



UNIVERSIDADE D
COIMBRA

Tiago Miguel Orantos Borralho

EVACUAÇÃO DE GARES SUBTERRÂNEAS DE
TRANSPORTE EM CASO DE INCÊNDIO
O CASO DA ESTAÇÃO DE METRO BAIXA CHIADO

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Segurança aos Incêndios Urbanos, sob a orientação, respetivamente, do Professor Doutor João Paulo Correia Rodrigues e da Professora Doutora Cristina Calmeiro dos Santos e apresentada ao Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

Junho de 2022

Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra
Departamento de Engenharia Civil

Tiago Miguel Orantos Borralho

EVACUAÇÃO DE GARES SUBTERRÂNEAS DE TRANSPORTE EM CASO DE INCÊNDIO: O CASO DA ESTAÇÃO DE METRO BAIXA CHIADO

EVACUATION OF UNDERGROUND TRANSPORT STATIONS IN CASE OF FIRE: THE CASE OF THE BAIXA-CHIADO METRO STATION

Dissertação de Mestrado em Segurança aos Incêndios Urbanos
orientada pelo Professor Doutor João Paulo Correia Rodrigues e pela Professora Doutora Cristina Calmeiro dos Santos

Esta Dissertação é da exclusiva responsabilidade do seu autor. O Departamento de Engenharia Civil da FCTUC
declina qualquer responsabilidade, legal ou outra, em relação a erros ou omissões que possa conter.

Junho de 2022



UNIVERSIDADE D
COIMBRA

(Esta página foi propositadamente deixada em branco)

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar há que começar pelos agradecimentos mais importantes, à minha família: À Rita, minha companheira de vida, por embarcar sempre nas minhas ideias, e em particular pelo apoio incondicional ao longo deste mestrado e por ter mantido a família funcional apesar da minha falta de disponibilidade. Aos meus filhos, Eva e Vasco, pela alegria constante. À Isabel, por todo o apoio, principalmente com os netos, durante este período exigente que se sobrepôs com a pandemia, com tudo o que isso acarretou.

Aos Professores João Paulo Correia Rodrigues e Cristina Calmeiro dos Santos pela orientação, incentivo e apoio durante esta jornada.

Ao Professor Fernando Luís da Silva Ferreira, pelos ensinamentos e apoio na resolução de problemas nas simulações com o FDS.

Ao Metropolitano de Lisboa, em particular ao Eng.º António Valente, por desde logo ter apoiado a realização deste trabalho e pela disponibilização de elementos que permitiram a realização dos estudos aqui apresentados.

Aos colegas da UC, Marco Filipe, pelo companheirismo ao longo do curso, e Deives de Paula, pela disponibilidade e apoio nos trabalhos de simulação.

À gerência da A400, em particular ao Eng.º António Monteiro, por ter me apoiado desde o primeiro momento em que lhe falei neste mestrado, e pela flexibilidade permitida ao longo do mesmo. Ao Alexandre Martins, colega e amigo, pelo incentivo e apoio.

À *Thunderhead Engineering* pela disponibilização gratuita das licenças de utilização académica do *PyroSim* e do *Pathfinder*.

Ao Laboratório de Computação Avançada da Universidade de Coimbra pela possibilidade de utilização dos seus recursos computacionais em algumas das simulações levadas a cabo nesta dissertação.

(Esta página foi propositadamente deixada em branco)

RESUMO

Um requisito essencial em qualquer edifício é que existam condições para uma evacuação segura dos seus ocupantes, sendo este tema crucial em gares subterrâneas de transporte. Estes locais estão abaixo do solo, pelo que a evacuação tem forçosamente de ser feita no sentido ascendente, e geralmente correspondem a locais de grande dimensão constituindo um único compartimento de fogo. A Estação de Metro Baixa-Chiado, em Lisboa, foi escolhida por forma a estudar a evacuação de gares subterrâneas de transporte em caso de incêndio aplicada à realidade portuguesa. Os principais motivos foram a sua dimensão, profundidade, o elevado número de passageiros que a frequentam e ser uma estação que serve duas linhas de metro.

Efetou-se uma análise do tempo de evacuação da estação, em múltiplos cenários, variando o número de ocupantes e algumas condições associadas à evacuação. Utilizou-se o programa de simulação de evacuação *Pathfinder*, baseado em agentes, em que cada “indivíduo” tem características e estratégias de fuga individuais. Foram ainda integradas situações de incêndio, desenvolvidas através do “*Fire Dynamics Simulator (FDS)*”. Utilizou-se o *PyroSim* como um pré-processador destas simulações. A importância do sistema de controlo de fumo, e da sua rápida ativação em caso de incêndio, foi evidenciada pelos resultados obtidos. Nas situações em que tal não ocorreu observou-se um agravamento significativo no tempo de movimento dos ocupantes, estimando-se a incapacitação de uma parte significativa dos ocupantes, tendo em conta os níveis registados para a dose efetiva fracionária (FED). As condicionantes arquitetónicas da estação, como a dimensão ou o número de saídas, revelaram-se um fator crucial neste estudo. Foi também analisada a influência na evacuação do número de ocupantes da estação, da utilização das escadas rolantes, da eficácia da sinalização de saída existente, e das características da população em estudo, em particular género e grupo etário.

Os resultados permitiram propor medidas de melhoria das condições de evacuação da estação, como sejam a introdução sinalética dinâmica/adaptativa com função de “*increased affordance*”, a instalação de um sistema de cantonamento de fumo ou a construção de um núcleo de elevadores e escadas enclausuradas que garantam a comunicação entre o exterior e todos os níveis da estação.

Palavras-chave: incêndio, evacuação, estações de metro, comportamento humano, emergência, simulação

(Esta página foi propositadamente deixada em branco)

ABSTRACT

It is essential to ensure that any building has conditions for a safe evacuation of its occupants, this subject being crucial in underground transport stations. These locations are in the underground, therefore the evacuation has to be carried out in an upward way, and usually correspond to large structures constituting a single fire compartment. Baixa-Chiado Subway Station, in Lisbon, was selected to study the evacuation of underground transport stations in case of fire, applied to the Portuguese case. The main reasons were its depth, the high number of passengers that frequent it and that it is a station that serves two metro lines.

An analysis of the evacuation time of the station was done, in multiple scenarios, varying the number of occupants and some conditions associated with the evacuation process. *Pathfinder* software was used to model evacuation, in which each “occupant” has individual characteristics and escape strategies. Fire situations were also integrated, through the use of “*Fire Dynamics Simulator (FDS)*”. *PyroSim* was used as a pre-processor for these simulations.

The importance of the smoke control system, and its rapid activation in the event of a fire, was highlighted by the results obtained. In situations where this did not occur, there was a significant worsening in the evacuation time of the occupants; it was estimated the incapacitation of a significant part of the occupants, considering the levels registered for the fractional effective dose (FED). The station's architectural constraints proved to be a crucial factor in this study. The influence on the evacuation of the number of occupants, the use of escalators, the effectiveness of the existing exit signage, and the characteristics of the study's population, in particular gender and age group, were also analyzed.

The results allowed proposing measures to improve the station's evacuation conditions, such as the introduction of dynamic/adaptive emergency signage with an “increased affordance” function, the installation of a smoke barrier that can limit and control the movement of the smoke or the construction of a protected lift and staircase to ensure vertical communication between the exterior and all levels of the station.

Keywords: fire, evacuation, metro stations, human behavior, emergency, simulation

(Esta página foi propositadamente deixada em branco)

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	v
ÍNDICE.....	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	ix
ÍNDICE DE QUADROS	xiii
ABREVIATURAS	xvii
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Considerações iniciais.....	1
1.2 Motivação	2
1.3 Objetivos.....	4
1.4 Estrutura da tese.....	5
2 EVACUAÇÃO EM CASO DE INCÊNDIO.....	7
2.1 O estudo da evacuação.....	7
2.1.1 Influência dos parâmetros relacionados com os ocupantes.....	8
2.1.2 Influência do efetivo e da densidade de ocupação	17
2.1.3 Influência do comportamento humano.....	18
2.1.4 Influência das condicionantes arquitetônicas das gares subterrâneas de transporte ..	24
2.1.5 Influência da temperatura elevada, do fumo e dos produtos da combustão.....	25
2.2 Modelação da Evacuação.....	29
2.2.1 Método de cálculo analítico da NFPA130	30
2.2.2 Simulação computacional da evacuação	31
2.3 Considerações finais	32
3 MODELAÇÃO DA EVACUAÇÃO DE UMA ESTAÇÃO DE METRO	34
3.1 Objeto do estudo	34
3.1.1 Caraterização da Estação Baixa-Chiado	36
3.1.2 Enquadramento regulamentar da Estação Baixa-Chiado em termos de SCIE.....	37
3.2 Modelação de incêndio	39
3.2.1 Programa de simulação de incêndio.....	39
3.2.2 Caraterização do modelo utilizado.....	40
3.2.3 Localização dos pontos de medição no modelo	46
3.2.4 Definição de cenários de incêndio	47

3.3	Modelação de evacuação.....	48
3.3.1	Programa de simulação de evacuação	48
3.3.1.1.	Geometria.....	49
3.3.1.2.	Comportamentos e objetivos.....	50
3.3.1.3.	Navegação.....	51
3.3.1.4.	Modo SFPE.....	55
3.3.1.5.	Modo de comportamento direcional	57
3.3.1.6.	Integração de resultados da simulação de incêndio	63
3.3.2	Caraterização do modelo utilizado	65
3.3.3	Definição de cenários de evacuação	69
3.4	Considerações finais.....	72
4	ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES DE PROPAGAÇÃO E DESENVOLVIMENTO DO INCÊNDIO	74
4.1	Análise dos resultados relativos à densidade ótica de fumo	75
4.2	Análise dos resultados relativos à temperatura	88
4.3	Considerações finais.....	98
5	ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES DE EVACUAÇÃO.....	100
5.1	Avaliação dos tempos de evacuação	100
5.1.1	Cenários EVAC.1.”x”.....	100
5.1.2	Cenários EVAC.2.”x”.....	103
5.1.3	Cenários EVAC.3.”x”.....	107
5.1.4	Cenários EVAC.4.”x”.....	111
5.1.5	Cenários EVAC.5.”x”.....	114
5.1.6	Cenários EVAC.6.”x”.....	118
5.1.7	Cenários EVAC.7.”x”.....	122
5.1.8	Cenários EVAC.8.”x”.....	126
5.1.9	Cenários EVAC.9.”x”.....	130
5.2	Influência do número de ocupantes na estação	135
5.3	Influência da utilização das escadas rolantes	136
5.4	Influência da escolha da saída.....	138
5.5	Influência da ocorrência de incêndio.....	139
5.6	Influência das caraterísticas dos ocupantes	142
5.7	Comparação de resultados com método de cálculo analítico da NFPA130.....	144
5.8	Considerações finais.....	147
6	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....	150
6.1	Propostas de melhoria	152
6.2	Desenvolvimento de trabalhos futuros	153
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	155

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Fatores que atrasaram a evacuação de alguns ocupantes do WTC	8
Figura 2.2 – Densidade de passageiros numa das escadas da estação estudada por Jiang, Deng, et al. (2009)	14
Figura 2.3 – Opções de vestuário numa evacuação no inverno.....	16
Figura 2.4 – Fluxo específico em função da densidade.....	17
Figura 2.5 – Zona de controlo de acessos com (A) pontos de controlo de bilhetes e com (B) barreiras de controlo	24
Figura 2.6 – Influência do coeficiente de extinção na (A) visibilidade / (B) e na velocidade de deslocamento dos ocupantes, para gases irritantes e não irritantes	27
Figura 2.7 – Representação esquemática dos conceitos de TNE e TSE.....	30
Figura 3.1 – Localização da Estação Baixa-Chiado	34
Figura 3.2 – Diagrama da rede do metropolitano de Lisboa e identificação da Estação Baixa-Chiado.....	35
Figura 3.3 – Representação esquemática do nível inferior da Estação Baixa-Chiado	36
Figura 3.4 – Representação esquemática do nível superior da Estação Baixa-Chiado	37
Figura 3.5 – Geometria da estação modelada no PyroSim - vista superior.....	41
Figura 3.6 – Geometria da estação modelada no PyroSim - vista em corte	41
Figura 3.7 – Taxa de libertação de calor para diferentes taxas de crescimento do incêndio (curva t ²).....	43
Figura 3.8 – Localização do incêndio utilizado na simulação.....	44
Figura 3.9 – Representação esquemática dos pontos de medição de temperatura e densidade ótica de fumo ao nível dos cais da estação (●)	46
Figura 3.10 – Representação esquemática dos pontos de medição de temperatura e densidade ótica de fumo no nível superior da estação (●).....	46
Figura 3.11 – Representação esquemática dos pontos de medição de temperatura e densidade ótica de fumo no acesso do nível superior da estação à Rua do Crucifixo.....	47
Figura 3.12 – Representação esquemática dos pontos de medição de temperatura e densidade ótica de fumo no acesso do nível superior da estação ao Largo do Chiado	47
Figura 3.13 – Excerto do modelo de simulação de evacuação definido:	49
Figura 3.14 – Exemplo da criação de um caminho através de pontos intermédios.....	54
Figura 3.15 – Exemplo dos caminhos e pontos intermédios criados no Pathfinder:.....	55
Figura 3.16 – Espaçamento médio longitudinal e lateral	58
Figura 3.17 – Exemplo de direcções possíveis no comportamento direcional inverso.....	59

