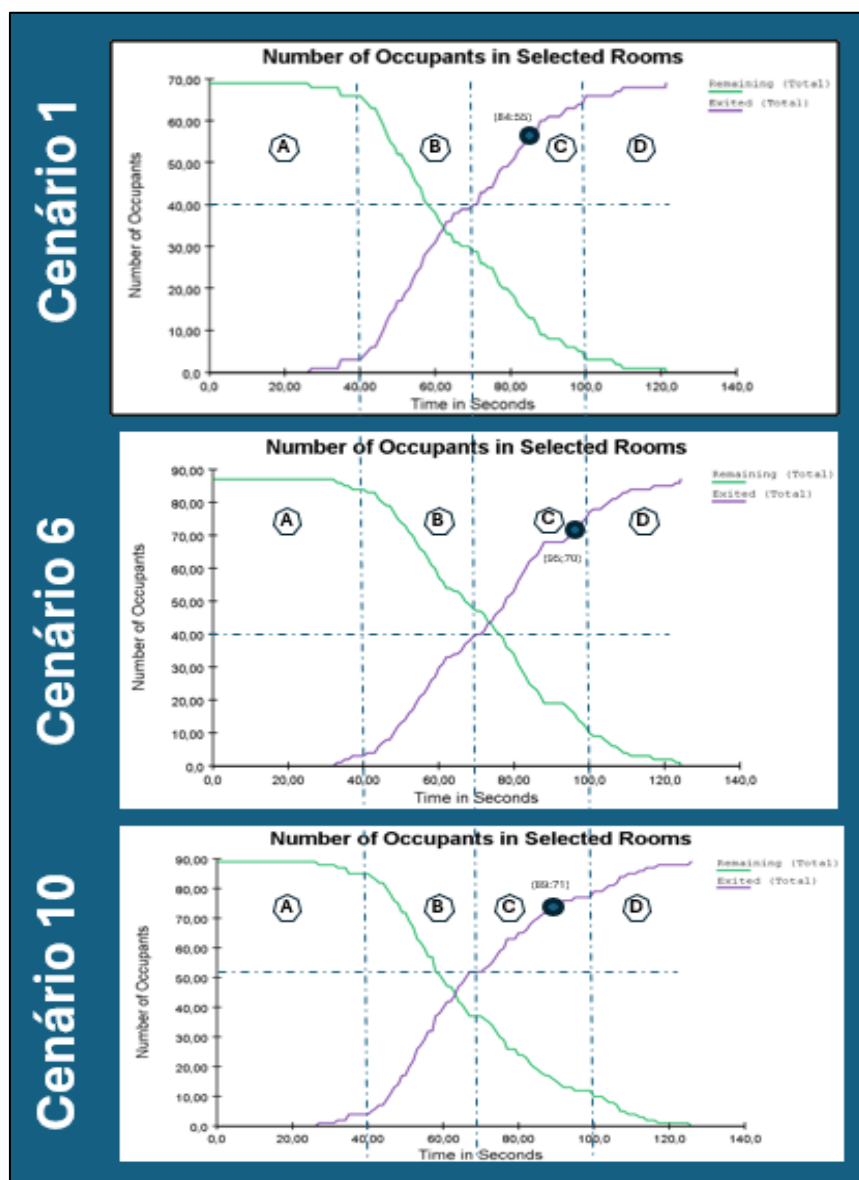


Figura 100 - Evolução do Número de Ocupantes - Cenários 1, 6 e 10

Com ocupações variadas em cada um dos cenários, nomeadamente 69, 87 e 89 ocupantes; definiu-se uma métrica de verificação do tempo de abandono da área da fábrica para 80% dos ocupantes. Os valores encontrados para o tempo de evacuação e 80% da ocupação foram 84, 95 e 86 segundos nomeadamente para os Cenários 1, 6 e 10.

A Tabela 21, consolidou os cálculos para demonstrar os resultados da evacuação de 80% dos ocupantes.

Tabela 21 - Evacuação de 80% dos Ocupantes - Cenários 1, 6, 10

Métrica	Cenário 1	Cenário 6	Cenário 10
Ocupantes (peões)	69	87	89
80% dos Ocupantes (peões)	55	70	71
Tempo de Evacuação Total (s)	121,2	124,2	125,7
Tempo de Evacuação de 80% dos ocupantes (s)	84	95	86
Percentual do Tempo de Evacuação	69%	76%	68%

O percentual do tempo de evacuação para 80% dos ocupantes foi similar para os Cenários 1 e 10, mesmo o cenário de reconstrução incluindo novos elementos na malha de navegação que mudaram determinados percursos dentro do evento de evacuação, justificando o aumento do valor da distância média percorrida pelos agentes em relação ao Cenário 1. A mesma análise em relação ao Cenário 6 resultou na diminuição do tempo médio de evacuação. A Tabela 22, demonstrou os indicadores para o Cenário 10, incluindo as métricas de congestionamento tendo como linhas de base os Cenários 1 e 6.

Tabela 22 - Resultados com Métricas de Congestionamento - Cenário 10

Métricas	Cenário 1	Cenário 6	Cenário 10
Restrições	Nenhuma	Nenhuma	MP, WS, WIP
Tempo de Evacuação (s)	121,2	124,3	125,8
Tempo mínimo de evacuação (s)	26,95	32,53	26,95
Tempo máximo de evacuação (s)	121,18	124,18	125,70
Tempo médio de evacuação das pessoas (s)	66,44	73,19	68,04
Distância Mínima percorrida (m)	11,51	11,51	11,51
Distância Máxima percorrida (m)	132,79	135,29	138,04
Distância média percorrida (m)	62,65	71,69	67,40
Tempo Mínimo de Congestionamento	0,83	0,83	0,83
Tempo Máximo de Congestionamento	30,25	30,53	30,25
Tempo Médio de Congestionamento	3,68	3,64	3,10
Pico zona Frontal (occ)	14	15	19
Densidade na Zona frontal (occ/m2)	0,10	0,11	0,13

O cenário de reconstrução apresentou o número de ocupantes de 89, valor próximo ao Cenário 6, com 87, que permitiu a comparação dos tempos médios de evacuação. Com uma ocupação ligeiramente maior e a inclusão de elementos dentro das zonas de fabricação o Cenário 10 performou melhor com um tempo médio de evacuação de 68.04 segundos, tempo 7.04% menor do que o Cenário 6 na simulação. Em relação ao tempo médio de congestionamento, o Cenário 10 destacou-se frente aos cenários de comparação. No entanto, observa-se um aumento na densidade de ocupantes na zona do pátio frontal da empresa e no valor de pico de ocupação do pátio frontal. A Figura 101 demonstra as curvas dos três cenários no pátio frontal, para detalhamento desta métrica.