Figura 3.18 – Exemplo de conflitos de movimento entre ocupantes:.....	62
Figura 3.19 – Geometria da estação modelada no Pathfinder - vista superior.....	65
Figura 4.1 – Taxa de libertação de calor ao longo do tempo – Cenários INC.1.”x” e INC.2.”x”	74
Figura 4.2 – Densidade ótica de fumo à cota de 2m do pavimento, ao nível dos cais da Linha Azul - Cenários INC.1.0 a INC.1.3	76
Figura 4.3 – Densidade ótica de fumo à cota de 2m do pavimento, ao nível dos cais da Linha Verde - Cenários INC.1.0 a INC.1.3	76
Figura 4.4 – Densidade ótica de fumo à cota de 2m do pavimento, no nível superior da Linha Azul - Cenários INC.1.0 a INC.1.3	78
Figura 4.5 – Densidade ótica de fumo à cota de 2m do pavimento, no nível superior da Linha Verde - Cenários INC.1.0 a INC.1.3	78
Figura 4.6 – Dispersão do fumo do incêndio no nível superior da estação – Cenários INC.1.”x”	80
Figura 4.7 – Densidade ótica de fumo à cota de 2m do pavimento, no acesso da Rua do Crucifixo - Cenários INC.1.0 a INC.1.3	81
Figura 4.8 – Densidade ótica de fumo à cota de 2m do pavimento, no acesso do Largo do Chiado- Cenários INC.1.0 a INC.1.3	82
Figura 4.9 – Densidade ótica de fumo à cota de 2m do pavimento, ao nível dos cais da Linha Azul - Cenários INC.2.0 a INC.2.3	83
Figura 4.10- Densidade ótica de fumo à cota de 2m do pavimento, ao nível dos cais da Linha Verde - Cenários INC.2.0 a INC.2.3	83
Figura 4.11 – Densidade ótica de fumo à cota de 2m do pavimento, no nível superior da Linha Azul - Cenários INC.2.0 a INC.2.3	84
Figura 4.12 – Densidade ótica de fumo à cota de 2m do pavimento, no nível superior da Linha Verde - Cenários INC.2.0 a INC.2.3	85
Figura 4.13 – Dispersão do fumo do incêndio no nível superior da estação – Cenários INC.2.”x”	86
Figura 4.14 – Densidade ótica de fumo à cota de 2m do pavimento, no acesso da Rua do Crucifixo - Cenários INC.2.0 a INC.2.3	87
Figura 4.15 – Densidade ótica de fumo à cota de 2m do pavimento, no acesso do Largo do Chiado - Cenários INC.2.0 a INC.2.3	88
Figura 4.16 – Temperatura à cota de 2m do pavimento, ao nível dos cais da Linha Azul - Cenários INC.1.0 a INC.1.3	89
Figura 4.17 – Temperatura à cota de 2m do pavimento, ao nível dos cais da Linha Verde - Cenários INC.1.0 a INC.1.3	89
Figura 4.18 – Temperatura à cota de 2m do pavimento, no nível superior da Linha Azul - Cenários INC.1.0 a INC.1.3	91

Figura 4.19 – Temperatura à cota de 2m do pavimento, no nível superior da Linha Verde - Cenários INC.1.0 a INC.1.3	91
Figura 4.20 – Temperatura à cota de 2m do pavimento, no acesso da Rua do Crucifixo - Cenários INC.1.0 a INC.1.3	93
Figura 4.21 – Temperatura à cota de 2m do pavimento, no acesso do Largo do Chiado - Cenários INC.1.0 a INC.1.3	93
Figura 4.22 – Temperatura à cota de 2m do pavimento, ao nível dos cais da Linha Azul - Cenários INC.2.0 a INC.2.3	94
Figura 4.23 – Temperatura à cota de 2m do pavimento, ao nível dos cais da Linha Verde - Cenários INC.2.0 a INC.2.3	95
Figura 4.24 – Temperatura à cota de 2m do pavimento, no nível superior da Linha Azul - Cenários INC.2.0 a INC.2.3	96
Figura 4.25 – Temperatura à cota de 2m do pavimento, no nível superior da Linha Verde - Cenários INC.2.0 a INC.2.3	96
Figura 4.26 – Temperatura à cota de 2m do pavimento, no acesso da Rua do Crucifixo - Cenários INC.2.0 a INC.2.3	97
Figura 4.27 – Temperatura à cota de 2m do pavimento, no acesso do Largo do Chiado - Cenários INC.2.0 a INC.2.3	98
Figura 5.1 – Número de pessoas no interior da estação - Cenários EVAC.1.0 a EVAC.1.4	101
Figura 5.2 – Nível de serviço / congestionamento no nível superior da estação e acessos – Cenário EVAC.1.0.....	101
Figura 5.3 – Fluxo de pessoas para cada uma das saídas da estação - Cenários EVAC.1.0 e EVAC.1.2	102
Figura 5.4 – Número de pessoas no interior da estação - Cenários EVAC.2.0 a EVAC.2.4	104
Figura 5.5 – Nível de serviço / congestionamento no nível superior da estação e acessos – Cenário EVAC.2.0.....	105
Figura 5.6 – Fluxo de pessoas para cada uma das saídas da estação - Cenários EVAC.2.0 e EVAC.2.2	105
Figura 5.7 – Número de pessoas no interior da estação - Cenários EVAC.3.0 a EVAC.3.4	108
Figura 5.8 – Nível de serviço / congestionamento no nível superior da estação e acessos – Cenário EVAC.3.0.....	108
Figura 5.9 – Fluxo de pessoas em cada uma das saídas da estação - Cenários EVAC.3.0 e EVAC.3.2	109
Figura 5.10 – Número de pessoas no interior da estação - Cenários EVAC.4.0 a EVAC.4.4 . ..	111

Figura 5.11 – Nível de serviço / congestionamento no nível superior da estação e acessos – Cenário EVAC.4.0	112
Figura 5.12 – Fluxo de pessoas em cada uma das saídas da estação - Cenários EVAC.4.0 e EVAC.4.2.....	113
Figura 5.13 – Número de pessoas no interior da estação - Cenários EVAC.5.0 a EVAC.5.4.	115
Figura 5.14 – Nível de serviço / congestionamento no nível superior da estação e acessos – Cenário EVAC.5.0	116
Figura 5.15 – Fluxo de pessoas em cada uma das saídas da estação - Cenários EVAC.5.0 e EVAC.5.2.....	116
Figura 5.16 – Número de pessoas no interior da estação - Cenários EVAC.6.0 a EVAC.6.4.	119
Figura 5.17 – Nível de serviço / congestionamento no nível superior da estação e acessos – Cenário EVAC.6.0	120
Figura 5.18 – Fluxo de pessoas em cada uma das saídas da estação - Cenários EVAC.6.0 e EVAC.6.2.....	120
Figura 5.19 – Número de pessoas no interior da estação - Cenários EVAC.7.0 a EVAC.7.4.	123
Figura 5.20 – Nível de serviço / congestionamento no nível superior da estação e acessos – Cenário EVAC.7.0	124
Figura 5.21 – Fluxo de pessoas em cada uma das saídas da estação - Cenários EVAC.7.0 e EVAC.7.2.....	124
Figura 5.22 – Número de pessoas no interior da estação - Cenários EVAC.8.0 a EVAC.8.4.	127
Figura 5.23 – Nível de serviço / congestionamento no nível superior da estação e acessos – Cenário EVAC.8.0	128
Figura 5.24 – Fluxo de pessoas em cada uma das saídas da estação - Cenários EVAC.8.0 e EVAC.8.2.....	128
Figura 5.25 – Número de pessoas no interior da estação - Cenários EVAC.9.0 a EVAC.9.4.	131
Figura 5.26 – Nível de serviço / congestionamento no nível superior da estação e acessos – Cenário EVAC.9.0	132
Figura 5.27 – Fluxo de pessoas em cada uma das saídas da estação - Cenários EVAC.9.0 e EVAC.9.2.....	133
Figura 6.1 – Exemplo de luminárias de emergência do tipo sinalética dinâmica/adaptativa com função “increased affordance”	152

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 – Velocidade de deslocamento em vias horizontais	9
Quadro 2.2 – Velocidade de deslocamento em vias horizontais em função do género e grupo etário	9
Quadro 2.3 – Velocidade de deslocamento em vias horizontais em função da limitação na mobilidade	10
Quadro 2.4 - Velocidade de deslocamento ascendente em vias verticais em função da limitação na mobilidade	10
Quadro 2.5 - Velocidade de deslocamento descendente em vias verticais em função da limitação na mobilidade	11
Quadro 2.6 – Velocidade de deslocamento ascendente em rampas em função da limitação na mobilidade	11
Quadro 2.7 – Velocidade de deslocamento descendente em rampas em função da limitação na mobilidade	12
Quadro 2.8 – Velocidade máxima de deslocamento ascendente em escadas.....	12
Quadro 2.9 – Velocidades de deslocamento descendente e ascendente em vias verticais em função do género e grupo etário	13
Quadro 2.10 – Tempo necessário para que se inicie a evacuação, em função do procedimento relativo ao vestuário	16
Quadro 2.11 – Tempo de pré-movimento, em minutos, de acordo com a BS DD240:1997/20	
Quadro 2.12 – Tempo de pré-movimento para iniciar a evacuação, de acordo com a PD 7974-6:2004.....	21
Quadro 2.13 – Condições limite para exposição ao calor	25
Quadro 2.14 – Critérios de densidade ótica de fumo e de visibilidade para uma evacuação segura	27
Quadro 2.15 – Concentração de gases tóxicos para afetar a evacuação, incapacitar ou ser letal	28
Quadro 2.16 – Percentagem da população incapacitada em função do valor de FED	29
Quadro 2.17 – Critérios para determinação do tempo de evacuação de acordo a NFPA130... ..	31
Quadro 2.18 – Comparação das principais características dos programas de simulação computacional de evacuação Building-Exodus, FDS+EVAC e Pathfinder.....	32
Quadro 3.1 – Reprodução do Quadro VII, do Anexo III, do RJ-SCIE (2008).....	38

Quadro 3.2 – Sistematização do cálculo do efetivo de acordo com a regulamentação em vigor	39
Quadro 3.3 – Valores de taxa de libertação de calor máxima adotados em algumas linhas de metro	42
Quadro 3.4 – Valores de “soot yield” identificados em estudos anterior	44
Quadro 3.5 – Caraterização dos cenários considerados na simulação de incêndio	48
Quadro 3.6 – Fator de ponderação dos comportamentos direcionais em função do estado dos ocupantes.....	60
Quadro 3.7 – Volume de ar inspirado em função do tipo de atividade desenvolvida	64
Quadro 3.8 – Número de habitantes da Área Metropolitana de Lisboa, por género e grupo etário	67
Quadro 3.9 – Caraterísticas da população considerada.....	67
Quadro 3.10 – Caraterização dos pressupostos de ocupação considerados em cada conjunto de cenários definidos para a simulação de evacuação da estação.....	69
Quadro 3.11 – Caraterização do número de pessoas presentes na estação em cada conjunto de cenários definidos para a simulação de evacuação da estação.....	70
Quadro 3.12 – Caraterização dos sub-cenários considerados em cada conjunto de cenários definidos para a simulação de evacuação da estação	70
Quadro 4.1 – Sistematização dos critérios de sustentabilidade da evacuação	75
Quadro 5.1 – Resumo dos resultados da simulação de evacuação – Cenários EVAC.1.0 a EVAC.1.4.....	100
Quadro 5.2 – Valor de FED, à cota de 2m do pavimento do nível superior no final do Tempo de Evacuação – Cenários EVAC.1.3 e EVAC.1.4.....	103
Quadro 5.3 – Tempos de movimento por género e grupo etário para o cenário EVAC.1.0....	103
Quadro 5.4 – Resumo dos resultados da simulação de evacuação – Cenários EVAC.2.0 a EVAC.2.4.....	104
Quadro 5.5 – Valor de FED, à cota de 2m do pavimento do nível superior no final do Tempo de Evacuação – Cenários EVAC.2.3 e EVAC.2.4.....	106
Quadro 5.6 – Tempos de movimento por género e grupo etário para o cenário EVAC.2.0....	107
Quadro 5.7 – Resumo dos resultados da simulação de evacuação – Cenários EVAC.3.0 a EVAC.3.4.....	107
Quadro 5.8 – Valor de FED, à cota de 2m do pavimento do nível superior no final do Tempo de Evacuação – Cenários EVAC.3.3 e EVAC.3.4.....	110
Quadro 5.9 – Tempos de movimento por género e grupo etário para o cenário EVAC.3.0....	110
Quadro 5.10 – Resumo dos resultados da simulação de evacuação – Cenários EVAC.4.0 a EVAC.4.4.....	111

Quadro 5.11 – Valor de FED, à cota de 2m do pavimento do nível superior no final do Tempo de Evacuação – Cenários EVAC.4.3 e EVAC.4.4	113
Quadro 5.12 – Tempos de movimento por género e grupo etário para o cenário EVAC.4.0	114
Quadro 5.13 – Resumo dos resultados da simulação de evacuação – Cenários EVAC.5.0 a EVAC.5.4	115
Quadro 5.14 – Valor de FED, à cota de 2m do pavimento do nível superior no final do Tempo de Evacuação – Cenários EVAC.5.3 e EVAC.5.4	117
Quadro 5.15 – Tempos de movimento por género e grupo etário para o cenário EVAC.5.0	118
Quadro 5.16 – Resumo dos resultados da simulação de evacuação – Cenários EVAC.6.0 a EVAC.6.4	119
Quadro 5.17 – Valor de FED, à cota de 2m do pavimento do nível superior no final do Tempo de Evacuação – Cenários EVAC.6.3 e EVAC.6.4	121
Quadro 5.18 – Tempos de movimento por género e grupo etário para o cenário EVAC.6.0	122
Quadro 5.19 – Resumo dos resultados da simulação de evacuação – Cenários EVAC.7.0 a EVAC.7.4	123
Quadro 5.20 – Valor de FED, à cota de 2m do pavimento do nível superior no final do Tempo de Evacuação – Cenários EVAC.7.3 e EVAC.7.4	125
Quadro 5.21 – Tempos de movimento por género e grupo etário para o cenário EVAC.7.0	126
Quadro 5.22 – Resumo dos resultados da simulação de evacuação – Cenários EVAC.8.0 a EVAC.8.4	127
Quadro 5.23 – Valor de FED, à cota de 2m do pavimento do nível superior no final do Tempo de Evacuação – Cenários EVAC.8.3 e EVAC.8.4	129
Quadro 5.24 – Tempos de movimento por género e grupo etário para o cenário EVAC.8.0	130
Quadro 5.25 – Resumo dos resultados da simulação de evacuação – Cenários EVAC.9.0 a EVAC.9.4	131
Quadro 5.26 – Valor de FED, à cota de 2m do pavimento do nível superior no final do Tempo de Evacuação – Cenários EVAC.9.3 e EVAC.9.4	134
Quadro 5.27 – Tempos de movimento por género e grupo etário para o cenário EVAC.9.0	134
Quadro 5.28 – Resumo dos tempos de evacuação – Cenários EVAC.”y”.0.....	135
Quadro 5.29 – Resumo dos resultados da simulação de evacuação – Cenários EVAC.”y”.1	137
Quadro 5.30 – Resumo dos tempos de evacuação – Cenários EVAC.”y”.2.....	138

Quadro 5.31 – Resumo dos resultados da simulação de evacuação – Cenários EVAC.”y”.3.	140
Quadro 5.32 – Resumo dos resultados da simulação de evacuação – Cenários EVAC.”y”.4.	142
Quadro 5.33 – Resumo dos tempos de movimento por género e grupo etário para os cenários EVAC.”y”.0	143
Quadro 5.34 – Cálculo do tempo de evacuação segundo a NFPA130 – Fluxos de pessoas....	145
Quadro 5.35 – Cálculo do tempo de evacuação segundo a NFPA130 – Tempos de movimento	145
Quadro 5.36 – Cálculo do tempo de evacuação segundo a NFPA130 – Tempos de evacuação	146
Quadro 5.37 – Resumo de resultados da simulação do cenário EVAC.9.0 e do cálculo analítico.....	147

ABREVIATURAS

ANEPC – Autoridade Nacional de Emergência e Proteção Civil

ASET – Available Safe Escape Time

FDS – Fire Dynamics Simulator

FED – Dose efetiva fracionária (em inglês, Fractional Effective Dose)

IMC – Índice de Massa Corporal

IMO – International Maritime Organization

NFPA - National Fire Protection Association

NIST – National Institute of Standards and Technology

RJ-SCIE – Regime Jurídico de Segurança Contra Incêndio em Edifícios

RSET – Required Safe Escape Time

RT-SCIE – Regulamento Técnico de Segurança Contra Incêndio em Edifícios

SADI – Sistema Automático de Detecção de Incêndio

SCIE – Segurança Contra Incêndio em Edifícios

SFPE – Society of Fire Protection Engineers

TNE – Tempo Necessário para a Evacuação

TSE – Tempo de Sustentabilidade da Evacuação

UT – Utilização-tipo

WTC – World Trade Center

(Esta página foi propositadamente deixada em branco)

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações iniciais

A evacuação de um edifício pode ser necessária em diversas situações de emergência, nomeadamente durante um incêndio, um sismo, um fenómeno meteorológico extremo ou até mesmo como consequência de uma ameaça ou ataque terrorista (podendo inclusivamente ser esta a causa do incêndio). Por este motivo, os edifícios e recintos devem ser dotados de condições de segurança que permitam aos seus ocupantes, em caso de emergência, alcançar um local seguro no exterior, pelos seus próprios meios, de modo fácil, rápido e seguro. Estas condições de segurança dizem respeito às saídas de emergência dos locais, nomeadamente à sua largura, número, localização e existência de sinalização adequada, mas também, quando necessário, à existência de vias de evacuação protegidas contra o incêndio, fumo e produtos da combustão. Estas condições de segurança estão diretamente associadas ao número de pessoas presentes no edifício, bem como a sua dimensão e altura (ou profundidade).

A regulamentação em vigor para a Segurança Contra Incêndio em Edifícios (SCIE) (*RJ-SCIE*, 2008; *RT-SCIE*, 2008) orienta-se por três princípios gerais, designadamente a preservação da vida humana, do ambiente e do património cultural, e tem como principais objetivos:

1. Reduzir a probabilidade de ocorrência de incêndios;
2. Limitar o desenvolvimento de eventuais incêndios, circunscrevendo e minimizando os seus efeitos, nomeadamente a propagação do fumo e gases de combustão;
3. Facilitar a evacuação e o salvamento dos ocupantes em risco;
4. Permitir a intervenção eficaz e segura dos meios de socorro.

Sendo o propósito primordial da SCIE, a salvaguarda da vida humana, verifica-se que a existência de condições para uma evacuação segura é um tema crucial em qualquer edifício, ou recinto, pelo que importa analisar em pormenor os diversos fatores que influenciam a mesma.

Por motivos inerentes ao tipo de edifício, as gares de transporte são por excelência locais com grande aglomeração de pessoas, pelo que a existência de condições para uma evacuação segura é essencial. No caso das gares subterrâneas de transporte este tema é ainda mais crítico, uma vez que se localizam abaixo do solo. A evacuação tem que ser forçosamente feita no sentido ascendente (por vezes, com uma diferença de cota significativa). Em situação de incêndio estas

condições agravam-se uma vez que nas vias verticais poderá ocorrer um fenómeno de “chaminé”, com saída de fumo pelo mesmo local por onde será feita a evacuação.

1.2 Motivação

Os sistemas de transporte subterrâneo, designadamente os sistemas de metropolitano, constituem um símbolo de modernidade, mas também uma necessidade para os cidadãos de áreas urbanas densamente povoadas. No entanto, a segurança nos sistemas de metropolitano constitui uma preocupação, tendo já sido documentados diversos incidentes em todo o mundo. Relativamente às gares de transporte de passageiros existem designações diferentes, sendo o termo “gare” geralmente utilizado para o transporte ferroviário pesado, e “estação” para o sistema de metropolitano.

Um dos mais marcantes incêndios em estações de metropolitano ocorreu na Estação de King's Cross St. Pancras, no dia 18 de novembro de 1987, tendo tirado a vida a 31 pessoas (Fennel, 1988). Esta era na altura a estação mais movimentada de toda a rede de metropolitano de Londres, no Reino Unido. As investigações determinaram que o incêndio teve origem numa escada rolante (que na altura ainda eram de madeira), supondo-se que um passageiro tenha acendido um fósforo, tendo-o deixado cair para o interior das escadas rolantes, que estariam cheias de detritos, potenciando o alastrar do incêndio (Fennel, 1988). Três anos antes, em 1984, um outro incêndio na Estação de Oxford Circus teve também origem num fumador descuidado, tendo este incidente levado à proibição de fumar na rede de metro de Londres, que até então era permitido (LRT, 1984).

O mais mortífero incidente ocorreu na rede de metropolitano de Baku, no Azerbaijão, a 28 de outubro de 1995, num túnel entre duas estações (Rohlén & Wahlström, 1996). O incêndio começou numa falha elétrica, na quarta carruagem do metro, tendo sido detetado quando este saía da Estação de Uldus, e o metro vindo a imobilizar-se duzentos metros mais à frente, no interior do túnel, ficando a cerca de dois quilómetros da estação seguinte, a Estação de Narimanov. Na altura estariam cerca de 1300 a 1500 pessoas no interior da composição. O incêndio danificou o sistema de abertura das portas pneumáticas, tendo estas permanecido fechadas. Apenas duas portas na terceira carruagem e as portas do maquinista (em ambas as extremidades do metro) estavam abertas. Alguns passageiros conseguiram partir janelas e um dos maquinistas terá conseguido abrir as portas interiores que ligavam as várias carruagens, viabilizando a circulação de passageiros entre as mesmas. No início a evacuação foi possível no sentido da Estação de Uldus (que estava a cerca de duzentos metros), mas com o avançar do incêndio tal tornou-se impossível, passando os passageiros a ter de fazer a evacuação pelo túnel, em direção à Estação de Narimanov. Os meios de socorro terão chegado rapidamente ao local, mas devido à falta de equipamento respiratório, não foi possível montarem uma operação de

grande escala. Por estes motivos a evacuação foi bastante demorada, tendo este trágico incidente resultado em 289 mortos e 265 feridos graves (Rohlén & Wahlström, 1996).

Esta ocorrência teve algumas similaridades com o incêndio ocorrido na Estação de Rinkeby, em Estocolmo, na Suécia, em maio de 2005. Onde, tal como no incêndio de Baku, se pensa que o incêndio tenha tido origem num arco elétrico criado por uma descarga elétrica. No entanto, o desfecho foi bastante diferente, não foram registados mortos no acidente, e apenas 12 pessoas sofreram ferimentos menores (Statens Haverikommission, 2009). Constatou-se que os materiais do mobiliário das carruagens eram bastante distintos, não tendo o desenvolvimento do incêndio sido significativamente influenciado pelos mesmos. Apesar de também ter ocorrido uma falha no sistema pneumático de abertura de portas de Rinkeby, este permitiu a abertura manual das mesmas. Outro fator importante foi o metro ter parado na plataforma da estação e não dentro do túnel, tendo a evacuação decorrido de forma relativamente calma. Verificou-se também que os bombeiros de Estocolmo estavam melhor equipados, quer em termos humanos, quer em termos técnicos (Fridolf, 2010; Statens Haverikommission, 2009).

Em outubro de 2003 um incêndio, com origem criminoso, despoletou numa composição do metro que chegava à Estação de Jungangno, em Daegu, na Coreia do Sul (Hong, 2004). O incendiário utilizou dois pacotes de leite cheios de um líquido inflamável para incendiar a carruagem onde seguia e, em pouco tempo, todo o metro estava em chamas. Já com o incêndio a decorrer, um segundo comboio entrou na estação, tendo pouco tempo depois sido atuado um detetor de incêndio, que despoletou um corte de energia, impedindo a segunda composição de sair da estação, e tendo este também sido atingido pelo incêndio. A falta de eletricidade impediu as portas das carruagens de serem abertas, tendo esta sido uma das principais dificuldades na evacuação. No incidente 192 pessoas perderam a vida e outras 148 pessoas ficaram feridas (Hong, 2004).