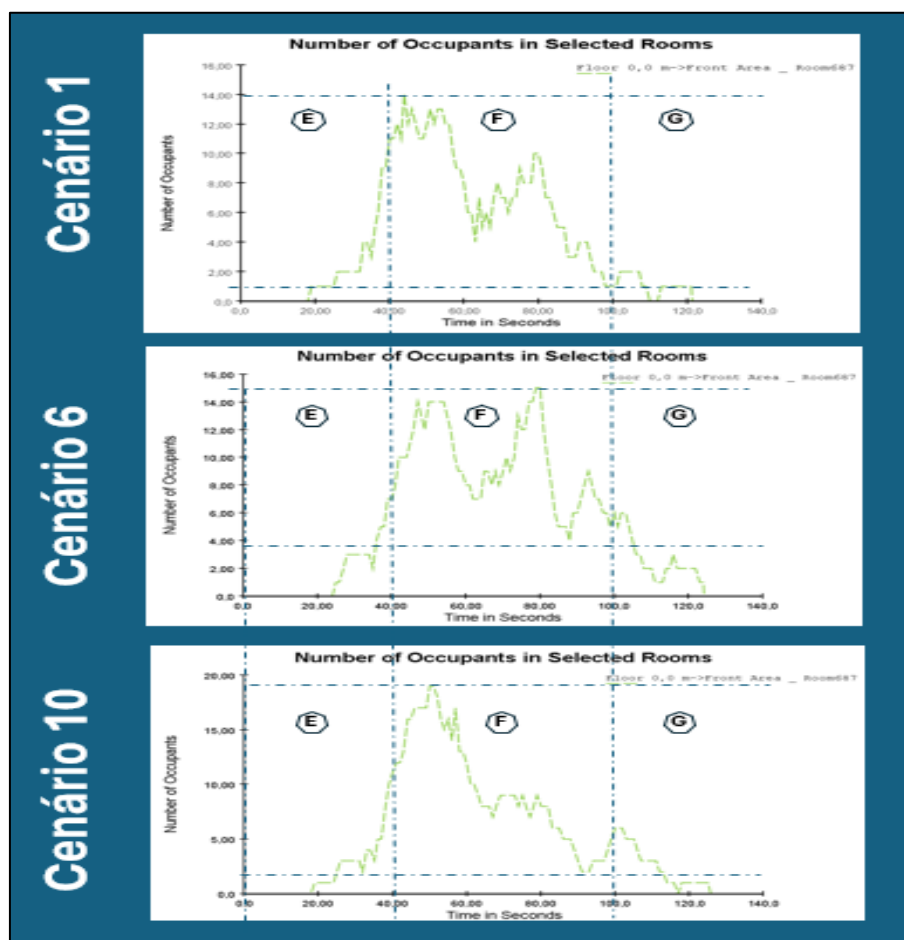


Figura 101 - Número de Ocupantes no Pátio frontal da Empresa - Cenários 1, 6 e 10

No intervalo F do gráfico, representado na Figura 101, o Cenário 10 apresentou uma variação maior do que os demais cenários, tendo como ocupantes mínimos o valor de 2 pessoas e o máximo de 19 ocupantes, enquanto os valores de 1 a 14 e 4 a 15, foram encontrados para os Cenários 1 e 6 nomeadamente. O Intervalo F revelou o maior pico de ocupação para o Cenário 10 e uma diminuição mais constante no número de ocupantes, justificada por um amortecimento devido as novas rotas dentro da produção, onde os corredores principais foram priorizados pelos ocupantes em evacuação.

A comparação entre os cenários 6 e 10, demonstraram que os elementos adicionais ao Cenário 10 causaram impacto no fluxo do intervalo I. A Figura 102, compara as curvas de fluxo de ocupantes em cada uma das passagens das zonas de saída.