Estes incidentes passados mostram que a ocorrência de um incêndio em sistemas de transporte subterrâneo, como túneis e estações, pode causar muitas mortes, tendo ficado demonstrado o potencial da gravidade que um incidente deste tipo pode ter. As principais características destes locais que podem potenciar a gravidade deste tipo de ocorrência são:

1. São espaços onde pode ocorrer uma grande aglomeração de pessoas, principalmente durante a hora de ponta ou durante eventos específicos;
2. O número de caminhos de evacuação disponíveis é limitado;
3. A distância vertical entre a base da estação e o exterior pode ser muito extensa, podendo levar a situações de fadiga de alguns dos ocupantes durante a evacuação;
4. Numa situação de incêndio, a direção de propagação do fumo e a direção da evacuação irão sobrepor-se, dificultando assim a evacuação de pessoas e levando a que o ambiente se possa tornar insustentável;

5. A difusão do alarme pode ser difícil de ser assimilada pelos ocupantes;
6. As condições para acesso e operação dos meios de socorro são limitadas.

Os simulacros, para além de serem uma obrigatoriedade regulamentar (*RT-SCIE*, 2008), têm uma grande importância, uma vez que permitem o treino dos ocupantes, com vista à criação de rotinas de comportamento e aperfeiçoamento de procedimentos, bem como a verificação e teste da implementação das medidas de autoproteção. No entanto, num contexto de um estudo da evacuação, como este que se propõe, apresentam algumas dificuldades:

- Reunir milhares de pessoas dentro de uma estação para a realização de um simulacro, ou de um exercício de evacuação, pode ser difícil e demorado;
- O comportamento humano pode ser imprevisível, existindo pessoas que, num mesmo cenário, se comportam de maneira diferente, em momentos diferentes. Isto é, o exercício pode ter de ser repetido várias vezes;
- Por estes motivos é difícil de estudar a evacuação em múltiplos cenários.

Desta forma o uso de ferramentas de simulação computacional revela-se de grande eficácia, permitindo o estudo da evacuação em diversos cenários. Jiang, Ling, et al. (2009) realçam, no entanto, a importância da definição cuidada dos dados e parâmetros a utilizar na simulação, bem como a validação dos resultados com dados obtidos em situações reais.

Na presente tese pretende-se estudar a evacuação de gares subterrâneas de transporte em caso de incêndio aplicada à realidade portuguesa, tendo sido selecionada como caso de estudo, a Estação de Metro Baixa-Chiado, em Lisboa.

1.3 Objetivos

Este trabalho tem como principal objetivo analisar a problemática associada à evacuação de gares subterrâneas de transporte em situação de emergência, em particular de incêndio, contribuindo para a melhoria do processo e em última instância melhorar a salvaguarda da vida humana.

Formulou-se a hipótese que a evacuação da Estação de Metro Baixa-Chiado pode ser afetada por vários fatores, divididos em dois grandes grupos: características da estação e características dos seus ocupantes.

Para responder a esta questão, subdividiram-se os objetivos da seguinte forma:

- Efetuar uma análise comparativa de situações de incêndio na estação em estudo, considerando cenários sem existência de desenfumagem, e cenários com a sua ativação a ser feita em diferentes momentos

- Analisar a influência do incêndio, em particular do fumo, no processo de evacuação, e identificar o período ideal para a ativação do sistema de controlo de fumo;
- Efetuar uma análise comparativa do tempo de evacuação da estação, em múltiplos cenários, variando o número de ocupantes e a sua localização na estação e incluindo situações de incêndio, através da utilização de um modelo de simulação de evacuação baseado em agentes;
- Propor medidas de melhoria das condições de evacuação da estação.

1.4 Estrutura da tese

A presente tese está organizada em 6 capítulos, estruturados da seguinte forma:

O capítulo 1 corresponde à introdução, e é onde são feitas as considerações iniciais sobre o tema proposto, é apresentada a motivação que dá origem ao estudo que se pretende desenvolver, e são definidos os objetivos a alcançar.

No capítulo 2, é feita uma revisão bibliográfica relativa ao estudo da evacuação em caso de incêndio, elencando os diversos fatores que influenciam a evacuação de pessoas em caso de emergência, em particular, em gares de transporte subterrâneas.

O capítulo 3 diz respeito à modelação da evacuação de uma estação de metro, sendo feita uma descrição do objeto de estudo e sendo identificados e caracterizados os programas de simulação computacional de incêndio e de evacuação a utilizar. São ainda descritos os respetivos modelos de simulação criados e são enumerados os cenários de simulação de incêndio e de evacuação desenvolvidos.

No capítulo 4 é feita uma análise e discussão dos resultados das simulações de propagação e desenvolvimento de incêndio realizadas.

No capítulo 5 é feita uma análise e discussão dos resultados das simulações de evacuação desenvolvidas.

Por fim, no capítulo 6 são apresentadas as principais conclusões relativas ao trabalho desenvolvido, são apresentadas propostas de melhoria e perspectivas de trabalhos futuros.

(Esta página foi propositadamente deixada em branco)

2 EVACUAÇÃO EM CASO DE INCÊNDIO

2.1 O estudo da evacuação

A evacuação de um edifício pode ser influenciada por diversos fatores que se dividem em dois grandes grupos: o edifício *per si* e a população que o ocupa. Alguns dos parâmetros construtivos do edifício que podem condicionar a evacuação são: a largura das vias e das saídas, a existência de escadas, as distâncias a percorrer, etc. Já os seus ocupantes podem influenciar, tanto devido às suas características individuais que afetam a velocidade de movimento, ou ao nível de grupo, pelo número e densidade de pessoas presentes no local. Numa situação de incêndio há ainda que ter em conta fatores ambientais, como a existência de fumo e chamas.

Para além dos fatores referidos há que ter ainda em conta o comportamento humano em situações de emergência. Segundo Canter (1980), esta área de estudo tem potencial para ter um impacto radical na prevenção e segurança ao incêndio.

Os primeiros trabalhos desenvolvidos [ver Bryan (2002) para pormenores], tendo em conta o comportamento humano, envolveram contagens da velocidade de movimento de peões, em pontos de congestionamento da cidade de Nova Iorque, nos Estados Unidos da América, e foram aplicados no desenvolvimento do projeto do Edifício do Terminal Hudson, em 1909 (*Design and Construction of Building Exits*, 1935).

O primeiro trabalho científico nesta área foi na realidade desenvolvido pelo próprio Bryan (1957), tendo este estudado os relatos de pânico dos sobreviventes de um incêndio, ocorrido a 29 de janeiro de 1956, no salão de eventos do parque Arundel, em Brooklyn, no estado do Maryland, nos Estados Unidos da América. No edifício decorria um evento e no seu interior estavam cerca de 1200 pessoas. A maior saída para o exterior estava dimensionada para permitir a evacuação de 250 pessoas por minuto, mas, de forma a evitar que os clientes que não tinham pago a entrada acessem ao recinto, a porta foi trancada pelo interior, não existindo no local qualquer mecanismo para a desbloquear. Como consequência deste incêndio morreram onze pessoas e centenas ficaram feridas (Joseph, 2008).

O ataque terrorista de 11 de setembro de 2001, ao *World Trade Center* (WTC), marcou o mundo em diversos aspetos e, também em termos de evacuação foi um evento impactante. A investigação no tema voltou a ganhar importância, nomeadamente com a criação do grupo de pesquisa dedicado à evacuação no NIST (*National Institute of Standards and Technology* - EUA).

Segundo Gershon et al. (2011), a evacuação do *World Trade Center* (WTC) constitui uma das maiores evacuações da história dos Estados Unidos da América, tendo sido evacuados cerca de 87% dos ocupantes das duas torres, em menos de duas horas. Os autores referem, no entanto, que os tempos de evacuação variaram bastante, tendo o seu estudo sido desenvolvido com o objetivo de identificar os fatores que atrasaram a evacuação de alguns ocupantes. Os resultados são resumidos na Figura 2.1.



Figura 2.1 – Fatores que atrasaram a evacuação de alguns ocupantes do *World Trade Center*
[adaptado de (Gershon et al., 2011)]

2.1.1 Influência dos parâmetros relacionados com os ocupantes

A velocidade de deslocamento é um parâmetro importante na modelação da evacuação e é influenciada por diversos fatores como, por exemplo, a idade, o género, a obesidade, a existência de condicionalismos na mobilidade ou até mesmo o vestuário.

Alguns dos estudos de referência no tema foram desenvolvidos há mais de 50 anos (*e.g.* Fruin, 1971; Hankin & Wright, 1958; Predtechenskii, V.M.; Milinskii, 1969; Togawa, 1955), podendo os seus resultados não corresponder à realidade das sociedades atuais (Thompson et al., 2015), tendencialmente mais envelhecidas e também mais obesas, ou não terem em conta a população com mobilidade reduzida. As velocidades de deslocamento em vias horizontais sugeridas por Fruin e Strakosch (1987) são as indicadas no Quadro 2.1.

Quadro 2.1 – Velocidade de deslocamento em vias horizontais [(Fruin & Strakosch, 1987)]

Velocidade mínima [m/s]	Velocidade máxima [m/s]	Velocidade média [m/s]	Desvio padrão [m/s]
0,6	1,8	1,2	0,2

Por outro lado, a *International Maritime Organization* – IMO (2016) sugere valores para a velocidade de deslocamento horizontal diferenciados, tendo em conta o género, a idade, e também a existência de condicionalismos na mobilidade. Estes valores são os indicados no Quadro 2.2. Em termos médios, e para uma população heterogénea, aparentam ser coerentes com os valores mínimos e máximos indicados por Fruin e Strakosch (1987).

Quadro 2.2 – Velocidade de deslocamento em vias horizontais em função do género e grupo etário [(IMO, 2016)]

Grupo etário	Género	Velocidade mínima [m/s]	Velocidade máxima [m/s]
< 30 anos	Masculino	1,11	1,85
	Feminino	0,93	1,55
> 30 anos	Masculino	0,97	1,62
	Feminino	0,71	1,19
> 50 anos	Masculino	0,84	1,4
	Feminino	0,56	0,94
> 50 anos, com mobilidade reduzida	Masculino	0,55-0,64	0,91-1,06
	Feminino	0,37-0,43	0,61-0,71

A velocidade de deslocamento é uma variável multifatorial, a cada novo estudo são adicionados novos parâmetros que condicionam a definição de uma velocidade de deslocamento padrão, estando esta muito dependente da população a que diz respeito e da arquitetura do local.

Boyce et al. (1999) analisaram a velocidade de deslocamento em vias horizontais, verticais e em rampas de acordo com o nível de condicionalismos na mobilidade dos ocupantes, tendo obtido os resultados apresentados nos Quadros 2.3 a 2.7. Os resultados do Quadro 2.3 mostram que a velocidade de deslocamento horizontal reduz significativamente à medida que a limitação na mobilidade aumenta. Estes resultados aparentam ser coerentes

com os apresentados no Quadro 2.2, nomeadamente os apresentados no grupo etário com idade superior a 50 anos, e com mobilidade reduzida.

Quadro 2.3 – Velocidade de deslocamento em vias horizontais em função da limitação na mobilidade [adaptado de (Boyce et al., 1999)]

Grupo de pessoas	Velocidade média [m/s]	Desvio padrão [m/s]	Faixa de velocidade [m/s]	Faixa interquartil [m/s]
Média de grupo (n=107)	1	0,42	0,10-1,77	0,71-1,28
Com dificuldade de deslocamento, sem assistência (n=101)	0,8	0,37	0,10-1,68	0,57-1,02
Sem ajuda (n=52)	0,95	0,32	0,24-1,68	0,70-1,02
De moletas (n=6)	0,94	0,30	0,63-1,35	0,67-1,24
De bengala (n=33)	0,81	0,38	0,26-1,60	0,49-1,08
De andarilho (n=10)	0,57	0,29	0,10-1,02	0,34-0,83
Com dificuldade de deslocamento, com assistência (n=18)	0,78	0,34	0,21-1,40	0,58-0,92
Sem dificuldade de deslocamento, sem assistência (n=6)	1,25	0,32	0,82-1,77	1,05-1,34
Em cadeira de rodas elétrica (n=2)	0,89	-	0,85-0,93	-
Em cadeira de rodas manual, sem assistência (n=12)	0,69	0,35	0,13-1,35	0,38-0,94
Em cadeira de rodas manual, com assistência (n=16)	1,30	0,34	0,83-1,98	1,02-1,59

Quadro 2.4 - Velocidade de deslocamento ascendente em vias verticais em função da limitação na mobilidade [adaptado de (Boyce et al., 1999)]

Grupo de pessoas	Velocidade média [m/s]	Desvio padrão [m/s]	Faixa de velocidade [m/s]	Faixa interquartil [m/s]
Com dificuldade de deslocamento, sem assistência (n=30)	0,38	0,14	0,13-0,62	0,26-0,52
Sem ajuda (n=19)	0,43	0,13	0,14-0,62	0,35-0,55
De moletas (n=1)	0,22	-	0,13-0,31	0,26-0,45
De bengala (n=9)	0,35	0,11	0,18-0,49	-
De andarilho (n=1)	0,14	-	-	-
Sem dificuldade de deslocamento, sem assistência (n=8)	0,70	0,24	0,55-0,82	0,55-0,78
Sem dificuldade de deslocamento, com assistência – média de grupo (n=4)	0,29	-	0,17-0,37	-
Cegos (n=3)	0,26	-	0,17-0,36	-
Outros (n=1)	0,37	-	-	-

Nos quadros 2.4 e 2.5 é possível verificar que a velocidade de deslocamento em vias verticais é consideravelmente inferior à velocidade de deslocamento em vias horizontais apresentada anteriormente. Esta redução é na ordem dos 50-60%, o que demonstra a

dificuldade acrescida que ocorrerá na evacuação de um edifício, quando a mesma tem de ser feita por escada, e principalmente quando os ocupantes estão limitados na mobilidade.

Quadro 2.5 - Velocidade de deslocamento descendente em vias verticais em função da limitação na mobilidade [adaptado de (Boyce et al., 1999)]

Grupo de pessoas	Velocidade média [m/s]	Desvio padrão [m/s]	Faixa de velocidade [m/s]	Faixa interquartil [m/s]
Com dificuldade de deslocamento, sem assistência (n=30)	0,33	0,16	0,11-0,70	0,22-0,45
Sem ajuda (n=19)	0,36	0,14	0,13-0,70	0,20-0,47
De moletas (n=1)	0,22	-	-	-
De bengala (n=9)	0,32	0,12	0,11-0,49	0,24-0,46
De andarilho (n=1)	0,16	-	-	-
Sem dificuldade de deslocamento, sem assistência (n=8)	0,70	0,26	0,45-1,10	0,53-0,90
Sem dificuldade de deslocamento, com assistência – média de grupo (n=4)	0,13	-	0,11-0,23	-
Cegos (n=3)	0,19	-	0,11-0,23	-
Outros (n=1)	0,09	-	0,05-0,11	-

No caso da evacuação ser feita por rampas, é também possível observar nos quadros 2.6 e 2.7 uma redução relevante na velocidade de deslocamento, ainda que menor do que a verificada para as vias verticais. É possível intuir que qualquer desnível existente numa via de evacuação, mesmo que em rampa, influenciará a velocidade de deslocamento dos ocupantes, nomeadamente quando estes têm condicionalismos na mobilidade.

Quadro 2.6 – Velocidade de deslocamento ascendente em rampas em função da limitação na mobilidade [adaptado de (Boyce et al., 1999)]

Grupo de pessoas	Velocidade média [m/s]	Desvio padrão [m/s]	Faixa de velocidade [m/s]	Faixa interquartil [m/s]
Média de grupo (n=54)	0,62	0,28	0,21-0,32	0,42-0,74
Com dificuldade de deslocamento, sem assistência (n=48)	0,59	0,26	0,21-1,08	0,42-0,72
Sem ajuda (n=19)	0,68	0,24	0,30-1,08	0,48-0,87
De moletas (n=4)	0,46	-	0,21-1,05	-
De bengala (n=20)	0,52	0,24	0,21-1,05	0,38-0,70
De andarilho (n=5)	0,35	-	0,30-0,42	-
Sem dificuldade de deslocamento, sem assistência (n=6)	1,01	-	0,70-1,32	-

Quadro 2.7 – Velocidade de deslocamento descendente em rampas em função da limitação na mobilidade [adaptado de (Boyce et al., 1999)]

Grupo de pessoas	Velocidade média [m/s]	Desvio padrão [m/s]	Faixa de velocidade [m/s]	Faixa interquartil [m/s]
Média de grupo (n=54)	0,60	0,30	0,10-1,83	0,42-0,70
Com dificuldade de deslocamento, sem assistência (n=48)	0,58	0,25	0,10-1,22	0,42-0,70
Sem ajuda (n=19)	0,68	0,24	0,28-1,22	0,45-0,94
De moletas (n=4)	0,47	-	0,42-0,53	-
De bengala (n=20)	0,51	0,20	0,18-1,04	0,35-0,70
De andarilho (n=5)	0,36	-	0,10-0,52	-
Sem dificuldade de deslocamento, sem assistência (n=6)	1,26	-	0,70-1,83	-

No estudo da evacuação de gares subterrâneas de transporte a velocidade de deslocamento ascendente em escadas adquire particular relevância. Jiang, Deng, et al. (2009) estudaram o movimento de pessoas durante as horas de ponta, quando há maior aglomeração de pessoas, numa estação de metro, numa grande cidade na China (não identificada pelos autores). O processo de evacuação foi simulado através de um modelo computacional tendo os resultados sido comparados com as observações efetuadas no local.

Quadro 2.8 – Velocidade máxima de deslocamento ascendente em escadas [informação reunida em (Jiang, Deng, et al., 2009)]

Fonte	Velocidade máxima de deslocamento ascendente em escadas [m/s]	Local da análise
(Fruin, 1971)	0,67	Caminhos pedonais
(Hankin & Wright, 1958)	0,8	Metro de Londres
(Predtechenskii, V.M.; Milinskii, 1969)	1,23	-
(GSA, 1972)	1,11	-
(Van Bogaert, 1986)	0,62	Escola
(Ando et al., 1998)	1,21	Estações de comboio no Japão
(Daly et al., 1991)v	1,03	Metro
(Cunningham & Cullen, 1995)	0,8	-
(Lam & Cheung, 2000)	0,97-1,01	Estação de comboio em Hong Kong
(Fujiyama & Tyler, 2004)	1,16±0,31	Escada com 9 degraus. Os participantes são homens e mulheres saudáveis com idade entre 25 e 60 anos.
(Kretz et al., 2008)	1,43	O torneio de ténis da World Team Cup 2004 no Rochusclub em Düsseldorf

No Quadro 2.8 é apresentada a informação compilada por Jiang, Deng, et al. (2009), relativa à velocidade máxima de deslocamento ascendente em escadas de acordo com diversos estudos de outros autores. Este estudo registou uma velocidade máxima de subida de 0,79 m/s, que é um valor superior ao indicado por Fruin (1971), mas inferior a praticamente todos os outros valores apresentados no Quadro 2.8.

Jiang, Deng, et al. (2009) sugerem que esta diferença possa estar relacionada com o comportamento de caminhada do povo chinês, no entanto, este valor aparenta ser coerente com os valores sugeridos pela *International Maritime Organization – IMO* (2016), e indicados no Quadro 2.9, sendo o valor máximo apresentado de 0,84 m/s, para um indivíduo do sexo masculino e idade inferior a 30 anos.

Quadro 2.9 – Velocidades de deslocamento descendente e ascendente em vias verticais em função do género e grupo etário (IMO, 2016)

Grupo etário	Género	Movimento descendente		Movimento ascendente	
		Velocidade mínima [m/s]	Velocidade máxima [m/s]	Velocidade mínima [m/s]	Velocidade máxima [m/s]
< 30 anos	Masculino	0,76	1,26	0,5	0,84
	Feminino	0,56	0,94	0,47	0,79
> 30 anos	Masculino	0,64	1,07	0,47	0,79
< 50 anos	Feminino	0,49	0,81	0,44	0,74
> 50 anos	Masculino	0,5	0,84	0,38	0,64
	Feminino	0,45	0,75	0,37	0,61
> 50 anos, com mobilidade reduzida	Masculino	0,33-0,38	0,55-0,64	0,25-0,29	0,41-0,49
	Feminino	0,29-0,34	0,49-0,56	0,23-0,28	0,39-0,46

A fadiga é um fator geralmente ignorado nos modelos de simulação de evacuação ou, quando é considerada, consiste numa simples redução da velocidade de deslocamento. Considerando esta limitação, Ronchi et al. (2016) propuseram um modelo conceptual que tem em conta não apenas a fadiga física sentida pelos ocupantes (que se traduz numa redução da velocidade de deslocamento), e que é particularmente relevante no movimento ascendente de escadas, mas também tem em linha de conta as interações entre a capacidade física dos ocupantes e os processos psicológicos que podem ocorrer.

Yoon et al. (2013) desenvolveram um exercício de evacuação na estação de metro de Centum City, uma estação grande dimensão, na cidade de Busan, na Coreia do Sul, em que participaram 292 pessoas. A evacuação começou assim que a composição do metro entrou na estação e todo o processo foi registado através de câmaras de vídeo instaladas na estação. Após a ocorrência os participantes responderam a um questionário sobre si, tendo em conta os parâmetros da evacuação, nomeadamente: género, se estavam sozinhos ou

acompanhados, quão bem conheciam a estação em causa e qual era o seu conhecimento sobre evacuação em geral. Os resultados do estudo demonstraram que os participantes femininos demoraram em média 23% mais tempo a completar a evacuação e os participantes que estavam acompanhados foram em média 29% mais lentos. Verificou-se ainda que o conhecimento prévio da estação ajudou os participantes durante a evacuação. Tendo em conta o referido acima, constata-se que a diferença na velocidade de deslocamento está associada predominantemente à idade, ao género e também à existência de condicionalismos na mobilidade ou cansaço.

O mesmo estudo de Jiang, Deng, et al. (2009) analisou também o número de pessoas que consegue subir uma escada em simultâneo, uma vez que estas são normalmente os pontos de estrangulamento em gares subterrâneas de transporte. Fruin (1971) sugeriu que a largura mínima média utilizada por cada pessoa, numa escada, seria de 0,76 metros, no entanto, Jiang, Deng, et al. (2009) observaram que numa escada com 5,6 metros de largura o número máximo observado de passageiros na escada foi de 10-11 pessoas (Figura 2.2). Posto isto, a largura da escada utilizada por cada pessoa foi de cerca de 0,5 metros nesta estação, valor inferior ao sugerido por Fruin (1971).



Figura 2.2 – Densidade de passageiros numa das escadas da estação estudada por Jiang, Deng, et al. (2009)

Tendo em consideração a largura da escada utilizada por cada pessoa e também a velocidade de subida da mesma escada (referida anteriormente), Jiang et al. (2010) analisaram o efeito da variação destes dois parâmetros na simulação de evacuação de estações de metro na China. Os resultados obtidos demonstraram que aumentar a velocidade máxima de subida da escada de 0,67 m/s para 0,79 m/s não tem um impacto direto no desempenho em termos de evacuação da escada individualmente ou da estação

como um todo, sugerindo que tal facto está relacionado com a relação restritiva entre a densidade e a velocidade de deslocamento. No entanto, quando a largura mínima média da escada utilizada por cada pessoa é reduzida de 0,76 m para 0,5 m, o desempenho de evacuação da própria escada, e da estação de um modo global, melhoram consideravelmente, sendo o tempo de evacuação geral reduzido em quase 50%. Os autores sugerem que as características físicas e o comportamento de caminhada dos chineses podem ser diferentes das populações abordadas noutros estudos, realçando que, normalmente, os chineses são mais baixos e mais magros, resultando num comprimento de passada mais curto, mas também numa menor dimensão corporal.

Segundo dados da Organização Mundial da Saúde (WHO, 2020) a obesidade a nível mundial triplicou desde 1975, existindo em 2016 mais de 1,9 biliões de adultos com excesso de peso, sendo que destes, 650 milhões são obesos. Importa, portanto, perceber a influência que este aumento de peso poderá ter num cenário de evacuação. Por um lado, ao nível da velocidade de deslocamento e da resistência física, por outro lado, no aumento da dimensão corporal, uma vez que o aumento da largura de ombro a ombro se traduz numa maior ocupação de espaço, sendo este facto bastante relevante durante uma evacuação.

A influência da obesidade no esquema corporal foi já demonstrada (Scarpina et al., 2017), tendo sido observadas diferenças em parâmetros como o tamanho do passo ou a velocidade de deslocamento. Foi ainda observado que quando os participantes obesos passam por aberturas semelhantes a portas, a rotação das suas partes corporais é dimensionada de acordo com as dimensões física do seu corpo; no entanto, eles podem tentar minimizar o risco de colisão com obstáculos. Ahrens (2018) estudou a influência do aumento da dimensão corporal num cenário de evacuação através de modelação computacional. Foram testados intervalos crescentes de tamanho do corpo de 0,025 metros para seis cenários diferentes. Os resultados indicam que um aumento de 0,225 metros no raio do corpo aumenta os tempos de evacuação em cenários simples entre 12% e 72%.