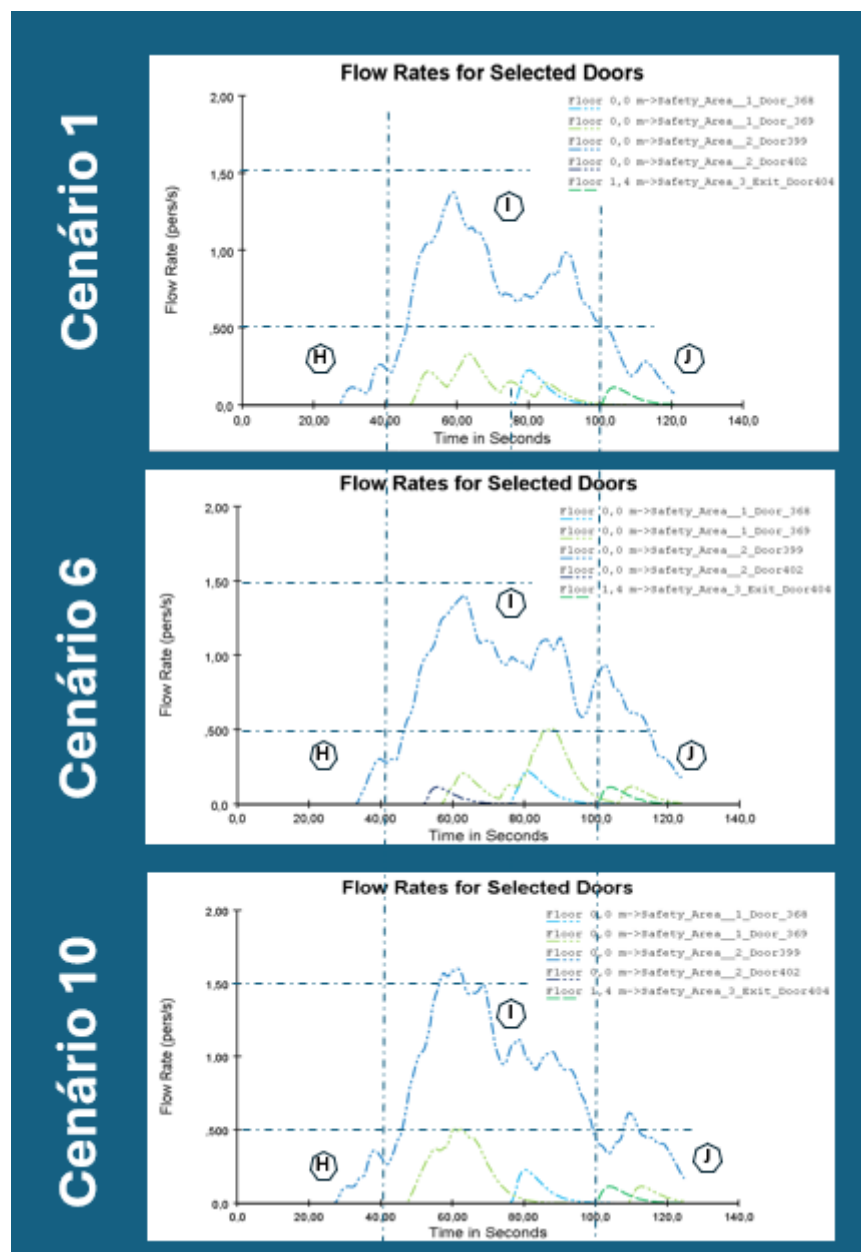


Figura 102 - Fluxo de Pessoas nas Zonas de Saída - Cenários 1, 6 e 10

Confirmando um maior fluxo no intervalo entre os 40.0 e 100 segundos, o Cenário 10 apresentou os maiores valores de fluxo de pessoas por segundo, no qual a zona de saída 2, com uma de suas passagens, Door399 destacou-se novamente como nos demais cenários comparados, reforçando sua importância e posicionamento estratégico dentro de toda a edificação e estrutura utilizada para a evacuação. A exemplo do Cenário 1 a zona de saída 1, do Cenário 10, com a passagem Door_369, rececionou os ocupantes como forma de completar a demanda de fluxo gerado no pátio frontal da empresa durante o pico de ocupação, acima de 15 pessoas por segundo.

4.2. Discussão de Resultados

Os resultados de cada cenários foram consolidados e avaliados de acordo com métricas de performance de modo a ordenar os cenários e extrair contributos para a melhoria do processo de evacuação da empresa. A definição das métricas teve por objetivo analisar condições que possam somar ao simples tempo de evacuação mais curto.

A Tabela 23, demonstra a ordem de performance de cada um dos cenários considerando apenas o tempo total de evacuação.

Tabela 23 - Performance do Cenário - Tempo de Evacuação

Posição	Cenário	Ocupantes (pess)	Restrições	Tempo de Evacuação (s)
1	5	21	Madrugada	110,3
2	3	69	Rampa Bloqueada	119,5
3	1	69	Nenhuma	121,2
4	4	69	Escada Bloqueada	121,2
5	6	87	Nenhuma	124,3
6	9	87	Escada Bloqueada	124,3
7	10	89	MP,WS,WIP	125,8
8	8	87	Rampa Bloqueada	136,8
9	2	69	Saídas Bloqueadas	137,8
10	7	87	Saídas Bloqueadas	140,8

O Tempo de Evacuação para o Cenário 5, da madrugada, foi o mais rápido, justificado pelo menor número de ocupantes. Para os cenários de referência, 1, 6 e 10 nomeadamente, o número de ocupantes demonstra influenciar na performance do tempo de evacuação final. Da mesma forma, a análise para as mesmas condições nos pares de cenários {2,7}, {3,8} e {4,9}; o tempo representou o fator decisório inicial para a melhor performance.

Na continuidade da análise os cenários com quantidade de ocupantes de 69, demonstraram a melhor performance de evacuação na sequência de Cenários 3, 1, 4 e 2, com destaque positivo para a performance do cenário com rampa bloqueada e de atenção para a necessidade da evacuação total sem a possibilidade de uso das zonas de saída 1 e 2. A configuração com a rampa bloqueada utilizou um corredor alternativo que contribuiu para a escolha futura de uma zona de saída mais próxima. Em relação ao cenário com o lanço de escada bloqueada o tempo similar, justificou-se pela melhor distribuição de saída dos ocupantes em decorrência da necessidade da realização de percurso maior evacuação do pavimento 02, aumento de distância que atenuou a pressão na saída.

Para conjunto de cenários com 87 ocupantes, ao contrário do conjunto anterior, a sequência de melhor desempenho foi definida pelos cenários 6, 9, 8 e 7, com o cenário restrito pelo bloqueio do lanço de escada com performance similar ao de referência. O primeiro ponto de atenção para esse conjunto de cenários é o gargalo criado pelo bloqueio da rampa de saída, uma vez que com um contingente maior de ocupantes, a restrição da rampa causa um

congestionamento e criação de um gargalo que compromete a performance final do tempo de evacuação. O segundo ponto de atenção é para o Cenário 7 com o bloqueio das zonas internas de ponto de encontro e direcionamento para a linha de saída 3. Destaca-se que os Cenários 2 e 7, com as saídas bloqueadas, formam o conjunto com o maior tempo de evacuação dentre os simulados.

A Tabela 24, ilustra a performance baseada no tempo médio de evacuação de cada um dos cenários.

Tabela 24 - Performance dos Cenários - Tempo Médio de Evacuação

Posição	Cenário	Ocupantes (peões)	Restrições	Tempo de Evacuação (s)	Tempo Mínimo de Evacuação (s)	Tempo Máximo de Evacuação (s)	Tempo Médio de Evacuação (s)
1	1	69	Nenhuma	121,2	26,95	121,18	66,44
2	3	69	Rampa Bloqueada	119,5	26,95	119,45	67,20
3	10	89	MP, WS, WIP	125,8	26,95	125,70	68,04
4	4	69	Escada Bloqueada	121,2	26,95	121,18	68,42
5	6	87	Nenhuma	124,3	32,53	124,18	73,19
6	9	87	Escada Bloqueada	124,3	32,53	124,18	74,89
7	5	21	Madrugada	110,3	34,08	110,18	74,95
8	8	87	Rampa Bloqueada	136,8	32,53	136,63	75,24
9	2	69	Saídas Bloqueadas	137,8	44,13	137,65	86,10
10	7	87	Saídas Bloqueadas	140,8	49,63	140,65	94,30

Em relação ao tempo médio de referência o Cenário 10, alcançou uma melhor posição em relação ao cenário 6 com 87 ocupantes. com um tempo médio de evacuação 7.04% menor do que o cenário 6. Nesta métrica, o Cenário 5 da madrugada ficou em uma posição de menor destaque, alcançando o sétimo tempo médio de evacuação. Para os cenários com restrições, o número de ocupantes continua a pesar no posicionamento das melhores performances.

Para a análise em função da distância média percorrida a Tabela 25, ordena os cenários para a avaliação dos resultados.