A velocidade de movimento gatinhando (isto é, movendo-se com as mãos e os joelhos no chão) comparada com a velocidade de caminhada em situação normal é afetada pelas características físicas do ocupante durante uma evacuação em que seja necessário gatinhar, nomeadamente diferenças ao nível do género e, principalmente ao nível do Índice de Massa Corporal – IMC (normal, excesso de peso ou obeso) (Kady & Davis, 2009). Ainda assim, os autores reconhecem o facto de que o equipamento de proteção, fornecido no estudo, pode alterar a capacidade de gatinhar, especialmente para percursos mais longos e pessoas mais velhas, onde a fadiga se pode tornar um fator importante.

Um estudo semelhante, de Nagai et al. (2005) investigou, experimentalmente e por meio de simulação, o fenómeno do contra-fluxo num corredor considerando duas situações, os ocupantes poderão caminhar ou andar de gatas.

Num ambiente escolar, em Moscovo, na Rússia, foi observado por Kholshchevnikov et al. (2009) a existência de diferentes procedimentos relativos ao vestuário num cenário de evacuação, de forma a evitar a exposição ao frio, que se verifica no inverno. Os resultados do estudo (Quadro 2.10) mostraram a influência que a necessidade de vestuário adicional (neste caso para evitar a exposição ao frio no exterior), tem no tempo necessário para que se inicie a evacuação. De referir ainda que o vestuário tem relevância no aumento da dimensão corporal (Figura 2.3) que, como já referido é um dos fatores que pode influenciar o tempo de evacuação.

Quadro 2.10 – Tempo necessário para que se inicie a evacuação, em função do procedimento relativo ao vestuário (Kholshchevnikov et al., 2009)

Tempo necessário para que se inicie a evacuação, em função do procedimento relativo ao vestuário [segundos]		
Sem roupa de inverno	Com um cobertor	Com roupa de inverno
7,96	22,66	196,37



(A)
sem roupa de inverno



(B)
com um cobertor



(C)
com roupa de inverno

Figura 2.3 – Opções de vestuário numa evacuação no inverno
(Kholshchevnikov et al., 2009)

A influência do tipo de vestuário utilizado na velocidade de movimento foi examinada num estudo de Almejmaj et al. (2014). Estes procuraram analisar as diferenças culturais entre os países ocidentais e a Arábia Saudita, numa situação de emergência, com especial incidência no efeito do vestuário tradicional saudita na velocidade de deslocamento. Os resultados mostram que a velocidade de caminhada das mulheres diminui com o aumento do comprimento da abaya. Outros estudos, como os desenvolvidos por Galea et al. (2011) ou Almejmaj et al. (2017), analisaram também o impacto das diferenças culturais na evacuação, nomeadamente o tempo de reação e o comportamento humano em situação de emergência, temas que serão analisados com maior detalhe posteriormente neste documento.

2.1.2 Influência do efetivo e da densidade de ocupação

Na evacuação de um edifício, principalmente na presença de um grande número de ocupantes, é inevitável a existência de pontos de estrangulamento. Fruin & Strakosch (1987) introduziram o conceito de nível de serviço que corresponde à probabilidade de congestionamento de cada local. São descritos seis níveis de serviço (de nível A a nível F) para vias horizontais, verticais e filas. O nível A corresponde àquele com menor probabilidade de congestionamento, enquanto que no nível F a probabilidade de congestionamento é muito elevada. Os autores sugerem que, para situações de movimento de emergência e de espaço limitado, no âmbito de projetos e estudos de segurança contra incêndio, os níveis de serviço C, D e E são aceitáveis. Estes níveis de serviço consideram uma densidade de 2,3 a 0,5 m²/pessoa em caminhos horizontais e uma densidade de 0,9 a 0,4 m²/pessoa em vias verticais.

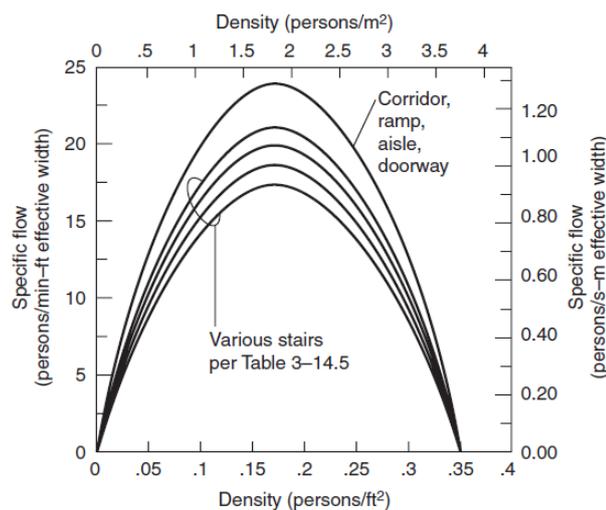


Figura 2.4 – Fluxo específico em função da densidade (Nelson & Mowrer, 2002)

Segundo Nelson & Mowrer (2002) se a densidade de ocupantes na saída for inferior a 0,54 pessoas/m², as pessoas irão mover-se ao seu próprio ritmo, independentemente da velocidade dos outros. Por outro lado, se a densidade exceder 3,8 pessoas/m², nenhum movimento ocorrerá até que uma parte suficiente da multidão tenha saído do ponto de estrangulamento de forma a reduzir a densidade de ocupantes. A Figura 2.4 ilustra esta variação, verificando-se que para um ponto de passagem num vão, o fluxo de pessoas é máximo quando a densidade é de 1,9 pessoas/m².

2.1.3 Influência do comportamento humano

A nível mundial, as regulamentações relativas à abordagem da SCIE pelo desempenho (em oposição às regulamentações prescritivas), assentam numa extensa lista de metodologias, com similaridades entre si, mas sem uma metodologia comum [revisto por (Meacham, 1998)].

A necessidade de compreender o comportamento humano em situação de incêndio, é apontada como característica fundamental para utilização de uma abordagem pelo desempenho (Meacham, 1998), sendo a segurança melhorada através da compreensão de como as pessoas realmente se comportam em situações de emergência e pela integração desses comportamentos na fase de projeto e no planeamento da evacuação (Meacham, 1999; Proulx, 2003). Hofinger et al. (2014) referem precisamente que a investigação desenvolvida no tema da evacuação de edifícios tem vindo a mostrar um interesse crescente no comportamento humano. Isto porque, anteriormente, os estudos de modelação da evacuação consideravam os ocupantes como homogéneos, sem emoção individual, motivação ou necessidades físicas, e apenas eram tidas em conta as características físicas (como a velocidade de deslocamento) ou os requisitos de espaço (dimensão ocupada pelas pessoas).

A relutância dos passageiros em iniciar a evacuação é um dos principais problemas que ocorrem numa evacuação de uma gare de transporte subterrânea (Fridolf, 2010), sendo sugerido que este aspeto está relacionado com os seguintes fatores:

- As pessoas tendem a manter as suas funções iniciais (como passageiros);
- A falta de informações rápidas, claras e coerentes;
- A ambiguidade da informação relativa à fonte de perigo (por exemplo, um incêndio);
- A presença de outras pessoas, ou seja, influência social.

Um primeiro facto a desmistificar é que nem todos os ocupantes de um edifício saem imediatamente ao ouvir um alarme, mesmo que os ocupantes se apercebam do som e o reconheçam como um sinal de alarme (Proulx et al., 2001). Alguns estudos neste tema

(Breznitz, 1984; MacClintock et al., 2001), demonstraram precisamente que, mesmo depois do início do sinal de alarme, as pessoas fazem muitas coisas antes de iniciarem a evacuação. Segundo estes autores a demora no início da evacuação pode ser atribuída aos seguintes fatores:

- Necessidade de reconhecimento do alarme e identificação do perigo;
- Avaliação da relevância (associada ao que Breznitz (1984) denomina de síndrome “cry wolf”, termo em inglês que designa o ato de dar um alarme falso, e que tem origem numa fábula infantil, podendo em português ser feito o paralelismo com a história de Pedro e o Lobo);
- Reconhecimento da ameaça (negação inicial, porque a ocorrência de um incêndio é um acontecimento raro);
- Necessidade de informação e orientação;
- Envolvimento noutra tarefa em curso.

Desta forma, para determinar o tempo necessário à evacuação, há que ter em conta um atraso inicial, correspondente ao tempo necessário ao início da evacuação propriamente dita, designado de tempo de pré-movimento ou tempo de pré-evacuação. Gwynne et al. (2003) analisaram os tempos necessários para que, após o sinal de alarme, se dê início à evacuação por parte dos ocupantes em edifícios do tipo hospitalar e escolar (universidade). Foi observado que, apesar dos tipos de ocupação serem totalmente distintos, os procedimentos adotados são semelhantes, isto é, após o alarme, os membros da equipa de segurança do edifício percorrem os diversos espaços a encorajar os ocupantes a abandonar o edifício. Verificou-se, no entanto, que a forma como os ocupantes reagem a estes procedimentos é bastante diferente. Nas instalações hospitalares os ocupantes apenas iniciam a evacuação depois de instruídos a fazê-lo por um profissional de saúde, enquanto que na evacuação da universidade, se verificou que os alunos são menos dependentes das ações dos funcionários, com mais de 50% dos ocupantes a iniciar a evacuação sem necessidade de aviso prévio. Os autores referem ainda que o tempo de pré-movimento dos alunos está dependente do seu nível de envolvimento com a atividade que esteja em curso.

O tema da reação ao sinal de alarme carece de maior desenvolvimento existindo, no entanto, alguma informação sobre os possíveis tempos de pré-movimento expectáveis, nomeadamente os indicados na norma BS DD240 (British Standards Institution, 1997), e apresentados no Quadro 2.11. Estes são diferenciados em função do tipo de ocupação do edifício, e têm em conta aspetos como o facto de os ocupantes estarem ou não acordados, e estarem ou não familiarizados com o edifício, com o sistema de alarme e com os procedimentos de evacuação. O tipo de ocupação é dividido em três tipos (W1, W2 e W3) sendo feito um agravamento do tempo de pré-movimento em função do tipo de sistema de

alarme, nomeadamente se é feito apenas por sirene (W3), ou se existe um sistema de alarme por voz, com mensagens pré-gravadas (W2) ou ao vivo (W1).

Quadro 2.11 – Tempo de pré-movimento, em minutos, de acordo com a BS DD240:1997
[adaptado de (Proulx, 2002)]

Tipo de ocupação	W1¹	W2²	W3³
Escritórios, edifícios comerciais e industriais, escolas, faculdades e universidades: os ocupantes estão acordados e familiarizados com o edifício, com o sistema de alarme e procedimento de evacuação.	< 1	3	> 4
Lojas, museus, centros de lazer, desporto e outros edifícios itinerantes: os ocupantes estão acordados, mas podem não estar familiarizados com a construção, sistema de alarme e procedimento de evacuação.	< 2	3	> 6
Dormitórios e edifícios residenciais: os ocupantes podem estar a dormir, mas estão maioritariamente familiarizados com a construção, sistema de alarme e procedimento de evacuação.	< 2	4	> 5
Hotéis e pensões: ocupantes podem estar a dormir e não estão familiarizados com a construção, sistema de alarme e procedimento de evacuação.	< 2	4	> 6
Hospitais e lares de idosos: um número significativo de ocupantes pode exigir assistência na evacuação.	< 3	5	> 8

¹ Utilização de sistema de comunicação por voz em direto, a partir do centro de comando com existência de circuito fechado de televisão ou de comunicação aos ocupantes pelos elementos da equipa de segurança devidamente treinada e uniformizada que pode ser vista e ouvida por todos os ocupantes do edifício.

² Instruções de segurança dadas por mensagem de voz gravada e/ou sinalética.

³ Sistema de alarme de incêndio dado por sirene e por pessoal sem formação adequada.

Uma outra norma, a PD 7974-6 (British Standards Institution, 2004) contempla também tempos de pré-movimento, apresentados no Quadro 2.12, sendo estes obtidos através da conjugação de quatro elementos: tipo de ocupação, tipo de alarme, complexidade do edifício e sistema de gestão de segurança. O tipo de ocupação tem em conta o facto de os ocupantes estarem ou não acordados, e estarem ou não familiarizados com o edifício, e contempla também informação relativa a gares de transporte (onde se considera que os ocupantes estão acordados e não estão familiarizados com o edifício). Em relação ao alarme existem três níveis: A1 (com Sistema Automático de Deteção de Incêndio/SADI e alarme geral), A2 (com SADI, sem alarme geral) e A3 (apenas alarme manual na zona afetada). A complexidade do edifício é também dividida em três níveis: B1 (edifício simples de um só piso), B2 (edifício simples de vários pisos) e B3 (edifício complexo). Por sua vez, o nível de gestão é dividido em: M1 (ocupantes habituais com elevado nível formação em segurança), M2 (semelhante a M1, com um nível intermédio de formação) e M3 (nível básico de formação).

Quadro 2.12 – Tempo de pré-movimento para iniciar a evacuação, de acordo com a PD 7974-6:2004 [adaptado de (British Standards Institution, 2004)]

Categoria e cenário	Tempo de pré-movimento dos primeiros ocupantes [min.]	Tempo de pré-movimento - distribuição de ocupantes [min.]
	Δt_{pre} (1º percentil)	Δt_{pre} (99º percentil) ^a
A: acordados e familiarizados		
M1 B1 – B2 A1 – A2	0,5	1
M2 B1 – B2 A1 – A2	1	2
M3 B1 – B2 A1 – A3	>15	>15
Para B3 considerar 0,5 adicionais, para orientação		
Para M1 normalmente exige a existência de um sistema de alarme por voz, caso seja previsível a presença de visitantes não familiarizados		
B: acordados e não familiarizados		
M1 B1 A1 – A2	0,5	2
M2 B1 A1 – A2	1	3
M3 B1 A1 – A3	>15	>15
Para B2 considerar 0,5 adicionais, para orientação		
Para B3 considerar 1 adicionais, para orientação		
Para M1 normalmente exige a existência de um sistema de alarme por voz		
Ci: a dormir e familiarizados (por exemplo, edifícios residenciais)		
M2 B1 A1	5	5
M3 B1 A3	10	>20
Para outras unidades num bloco, pressupõe-se uma hora		
Cii: com gestão da ocupação (por exemplo, apartamentos com serviços, em inglês, “serviced apartments”)		
M1 B2 A1 – A2	10	20
M2 B2 A1 – A2	15	25
M3 B2 A1 – A3	> 20	> 20
Ciii: a dormir e não familiarizados (por exemplo, edifícios hoteleiros)		
M1 B2 A1 – A2		
M2 B2 A1 – A2		
M3 B2 A1 – A3		
Para B3 considerar 1 adicionais, para orientação		
Para M1 normalmente exige a existência de um sistema de alarme por voz		
D: cuidados de saúde / acordados e não familiarizados (por exemplo, centros de dia, clínicas ou dentistas)		
M1 B1 A1 – A2	0,5	2
M2 B1 A1 – A2	1	3
M3 B1 A1 – A3	> 15	> 15
Para B2 considerar 0,5 adicionais, para orientação		
Para B3 considerar 1 adicionais, para orientação		
Para M1 normalmente exige a existência de um sistema de alarme por voz		
D: cuidados de saúde / a dormir e não familiarizados (por exemplo, hospitais e lares de idosos)		
M1 B2 A1 – A2	5 ^b	10 ^b
M2 B2 A1 – A2	10 ^b	20 ^b
M3 B2 A1 – A3	> 10 ^b	> 20 ^b
Para B3 considerar 1 adicionais, para orientação		
Para M1 normalmente exige a existência de um sistema de alarme por voz		
E: gares de transportes / acordados e não familiarizados		
M1 B3 A1 – A2	1,5	4
M2 B3 A1 – A2	2	5
M3 B3 A1 – A3	> 15	> 15
Para M1 e M2 normalmente exige a existência de um sistema de alarme por voz		
^a Tempo total de pré-movimento = Δt_{pre} (1º percentil) + Δt_{pre} (99º percentil)		
^b Estes tempos dependem da presença de pessoal suficiente para ajudar na evacuação de ocupantes com mobilidade condicionada		

Olsson & Regan (2001) registaram os tempos de pré-movimento, em situações de simulacros, em vários tipos de edifícios, na Nova Zelândia, tendo os resultados obtidos se revelado bastante inferiores aos recomendados na norma DD240. Os autores indicam que os tempos de pré-movimento apresentados na literatura referida parecem ser muito conservadores em comparação com os intervalos de tempo medidos, e sugerem que a investigação nesta área deve ser expandida. Os resultados demonstraram ainda que a existência de um sistema de alarme por voz potencia um tempo de pré-movimento inferior, por parte dos ocupantes, quando comparado com um sistema de alarme por sirene, ainda que a diferença seja relativamente pequena (< 32 segundos). Segundo Purser (2010), os sistemas de alarme por voz são mais eficientes do que os sistemas de alarme por sirene, possibilitando uma evacuação mais rápida, reduzindo o tempo de pré-movimento, particularmente em cenários em que os ocupantes estão acordados e não estão familiarizados com o edifício.

Também Nilsson (2015) estudou a influência do tipo de alarme, nomeadamente a influência da seleção dos sons e mensagens de forma a promover uma evacuação rápida. A pesquisa desenvolvida sugere que um alarme de voz deve consistir num sinal, de forma a atrair a atenção das pessoas, seguido de uma mensagem, com uma chamada de atenção, informação sobre o incidente e instruções de como proceder. A informação sobre a causa do alarme é particularmente importante, uma vez que pode reduzir o fator de incerteza que caracteriza a fase inicial do processo de evacuação, levando assim a uma atuação mais rápida (Nilsson, 2015). As instruções de como proceder são também importantes, uma vez que os ocupantes geralmente não estão habituados a situações de evacuação e como tal necessitam de orientação.

Um fator crucial numa situação de emergência é a seleção do caminho de evacuação mais adequado. As observações de comportamento humano em situações de emergência mostraram que os ocupantes normalmente abandonam os edifícios usando caminhos conhecidos, principalmente a saída principal, que habitualmente é a entrada de um edifício (*e.g.* Graham & Roberts, 2000; Sime, 1985). Um dos motivos sugeridos é o facto de os ocupantes terem tendência a considerar o caminho conhecido como sendo o mais curto, ignorando outras rotas que não conhecem. Ramachandran (1990) constatou que utilizar cegamente saídas conhecidas pode não apenas levar a uma distância e tempo de evacuação superiores, mas também pode aumentar os riscos de ferimentos e fatalidades, pois as rotas podem ser bloqueadas pela ação do incêndio.

Um ponto de agravamento na seleção de caminhos de evacuação previamente conhecidos é a influência social (isto é, a escolha do mesmo caminho de evacuação que os outros ocupantes), constituindo os fatores sociais um ponto crítico com impacto na evacuação

(Kinateder et al., 2018). Lovreglio et al. (2016) refere o fenómeno de seguir a manada (em inglês, “*herding*”) como um dos fatores sociais mais condicionantes da evacuação, sugerindo que as pessoas têm tendência a imitar as outras em situações de emergência, mesmo que sejam desconhecidas. Por outro lado, seguir os ocupantes pode ter um efeito positivo quando não se está familiarizado com o edifício (Lovreglio et al., 2014). Uma outra consequência deste fenómeno é o uso desproporcional entre saídas, sobrecarregando algumas delas, e levando a uma ineficiência na evacuação (Altshuler et al., 2005). Alguns autores sugerem ainda que em situação de emergência os ocupantes podem ter tendência a seguir determinados indivíduos, como os “líderes” (Aguirre, 2005) ou pessoas que estejam na proximidade, que Kinateder et al. (2018) designa de “vizinhos”. Aguirre (2005) sugere ainda que o conhecimento e capacidade dos “líderes” pode influenciar os resultados da evacuação de um grupo inteiro.

Outro fator comportamental a ter em conta numa situação de emergência é o pânico. Este fator pode ser particularmente relevante em locais com grande densidade de ocupação, como são geralmente as gares subterrâneas de transporte. Em maio de 1999, em Minsk, na Bielorrússia, durante uma tempestade repentina, um grupo de jovens que assistia a um concerto ao ar livre correu em busca de abrigo para a Estação de Metro de Nyamiha. A severidade da tempestade levou a que centenas de pessoas entrassem na estação, causando uma debandada geral (em inglês, “*stampede*”, que designa uma situação em que uma multidão corre na mesma direção, excitada ou assustada com algo). O impulso de pessoas e o pavimento molhado originaram inúmeras quedas, tendo a ocorrência culminado em centenas de feridos e mais de cinquenta mortos, a maioria por esmagamento ou asfixia. Os relatos obtidos indicam que as pessoas no exterior, desconhecendo o que se sucedia no interior da estação, continuaram a empurrar a multidão à sua frente com o objetivo de conseguirem entrar na estação para se abrigarem da chuva (BBC News, 1999).

Quarantelli (1954) descreve o fenómeno de pânico como “a antítese da atividade organizada de um grupo como uma reação aguda de medo, marcada pela perda do autocontrolo, que é seguida por ações não sociais e não racionais”. Nilsson (2015) refere que as primeiras regulamentações de SCIE assentavam no pressuposto de que o pânico é algo que pode ocorrer com facilidade numa situação de incêndio, levando, em alguns casos, à existência de recomendações para que, em situação de emergência, a informação disponibilizada ao público fosse restringida. Esta restrição baseia-se na ideia de que demasiada informação sobre o incidente poderia levar a uma corrida desenfreada para as saídas. No entanto, o conceito de pânico generalizado numa situação de incêndio tem sido disputado por diversos autores.

Fahy e Proulx (2009) argumentam que, apesar do stress verificado em situações de emergência, as pessoas tendem a tomar decisões racionais em vez de perder o autocontrolo. Acrescentam ainda que o verdadeiro comportamento de pânico raramente ocorre em situações de evacuação de edifícios. Por seu lado, Proulx & Sime (1991) demonstraram que a difusão de informações claras não leva ao pânico mas, ao invés, promove uma resposta rápida e uma evacuação eficaz. Os autores sugerem que dizer aos ocupantes a verdade sobre a ocorrência diminui o risco de pânico, acelerando a resposta dos ocupantes e, portanto, reduzindo a exposição a condições de incêndio perigosas e altamente stressantes. Nilsson & Frantzich (2010) referem que a utilização da palavra “incêndio”, num sistema de alarme por voz, identificando a causa da ocorrência tem um efeito positivo na perceção da mensagem, uma vez que chama à atenção dos ocupantes e aumenta a atenção dos mesmos para a mensagem.

2.1.4 Influência das condicionantes arquitetónicas das gares subterrâneas de transporte

Por via da sua localização, no subsolo, e da necessidade de controlar o acesso, as escadas e as barreiras para controlo de bilhetes são geralmente os pontos de congestionamento na evacuação de gares subterrâneas (*e.g.* Papakonstantinou et al., 2021; Wang & Song, 2020). O efeito destes dois pontos de congestionamento foi estudado por Wang & Song (2020), numa estação em Xangai, na China, através de simulação computacional, demonstrando que a utilização das duas escadas rolantes existentes, e a abertura automática das barreiras de controlo de bilhetes, foi essencial para melhorar o processo de evacuação.

Papakonstantinou et al. (2021) analisaram a evacuação de uma estação de metro de Atenas, na Grécia e constaram que a substituição dos pontos de controlo de bilhetes anteriormente existentes (Figura 2.5-A), por barreiras de controlo (Figura 2.5-B), resultou na redução da largura útil de passagem disponível, aumentando do tempo total de evacuação e o aumento do tempo de estrangulamento na zona de controlo de bilhetes.



(A) – solução anterior

(B) – solução atual

Figura 2.5 – Zona de controlo de acessos com (A) pontos de controlo de bilhetes e com (B) barreiras de controlo (Papakonstantinou et al., 2021)

2.1.5 Influência da temperatura elevada, do fumo e dos produtos da combustão

De forma a perceber a influência de um incêndio na evacuação de um edifício há que analisar as suas consequências diretas, nomeadamente as temperaturas elevadas que são atingidas e o efeito da presença de fumo e de produtos da combustão.

Do ponto de vista do projeto de segurança contra incêndio é possível estabelecer objetivos em termos de segurança para as pessoas, em função dos sistemas a serem projetados e dos cenários de incêndio previsíveis (Purser & McAllister, 2016), sendo possíveis as seguintes abordagens:

1. As instalações são projetadas para que os ocupantes não sejam expostos a altas temperaturas ou ao fumo de um incêndio, mesmo no pior cenário de incêndio preconizado;
2. Em alguns cenários de incêndio é considerado aceitável que alguns ocupantes experienciem alguma exposição ao incêndio, mas deve ser demonstrado que essa exposição não é suficiente para impedir a evacuação ou resultar em lesões, problemas de saúde prolongados ou a morte;
3. Em alguns cenários de incêndio é possível a existência de mortes, mas o risco de tal acontecer ou é aceitável ou comparável com os riscos inerentes a uma abordagem prescritiva em termos regulamentares (usando uma avaliação probabilística de risco).