Tabela 25 - Performance dos Cenários - Distância Média Percorrida

Posição	Cenário	Ocupantes (peões)	Restrições	Tempo de Evacuação (s)	Tempo Médio de Evacuação (s)	Distância Mínima Percorrida (m)	Distância Máxima percorrida (m)	Distância Média Percorrida (m)
1	3	69	Rampa Bloqueada	119,5	67,20	11,51	141,99	60,56
2	1	69	Nenhuma	121,2	66,44	11,51	132,79	62,65
3	10	89	MP, WS, WIP	125,8	68,04	11,51	138,04	67,40
4	4	69	Escada Bloqueada	121,2	68,42	11,51	132,79	67,78
5	8	87	Rampa Bloqueada	136,8	75,24	11,51	148,19	70,59
6	6	87	Nenhuma	124,3	73,19	11,51	135,29	71,69
7	9	87	Escada Bloqueada	124,3	74,89	11,51	135,30	75,88
8	5	21	Madrugada	110,3	74,95	11,51	122,30	77,93
9	2	69	Saídas Bloqueadas	137,8	86,10	12,96	150,82	80,77
10	7	87	Saídas Bloqueadas	140,8	94,30	13,33	153,31	90,52

A restrição de rampa bloqueada, mesmo aparecendo como melhor performance para esse critério de distância média percorrida, mostrou-se um problema para cenários com maior densidade de ocupantes na área fabril, onde gargalos dentro do corredor alternativo

diminuíram o fluxo de pessoas em direção as zonas de saída finais, como evidenciado no Cenário 8. Destaca-se novamente o Cenário 10, que com um leiaute mais carregado que os demais cenários, ao restringir o caminho pelas zonas das máquinas e direcionar a opção de escolha da saída pelos corredores da produção, teoricamente mais livres de obstáculos, alcançou o terceiro melhor desempenho neste critério. Esta métrica de distância média foi diretamente impactada pelo bloqueio dos lanços de escadas de saída da zona de escritórios, principalmente no Cenário 9, que por outro lado mostrou uma alternativa viável de saída do pavimento 02 em caso de sinistros reais.

A Tabela 26, registou a sequenciação dos cenários por tempo médio de congestionamento para as discussões de performance dos cenários.

Tabela 26 - Performance dos Cenários - Tempo Médio de Congestionamento

Posição	Cenário	Ocupantes (peões)	Restrições	Tempo de Evacuação (s)	Tempo Médio de Evacuação (s)	Distância Média Percorrida (m)	Tempo Mínimo de Congestionamento (s)	Tempo Máximo de Congestionamento (s)	Tempo Médio de Congestionamento (s)
1	5	21	Madrugada	110,3	74,95	77,93	0,83	4,15	1,48
2	4	69	Escada Bloqueada	121,2	68,42	67,78	0,83	13,10	1,97
3	9	87	Escada Bloqueada	124,3	74,89	75,88	0,83	17,30	2,10
4	10	89	MP,WS,WIP	125,8	68,04	67,40	0,83	30,25	3,10
5	8	87	Rampa Bloqueada	136,8	75,24	70,59	0,83	30,53	3,64
6	6	87	Nenhuma	124,3	73,19	71,69	0,83	30,53	3,64
7	7	87	Saídas Bloqueadas	140,8	94,30	90,52	0,83	30,53	3,65
8	1	69	Nenhuma	121,2	66,44	62,65	0,83	30,25	3,68
9	3	69	Rampa Bloqueada	119,5	67,20	60,56	0,83	30,25	3,68
10	2	69	Saídas Bloqueadas	137,8	86,10	80,77	0,83	30,25	3,70

O cenário 5, justificado pelas condições de operação de número de ocupantes reduzido durante o horário da madrugada, apresentou melhor performance em relação ao tempo médio de congestionamento. A posição dos cenários 4 e 9 com bloqueio do lanço de escada, justificou-se pela condição de retardar a chegada dos ocupantes do pavimento 02 às zonas de maior congestionamento próximo ao pátio frontal da empresa. Destaca-se mais uma vez o cenário 10 com o direcionamento dos ocupantes da área fabril preferencialmente nos corredores da produção evitando a passagem entre os postos de trabalho e zonas com de armazenamento adicional de matéria-prima que poderiam aumentar o congestionamento em determinadas situações e prevenir pequenos riscos de lesões durante o processo de evacuação.

A análise consolidada dos cenários revelou que o volume populacional ditou o tempo total de evacuação, sendo o período da madrugada, cenário 5, o mais rápido e os cenários com bloqueios de saídas, cenários 2 e 7, os de maior tempo de evacuação simulados. Nos cenários com 69 ocupantes, o bloqueio da rampa no cenário 3 destacou-se positivamente ao desviar o fluxo para um corredor alternativo eficiente, enquanto a obstrução da escada no cenário 4 manteve o tempo total praticamente o mesmo com a saída do pavimento 02 sendo realizada por um trajeto mais alargado. Em contrapartida, com a pressão de 87 ocupantes na empresa, o bloqueio da rampa no Cenário 8 causou o efeito inverso, provocando congestionamento e um gargalo no corredor alternativo que comprometeu a performance final da evacuação nestas condições.

Avaliado sob as métricas de tempo médio, distância e congestionamento, o cenário 10, com maior armazenagem dentro da zona produtiva, alcançou um desempenho superior ao de referência de 87 pessoas, por direcionar os peões diretamente para os corredores da produção evitando atalhos entre a zona de instalação dos equipamentos.

Adicionalmente, as simulações comprovaram que o bloqueio das escadas administrativas, nos cenários 4 e 9, atuou de forma reguladora de fluxo, ao trazer um efeito benéfico, mesmo com o aumento das distâncias médias percorridas; o retardo da chegada a zona frontal reduziu drasticamente o tempo médio de congestionamento e aliviou as saídas principais, estabelecendo-se como uma alternativa viável para situações reais de sinistro. A opção de escolha da escada entre o mezanino e o escritório pode ser explorada em treinamentos da equipa de emergência e exercícios futuros de evacuação.

5. Conclusão

Este capítulo visa apresentar e discutir os resultados obtidos para os dez cenários configurados e simulados foi elaborado uma classificação por quatro métricas compostas por indicadores fornecidos pelos relatórios gerados pela simulação computacional.

O presente trabalho foi desenvolvido no âmbito do mestrado de Engenharia e Gestão Industrial do Instituto Superior de Engenharia do Porto. Esta dissertação baseou-se no desenvolvimento de um modelo de simulação computacional com o auxílio do *software* Pathfinder, com o objetivo de analisar diferentes cenários de evacuação, de modo a avaliar situações de risco, rotas alternativas e estrangulamentos dentro da rota de saída. A análise dos cenários buscaram proporcionar um conjunto de informações à empresa para a melhoria do seu processo de evacuação. Neste capítulo, são apresentadas conclusões finais do trabalho, o valor acrescentado à empresa, as dificuldades encontradas, as limitações e trabalhos futuros de investigação sobre a temática.

Com o auxílio de ferramentas computacionais foi possível descrever e desenvolver um gêmeo digital, uma versão virtual da estrutura da empresa. O objetivo do processo de evacuação da empresa é garantir a segurança dos ocupantes durante um sinistro com a utilização de treino, sinalização e identificação dos pontos de encontro indicados como saídas de seguras. O tempo de evacuação real foi estimado a partir do registo do último exercício de evacuação real realizado no ano de 2024.

O cenário da última evacuação real e outros cenários mais próximos da realidade da empresa foram simulados e seus resultados analisados, comparados e ordenados quanto a métricas que um menor tempo de evacuação e a melhor performance nas métricas estabelecidas.

O *software* que permitiu a criação do modelo computacional foi o Pathfinder com fornecimento de vistas 2d/3d da unidade fabril e relatórios dos resultados de cada cenário, com variantes de ocupação e restrições de obstruções de componentes de acesso utilizados em cenários de referência, especialmente definidos neste trabalho para descobrir esses elementos críticos.

Os perfis de comportamento utilizados buscaram assemelhar o perfil da população de ocupantes que a empresa integra no momento.

5.1. Conclusões Finais

O desenvolvimento desta investigação permitiu concluir que a utilização da modelagem computacional, baseada em gêmeo digital com auxílio do *software Pathfinder*, constitui uma metodologia robusta com contributos para os planos de evacuação. A preparação, análise, diagnóstico e prevenção suportada pela simulação permitiu demonstrar a geometria interna da empresa em visão 3d a partir de desenhos de plantas 2d. Com possibilidades diversas de testar a resiliência da edificação com cenários de bloqueios de acessos ou ainda antever impactos em futuras mudanças de *leiaute* industrial, sem impactos desnecessários ao plano de produção e tempo útil dos trabalhadores.

A simulação demonstrou que bloqueios localizados podem, em condições de configuração e carga controladas, como nos Cenários 3 e 4, atuar de forma positiva e benéfica ao reduzir drasticamente os tempos de congestionamento intermédio e evitar aglomerações nas rotas de saída. Contudo, a correta análise precisa ser executada para se entender o limite de ocupação dos corredores alternativos, que podem gerar estrangulamentos com o aumento de ocupantes, como identificado nos Cenários 8 e 9. O ensaio de reconstituição histórica, com base no Cenário 10, comprovou que a utilização de trajetos conhecidos e demarcados apresenta-se como caminho com maior probabilidade de não causar congestionamento, nomeadamente os corredores com demarcação de piso, em detrimento de caminhos sem sinalização entre os equipamentos.

5.2. Valor Acrescentado à Empresa

A entrega do modelo digital tridimensional validado confere à empresa uma ferramenta de treino e conscientização de elevado valor operacional e estratégico. A empresa passa a dispor de um gêmeo digital capaz de testar preventivamente impactos no evento de evacuação por alterações de *leiaute* produtivo, inserção de novas estações de trabalho ou outras expansões, avaliando os impactos na segurança sem necessidade de paragem da operação.

Nota-se a necessidade da manutenção da sinalização horizontal, como a demarcação do corredor, que demonstrou ser de grande importância quando da reconstrução do último inventário e de todos os pontos de saída.

A confirmação prática da importância do mapeamento dos pontos críticos para garantir sempre a desobstrução ou identificar zonas de possível estrangulamento e acúmulo de ocupantes, como identificado no corredor alternativo a rampa de acesso ao pavilhão de produção.

O entendimento de que certas rotas secundárias podem ser cruciais em momentos de evacuação real de emergência, como os lanços de escada do pavimento 02.

5.3. Dificuldades Encontradas

Durante a execução do projeto de investigação, identificaram-se algumas dificuldades em relação ao entendimento do funcionamento do software de simulação; etapa rapidamente superada com apoio do orientador.

O elevado tempo de resposta para algumas solicitações feitas à empresa e a elevada complexidade das informações recebidas.

Entendimento do procedimento atual de evacuação da empresa, utilizado no último exercício de evacuação.

5.4. Limites e Investigações Futuras

O modelo computacional baseou-se estritamente na mecânica de movimento, *Steering mode*. Não foram considerados os efeitos fisiológicos e psicológicos decorrentes da propagação de fumo ou calor na visibilidade e na velocidade de caminhada dos agentes.

Recomenda-se a continuidade da investigação com a utilização do modelo de evacuação acoplado a um simulador de dinâmica de fluidos computacional (CFD), que através de uma análise combinada permitirá confrontar diretamente o tempo de desocupação disponível sob o efeito real do fumo e dos gases quentes.

Referências

- Aheleroff, S., Xu, X., Zhong, R. Y., & Lu, Y. (2021). Digital Twin as a Service (DTaaS) in Industry 4.0: An Architecture Reference Model. *Advanced Engineering Informatics*, 47, 101225. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.aei.2020.101225>
- Ahn, C., Kim, H., Choi, I., & Rie, D. (2022). A Study on the Safety Evaluation of Escape Routes for Vulnerable Populations in Residential Facilities. *Sustainability (Switzerland)*, 14(10). <https://doi.org/10.3390/su14105998>
- Akter, J., Sultana, S., Hossain, M. M., Datta, S. D., & Tutul, M. T. E. (2026). A BIM-based simulation and evacuation assessment to improve fire safety management. *Journal of Building Pathology and Rehabilitation*, 11(1). <https://doi.org/10.1007/s41024-025-00716-3>
- Billey, A., & Wuest, T. (2024). Energy digital twins in smart manufacturing systems: A case study. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 88. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2024.102729>
- Borralho, T. M. O., Rodrigues, J. P. C., & Dos Santos, C. C. (2025). Evacuation of Lisbon's Baixa-Chiado subway station in case of fire. *Architecture, Structures and Construction*, 5(1). <https://doi.org/10.1007/s44150-025-00127-5>
- BSI. (2019). PD 7974-6:2019 - Application of fire safety engineering principles to the design of buildings. Human factors. Life safety strategies. Occupant evacuation, behaviour and condition (Sub-system 6). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2021.103379>
- Caixeta, M. C. B. F., & Fabricio, M. M. (2018). Métodos e instrumentos de apoio ao codesign no processo de projeto de edifícios. *Ambiente Construído*, 18(1), 111–131. <https://doi.org/10.1590/s1678-86212018000100212>
- Calderon-Monge, E., & Ribeiro-Soriano, D. (2024). The role of digitalization in business and management: a systematic literature review. *Review of Managerial Science*, 18(2). <https://doi.org/10.1007/s11846-023-00647-8>
- CBMAM. (2019). *Instrução Técnica 11 - Saídas de Emergência*. Corpo de Bombeiros Militar Do Estado Do Amazonas. <https://sisgat.cbm.am.gov.br/portal/legislacaos/4>
- Chagas, G. (2023, January 26). *Lei Kiss modernizou regras de prevenção contra incêndios no Rio Grande do Sul*. Portal G1 de Notícias. <https://g1.globo.com/rs/rio-grande-do-sul/noticia/2023/01/26/lei-kiss-incendios-rs-10-anos.ghtml>
- Chanthakhot, W., & Ransikarbum, K. (2025). Integrated computer simulation and data envelopment analysis for fire emergency and evacuation planning in an industrial setting. *JOURNAL OF INDUSTRIAL AND PRODUCTION ENGINEERING*. <https://doi.org/10.1080/21681015.2025.2511843>
- Correa, I. C. (2025). *Perfil antropométrico e qualidade de vida de trabalhadores de fábricas do Polo Industrial de Manaus*.
- Coutinho, C. P. (2014). *Metodologia de investigação em ciências sociais e humanas*. Leya.

- Creswell, J. (2014). *Research Design Qualitative, Quantitative, and Mixed Methods Approaches* (4th ed.). Sage Publications.
- Cui, Y., Wang, H., You, B., Cheng, C., & Li, M. (2023). Simulation Study on Fire Product Movement Law and Evacuation in a University High-Rise Teaching Building. *Applied Sciences (Switzerland)*, 13(18). <https://doi.org/10.3390/app131810532>
- Duran, J. M. (2020). What is a Simulation Model? *MINDS AND MACHINES*, 30(3), 301–323. <https://doi.org/10.1007/s11023-020-09520-z>
- Estado do Amazonas. (2004, March 1). *DECRETO N°. 24.054/2004*. Imprensa Oficial Do Estado Do Amazonas. <https://sisgat.cbm.am.gov.br/legislacaos/download/2>
- Estado do Amazonas. (2022, September 6). *DECRETO N°. 46.366/2022*. Imprensa Oficial Do Estado Do Amazonas. <https://iframe.leisestaduais.com.br/am/decreto-n-46366-2022-amazonas-altera-na-forma-que-especifica-o-regulamento-do-sistema-de-seguranca-contra-incendio-e-panico-em-edificacoes-e-areas-de-risco-instituido-pela-lei-no-2-812-de-17-de-julho-de-2003-aprovado-pelo-decreto-no-24-054-de-1-o-de-marco-de-2004>
- Fan, Y., Cui, H., Qin, J., Liu, C., & Huang, Q. (2024). A Case Study on the Evacuation of People during a Fire in the Workshop of a Large Factory. *Fire*, 7(2). <https://doi.org/10.3390/fire7020047>
- Feng, Z., Hou, C. H. Y., Chen, H., & Liu, Y. (2026). Fire simulation and evacuation optimization for metro stations with interpretability: A hybrid BIM, fire dynamics simulator and multiobjectives optimization algorithm approach. *Journal of Building Engineering*, 117. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2025.114798>
- Ferreira, L. P., Costa, C., Ramos, A. L., & Valero, M. R. (2025). Contribution of Artificial Intelligence and Simulation to Building Evacuation. In V. Tonkonogyi, V. Ivanov, J. Trojanowska, & G. Oborskyi (Eds.), *ADVANCED MANUFACTURING PROCESSES VI, INTERPARTNER-2024* (pp. 3–12). SPRINGER INTERNATIONAL PUBLISHING AG. https://doi.org/10.1007/978-3-031-82746-4_1
- Ferreira, L. P., Ferreira, A., Costa, E., & Ramos, A. L. (2024). The Role of Simulation in the Context of Industry 4.0 in Building Evacuation. *Lecture Notes in Networks and Systems*, 1105 LNNS, 134–141. https://doi.org/10.1007/978-3-031-68634-4_13
- Forcina, A., Silvestri, L., De Felice, F., & Falcone, D. (2024). Exploring Industry 4.0 technologies to improve manufacturing enterprise safety management: A TOPSIS-based decision support system and real case study. *Safety Science*, 169, 106351. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ssci.2023.106351>
- Freixo, M. J. V. (2018). *Metodologia científica: fundamentos, métodos e técnicas* (5.^a ed.). Lisboa: Instituto Piaget.
- Galli, E., Fani, V., Bandinelli, R., Lacroix, S., Le Duigou, J., Eynard, B., & Godart, X. (2023). LITERATURE REVIEW AND COMPARISON OF DIGITAL TWIN FRAMEWORKS IN MANUFACTURING. *Proceedings - European Council for Modelling and Simulation, ECMS, 2023-June*. <https://doi.org/10.7148/2023-0428>
- García, Á., Bregon, A., & Martínez-Prieto, M. A. (2024). Digital Twin Learning Ecosystem: A cyber–physical framework to integrate human-machine knowledge in traditional manufacturing. *Internet of Things (Netherlands)*, 25. <https://doi.org/10.1016/j.iot.2024.101094>
- Grigoras, Z. C., & Ibănescu, M. (2024). A Study Regarding the Human Evacuation from a Hotel in Case of a Fire Drill. *Springer Series in Geomechanics and Geoengineering*, 99–107. https://doi.org/10.1007/978-3-031-43455-6_10
- Gwynne, S. M. V. , & R. E. R. (2016). Gwynne, S. M. V., Employing the hydraulic model in assessing emergency movement. In H. Mrgan (Ed.), *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering* (5th ed., pp. 2115–2119). Springer.

- Helbing, D. (2012). Agent-Based Modeling. In D. Helbing (Ed.), *Social Self-Organization: Agent-Based Simulations and Experiments to Study Emergent Social Behavior* (pp. 25–70). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-24004-1_2
- Hennemann, G. G., Bolina, F. L., Manica, G. C., & Rodrigues, J. P. C. (2022). Investigation on the causes and consequences of Kiss nightclub fire in Brazil. *Architecture, Structures and Construction*, 2(2), 291–309. <https://doi.org/10.1007/s44150-022-00032-1>
- Hurley, M. J., Gottuk, D., Hall, J. R., Harada, K., Kuligowski, E., Puchovsky, M., Torero, J., Watts, J. M., & Wieczorek, C. (2016). SFPE handbook of fire protection engineering, fifth edition. In *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, Fifth Edition*. <https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2565-0>
- Jiang, A., Mo, Y., & Kalasapudi, V. S. (2022). STATUS QUO AND CHALLENGES AND FUTURE DEVELOPMENT OF FIRE EMERGENCY EVACUATION RESEARCH AND APPLICATION IN BUILT ENVIRONMENT. *Journal of Information Technology in Construction*, 27, 781–801. <https://doi.org/10.36680/j.itcon.2022.038>
- Jiang, Y., Liu, G., Du, Y., Cai, S., Si, Z., He, J., & Zhou, X. (2025). Analysis and optimization of fire evacuation safety performance in large urban complexes. *PLOS ONE*, 20(11 November). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0336964>
- Jin, Z. (2024). Building and Construction Safety Design for Emergency Evacuation: A Review of Evacuation Environment and Current Technologies. In J. S. Shane, K. N. Madson, & Y. Mo (Eds.), *CONSTRUCTION RESEARCH CONGRESS 2024: HEALTH AND SAFETY, WORKFORCE, AND EDUCATION* (pp. 396–405).
- Kasereka, S. K., Kabwe, O. M., Kinyanta, M. W. K., Kasongo, A. L., Ilunga, G. W. K., Muhambya, K., Tashev, T., & Kyamakya, K. (2025). Enhancing Building Safety: A Brief Review of Agent-Based Modeling for Fire Evacuation Simulation. *Procedia Computer Science*, 257, 668–675. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.procs.2025.03.086>
- Law, A. (2014). *Simulation_Modeling_and_Analysis* (5.^a ed.). McGraw-Hill Education.
- Li, J., Zhu, C., Wang, Y., Li, H., & Li, Q. (2023). Research on occupant evacuation algorithm of buildings with several exits based on human flow distribution. *Journal of Safety and Environment*, 23(6), 2003–2008. <https://doi.org/10.13637/j.issn.1009-6094.2021.1891>
- Li, L., Tao, G., & Zhang, L. (2023). Numerical simulation of fire and evacuation in comprehensive experimental office building. 1012–1016. <https://doi.org/10.1145/3656766.3656934>
- Li, Q., Zhou, Z., Sun, Y., & He, H. (2025). Risk assessment and simulation optimization of evacuation in large public building fires: A case study. *Progress in Disaster Science*, 27. <https://doi.org/10.1016/j.pdisas.2025.100454>
- Liao, X., Zhou, B., Liu, Y., Zhang, L., Zhou, Z., & Chong, H. Y. (2026). Reconstruction of existing buildings for evacuation assessment under emergency situations using 3D Gaussian splatting and machine learning. *Reliability Engineering and System Safety*, 267. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2025.111887>
- Lin, J.-R., Chen, K.-Y., Song, S.-Y., Cai, Y.-H., Pan, P., & Deng, Y. (2025). Digital Twin of Buildings and Occupants for Emergency Evacuation: Framework, Technologies, Applications and Trends. *Advanced Engineering Informatics*, 66, 103419. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2025.103419>
- Lin, Y., & Zhou, B. (2024). A numerical simulation-based solution for enhancing the safety evacuation of the high-rise complex in geriatric hospital. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 107. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2024.104487>
- Liu, G., Han, L., Rui, Z., & Li, Y. (2025). DNN-based fire evacuation risk assessment for large and complex buildings. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 13818. <https://doi.org/10.1117/12.3082333>

Referências

- Liu, J., Zhang, R., Yan, W., Zhao, Q., & Guo, C. (2024). Modeling and simulation of fire evacuation considering guiding factors: a case study of Shenyang subway interchange station. *Simulation*, 100(10), 1053–1068. <https://doi.org/10.1177/00375497241236969>
- Manes, M., Lange, D., & Rush, D. (2023). Resilience, fire and the UK Codes and Standards. Where are they and where could they go? *Indoor and Built Environment*, 32(1), 44 – 65. <https://doi.org/10.1177/1420326X211054423>
- Murgod, T. R., Sundaram, S. M., Mahanthesh, U., & Murugesan, P. (2024). A Survey of Digital Twin for Industry 4.0: Benefits, Challenges and Opportunities. In *SN Computer Science* (Vol. 5, Number 1). <https://doi.org/10.1007/s42979-023-02363-2>
- Naser, M. Z., & Corbett, G. P. (2022). *Handbook of Cognitive and Autonomous Systems for Fire Resilient Infrastructures*. 1–337. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-98685-8>
- Reis, F. L. dos. (2010). Como elaborar uma dissertação de mestrado segundo Bolonha. *Lisboa: Pactor*, 154.
- República Federativa do Brasil. (2017, March 30). *Lei Federal nº 13.425/2017*. Diário Oficial Da União. https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2015-2018/2017/lei/l13425.htm
- Scurati, G. W., Ferrise, F., & Bertoni, M. (2025). Extended realities and discrete events simulations: A systematic review to define design trade-offs and directions. *Computers in Industry*, 164, 104188. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compind.2024.104188>
- Shen, Z., Zhu, H., & Gao, X. (2024). Study on Building Fire and Evacuation Based on Numerical Simulation. *Mechanisms and Machine Science*, 143, 429–437. https://doi.org/10.1007/978-3-031-42515-8_29
- Shu, C., & Wang, L. L. (2023). Smoke Spreading Simulation of High-Rise Office Building Based on Evacuation Analysis. *Environmental Science and Engineering*, 1567–1576. https://doi.org/10.1007/978-981-19-9822-5_161
- Spearpoint, M., Lovreglio, R., & Gwynne, S. (2021). The response of sleeping adults to smoke alarm signals in the Evacuation Decision Model. *Fire Safety Journal*, 123. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2021.103379>
- Stavropoulos, P., & Mourtzis, D. (2022). *Digital twins in industry 4.0* (pp. 277–316). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823657-4.00010-5>
- Sterman, J. D. (2002). SYSTEM DYNAMICS: SYSTEMS THINKING AND MODELING FOR A COMPLEX WORLD. *Massachusetts Institute of Technology. Engineering Systems Division*.
- Tan, J. K. N., Zhang, S., Law, A. W.-K., & Cheung, S. H. (2025). Digital-twin enabled evacuation to improve individual and community resilience of building occupants against indoor Fires: Framework and route-finding algorithm. *Developments in the Built Environment*, 22, 100672. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.dibe.2025.100672>
- Tang, F., & Ren, A. (2008). Agent-Based Evacuation Model Incorporating Fire Scene and Building Geometry. *Tsinghua Science and Technology*, 13(5), 708 – 714. [https://doi.org/10.1016/s1007-0214\(08\)70112-3](https://doi.org/10.1016/s1007-0214(08)70112-3)
- Ternero, R., Sepúlveda, J. M., Alfaro, M. D., Fuertes, G., Vargas, M., Sepulveda Rojas, J. P., & Soto-Jancidakis, L. (2023). Analysis of Pedestrian Behavior for the Optimization of Evacuation Plans in Tall Buildings: Case Study Santiago, Chile. *Buildings*, 13(12). <https://doi.org/10.3390/buildings13122907>
- Thunder Head Engineering. (2026). *Steering Mode*. Thunder Head Engineering. <https://www.thunderheadeng.com/docs/2026-1/pathfinder/appendices/technical-reference/steering/>
- Tian, D., Wu, X., Yao, J., Qu, W., Yang, K., Shi, J., & Wang, J. (2026). Study on personnel movement and evacuation time in large shopping mall fires. *Ain Shams Engineering Journal*, 17(1). <https://doi.org/10.1016/j.asej.2025.103905>
- Uliana, R. S., Lima, R. C. A. De, Quispe Rodríguez, R. Q., & Romano, F. V. (2022). COMPUTATIONAL SIMULATION IN FIRE SAFETY IN BUILDINGS: LITERATURE REVIEW;

- SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL NA SEGURANÇA CONTRA INCÊNDIO EM EDIFICAÇÕES: REVISÃO DE LITERATURA. *Arquiteturarevista*, 18(1), 43–57. <https://doi.org/10.4013/arq.2022.181.03>
- Wan, Z., Yang, F., Zhou, T., & Li, C. (2025). The Effects of Spatial Layout on Efficiency of Safe Evacuation After Conversion of an Exhibition Building to a Fangcang Shelter Hospital. *Buildings*, 15(16). <https://doi.org/10.3390/buildings15162880>
- Wang, H., Liu, H., & Wang, J. (2024). *Numerical Simulation of Fire and Safety Evacuation in a University Dormitory*. 8–11. <https://doi.org/10.1109/EDPEE61724.2024.00007>
- Wang, J., Chen, G., Chen, Y., Zhu, M., Zheng, J., & Luo, N. (2025). Simulation of Fire Smoke Diffusion and Personnel Evacuation in Large-Scale Complex Medical Buildings. *Buildings*, 15(8). <https://doi.org/10.3390/buildings15081329>
- Wang, Y., Zhu, Y., & Li, X. (2024). *Simulation Analysis of Emergency Evacuation of Subway Stations under Sudden Fire Conditions*. 2766–2776. <https://doi.org/10.1061/9780784485484.261>
- Xiong, K., Weng, M., Liu, F., & Lu, Y. (2022). Numerical Study on Evacuation Evaluation and Strategy of Theater with Rotating Auditorium. *Buildings*, 12(8). <https://doi.org/10.3390/buildings12081202>
- Xu, B., Yan, T., Hao, J., Pan, D., Song, L., Li, X., Xu, T., & Ding, H. (2025). Study on fire evacuation route planning for public buildings. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 13515. <https://doi.org/10.1117/12.3054378>
- Xu, L., Huang, K., Liu, J., Li, D., & Chen, Y. F. (2022). Intelligent planning of fire evacuation routes using an improved ant colony optimization algorithm. *Journal of Building Engineering*, 61. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.105208>
- Yi, X., Lu, S., Zhong, Y., Zhang, J., & Guo, Y. (2024). Numerical simulation and safety assessment of fires in historic timber structures based on fire load investigation. *Heritage Science*, 12(1). <https://doi.org/10.1186/s40494-024-01344-9>
- Zhang, L., Zhuang, X., An, J., Li, H. X., Zheng, D., & Yu, N. (2025). The effect of sprinkler and smoke barrier facilities on fire evacuation in apartment buildings. *Journal of Building Engineering*, 111. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2025.113224>
- Zhang, N., Liang, Y., Zhou, C., Niu, M., & Wan, F. (2022). Study on Fire Smoke Distribution and Safety Evacuation of Subway Station Based on BIM. *Applied Sciences (Switzerland)*, 12(24). <https://doi.org/10.3390/app122412808>
- Zhang, Y., Chai, Z., & Lykotrafitis, G. (2021). Deep reinforcement learning with a particle dynamics environment applied to emergency evacuation of a room with obstacles. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 571. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2021.125845>
- Zhang, Y., Wang, J., Wang, Y., Jia, Z., Sun, Q., Pei, Q., & Wu, D. (2024). Intelligent planning of fire evacuation routes in buildings based on improved adaptive ant colony algorithm. *Computers and Industrial Engineering*, 194. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2024.110335>
- Zheng, P., wang, H., Sang, Z., Zhong, R., Liu, Y., Liu, C., Mubarak, K., Yu, S., & Xu, X. (2018). Smart manufacturing systems for Industry 4.0: Conceptual framework, scenarios, and future perspectives. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 13. <https://doi.org/10.1007/s11465-018-0499-5>
- Zhou, M., Zhou, B., Zhang, Z., Zhou, Z., Liu, J., Li, B., Wang, D., & Wu, T. (2023). Fire Egress System Optimization of High-Rise Teaching Building Based on Simulation and Machine Learning. *Fire*, 6(5). <https://doi.org/10.3390/fire6050190>
- Zhou, S., Chen, D., Ming, C., Zhang, R., Bai, S., & Li, T. (2023). Fire Evacuation System Based on UWB Indoor Positioning Technology and Small Program. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, 451–462. https://doi.org/10.1007/978-981-99-2921-4_42

Referências

Zribi, H., Ben Abid, T., Elloumi, A., Hani, Y., Bechir Graba, B., & Elmhamedi, A. (2025). Industry 4.0: digital twins characteristics, applications, and challenges in-built environments. *Production and Manufacturing Research*, 13(1). <https://doi.org/10.1080/21693277.2025.2456277>

Declaração de Integridade

Declaro ter conduzido este trabalho académico com integridade. Não plagiei ou apliquei qualquer forma de uso indevido de informações ou falsificação de resultados ao longo do processo que levou à sua elaboração.

Declaro que o trabalho apresentado neste documento é original e de minha autoria, não tendo sido utilizado anteriormente para nenhum outro fim.

Declaro ainda que tenho pleno conhecimento do Código de Conduta Ética do P.PORTO.

NOME: Marcelo Machado

ISEP, Porto, 12 de junho de 2026