Nas gares subterrâneas de transporte, tendo em conta que geralmente correspondem a locais de grande dimensão constituindo um único compartimento corta-fogo, e que, em situação de incêndio, pode ocorrer um fenómeno de “chaminé” nas vias verticais, com saída de fumo pelo mesmo local por onde será feita a evacuação, devem ser analisadas as condições de exposição aceitáveis para os ocupantes em situação de incêndio.

Quadro 2.13 – Condições limite para exposição ao calor [adaptado de (Purser, 2000)]

Método de transferência de calor	Intensidade	Tempo de exposição tolerado
Radiação	< 2,5 kW/m ²	> 5 min
	2,5 kW/m ²	30 seg
	10,0 kW/m ²	4 seg
Convecção	< 60°C e 100% saturado	> 30 min
	100°C < 10% H ₂ O [% v/v]	12 min
	120°C < 10% H ₂ O [% v/v]	7 min
	140°C < 10% H ₂ O [% v/v]	4 min
	160°C < 10% H ₂ O [% v/v]	2 min
	180°C < 10% H ₂ O [% v/v]	1 min

Numa situação de incêndio os dois métodos de transferência de calor críticos são a radiação e a convecção do calor gerado pelo incêndio. Purser (2000) enumera os tempos de exposição tolerados por um ser humano em função do calor radiativo ou convectivo, sendo estes apresentados no Quadro 2.13, sendo possível observar que o tempo de exposição é drasticamente reduzido à medida que a intensidade do incêndio aumenta.

Yang et al. (2013) desenvolveram uma análise computacional da evacuação de uma gare de transporte subterrânea em situação de incêndio. Neste estudo alternaram diversas variáveis, como a intensidade ou a localização do incêndio, a densidade de ocupação da estação, o sistema de controlo de fumo ou as propriedades do material combustível, tendo concluído que a taxa de libertação de calor tem pouca influência na eficiência da evacuação; verificaram, no entanto, que os restantes parâmetros referidos têm uma grande influência nos tempos de evacuação da estação.

Também Kallianiotis et al. (2018) estudaram a evacuação de uma estação de metro, com o objetivo de perceber o efeito do fogo e do fumo nos ocupantes e no processo de evacuação de um modo global. Constataram que a visibilidade é o fator principal para uma evacuação segura uma vez que uma quebra nas condições de visibilidade pode impedir totalmente o procedimento de evacuação. Os autores referem ainda que este facto pode levar ao aumento dos níveis de monóxido de carbono acima dos limites toleráveis enquanto os ocupantes ainda estão no interior da estação.

O produto da visibilidade e da densidade de fumo, expresso pelo coeficiente de extinção, é quase constante (Jin & Yamada, 1985). Este produto depende essencialmente do brilho do objeto, da iluminação da sala e das propriedades do fumo, sendo que, quando o fumo tem gases irritantes, essa relação é válida apenas para baixas densidades de fumo (Jin & Yamada, 1985). O coeficiente de extinção, corresponde à densidade ótica de fumo, e representa a atenuação ótica por unidade de comprimento. Na Figura 2.6 está representada a influência do coeficiente de extinção na visibilidade e na velocidade de deslocamento dos ocupantes, para fumo com gases irritantes e não irritantes.

A redução da visibilidade devido ao fumo do incêndio é causada não apenas pela densidade ótica do fumo, que dificulta a passagem de luz a ser captada pelos olhos, mas também pelas lágrimas derivadas dos gases irritantes presentes no fumo (Jin & Yamada, 1985).

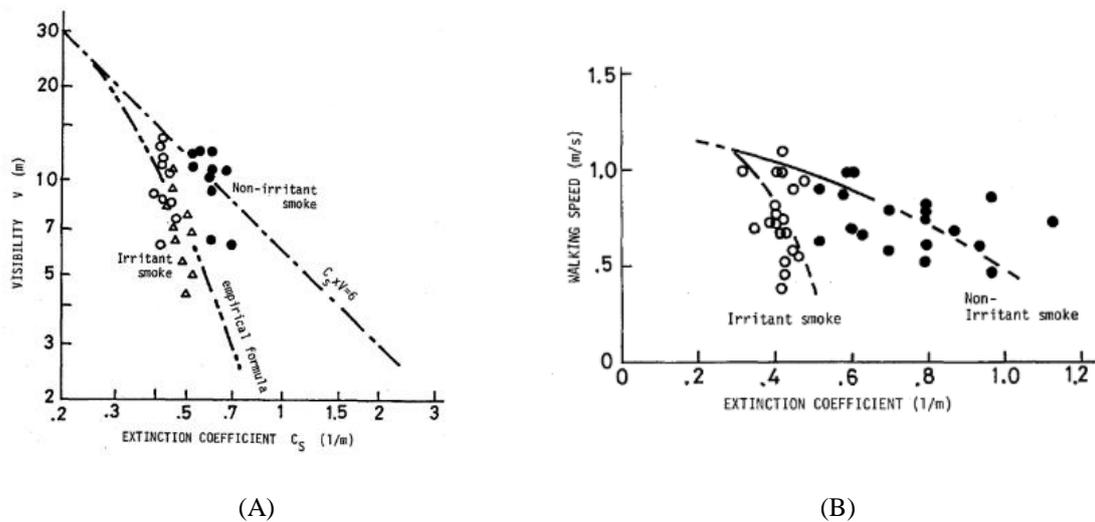


Figura 2.6 – Influência do coeficiente de extinção na (A) visibilidade / (B) e na velocidade de deslocamento dos ocupantes, para gases irritantes e não irritantes (Jin & Yamada, 1985)

No Quadro 2.14 são apresentados os valores para a densidade ótica de fumo e para a visibilidade necessária para uma evacuação segura, em função do grau de familiaridade dos ocupantes com o edifício. Nestes resultados observa-se que os ocupantes estarem familiarizados com o edifício potencia uma evacuação segura mesmo quando as condições de visibilidade são reduzidas; isto é, quando o ocupante conhece o edifício, uma visibilidade de 4 m é suficiente a evacuação ocorrer de forma segura, enquanto que se este não conhecer o edifício necessitará de uma visibilidade de 13 m. Esta relação ocorre de forma inversa na densidade ótica de fumo.

Quadro 2.14 – Critérios de densidade ótica de fumo e de visibilidade para uma evacuação segura [adaptado de (Jin, 2002)]

Grau de familiaridade dos ocupantes com o edifício	Densidade ótica de fumo: coeficiente de extinção [1/m]	Visibilidade [m]
Não familiar	0,15	13
Familiar	0,5	4

Purser & McAllister (2016) compilaram alguma da informação relativa à concentração de gases tóxicos necessária para afetar a evacuação, incapacitar os ocupantes ou até mesmo ser letal, sendo esta apresentada no Quadro 2.15. Esta informação tem por base a sugerida por Purser (2000) e adotada como referência pela *Society of Fire Protection Engineers* (SFPE), e também a presente na norma ISO 13571 (ISO, 2012). Para concentrações entre zero e os valores indicados para a incapacitação, desenvolve-se uma relação entre a visibilidade, a irritação na vista e a velocidade de deslocamento, conforme sugerido por Jin & Yamada (1985) e representada graficamente na Figura 2.6.

Quadro 2.15 – Concentração de gases tóxicos para afetar a evacuação, incapacitar ou ser letal
[adaptado de (Purser & McAllister, 2016)]

Gás	Concentração de gás [ppm] prevista para:			
	afetar a fuga dos ocupantes	incapacitar		ser letal em 30 minutos
	SFPE	SFPE	ISO 13571	SFPE
Ácido clorídrico - HCl	200	900	1000	3800
Ácido bromídrico - HBr	200	900	1000	3800
Ácido fluorídrico - HF	200	900	500	2900
Dióxido de enxofre - SO ₂	24	120	150	400-1400
Dióxido de azoto - NO ₂	70	350	250	63
Monóxido de azoto - NO	-	>1000	-	~1000
Acroleína - CH ₂ CHO	4	20	30	150
Formaldeído - HCHO	6	30	250	750

A exposição ao fumo pode ser avaliada por vários modelos, mas o modelo da dose efetiva fracionária (em inglês, “*fractional effective dose*” - FED) é o modelo mais simples e mais correntemente utilizado, podendo ser utilizado para verificar se o mesmo é incapacitante ou até mesmo letal (Klote, 2016). Este modelo permite calcular o parâmetro FED, que corresponde ao quociente entre a concentração dos produtos tóxicos (produtos da combustão) recebidos até ao momento, e a concentração efetiva capaz de causar incapacitação ou morte (Hartzell et al., 1985), conforme representado de forma simplificada na equação 2.1.

$$FED = \frac{\text{Dose recebida até ao momento (Ct)}}{\text{Dose efetiva Ct para causar incapacitação ou morte}} \quad (2.1)$$

A incapacitação resulta da perda de consciência devido aos efeitos combinados de monóxido de carbono, cianeto de hidrogénio e dióxido de carbono, com alguns efeitos adicionais relativos à falta de oxigénio (hipoxia) e de outros gases irritantes. A perda de consciência impede a fuga dos ocupantes, levando a uma absorção de gases asfixiantes que provavelmente resultará em morte dentro de aproximadamente um minuto de exposição (Purser & McAllister, 2016).

Para análise das condições de segurança aceitáveis num determinado edifício, por exemplo no âmbito de um projeto de SCIE baseado no desempenho, há que definir o nível de FED adequado para garantir a proteção dos ocupantes. Este limite de sustentabilidade em relação ao valor de FED é geralmente colocado em 0,3, podendo variar em casos específicos (Purser & McAllister, 2016).

A norma ISO 13571 (ISO, 2012) apresenta valores para a percentagem da população que é expectável que fique incapacitada em função do valor de FED a que determinado ocupante é exposto, tendo esta informação sido compilada no Quadro 2.16. Desta forma, utilizando este parâmetro é possível estimar o perigo, em termos de toxicidade, de uma mistura de gases, em função do tempo de exposição. Esta metodologia é utilizada em diversos modelos de simulação computacional de evacuação (entre eles o programa *Pathfinder*, sendo esta integração detalhada no capítulo 3.3.1.6).

Quadro 2.16 – Percentagem da população incapacitada em função do valor de FED
[adaptado de (ISO, 2012)]

Valor de FED	Percentagem da população que é expectável que fique incapacitada
< 0,3	< 11%
Entre 0,3 e 1	11 – 50 %
Entre 1 e 2	50 – 89 %
> 3	> 89%

2.2 Modelação da Evacuação

O conceito de projeto de SCIE baseado no desempenho assenta numa comparação entre o Tempo Necessário à Evacuação - TNE (em inglês, *Required Safe Escape Time - RSET*) e o Tempo de Sustentabilidade da Evacuação – TSE (em inglês, *Available Safe Escape Time - ASET*) (Purser, 2003).

O Tempo de Sustentabilidade da Evacuação corresponde ao tempo em que a via garante as condições de segurança necessárias à evacuação e está dependente das características e dimensão do edifício, do tipo e local do incêndio, da existência de compartimentação corta-fogo, ou de sistemas de controlo de fumo, entre outros.

Por outro lado, o Tempo Necessário à Evacuação, e no qual se focará este estudo, depende dos seguintes fatores:

- **Tempo de deteção**, isto é, o tempo entre a ignição do incêndio e a sua deteção;
- **Tempo de verificação**, isto é, o tempo de verificação da existência de incêndio, por parte da equipa de segurança do edifício, após o primeiro alarme restrito;
- **Tempo de pré-movimento**, isto é, o tempo entre o início do sinal de alarme e o início do movimento por parte dos ocupantes;
- **Tempo de movimento**, isto é, o tempo de deslocamento dos ocupantes até um local seguro no exterior do edifício. Este tempo pode ser decomposto em tempos parciais, correspondendo ao tempo de evacuação nos locais de risco, nas vias horizontais ou

nas vias verticais, e inclui fatores como o tempo de movimento efetivo e o tempo de estrangulamento, por exemplo na passagem de vãos ou nas vias verticais.

Desta forma, o Tempo Necessário à Evacuação pode ser descrito de acordo com a equação 2.2.

$$TNE = T_{detecção} + T_{verificação} + T_{pré-movimento} + T_{movimento} \quad (2.2)$$

O Tempo de Sustentabilidade da Evacuação (TSE), isto é, o tempo em que a via garante as condições de segurança necessárias à evacuação deve ser consideravelmente superior ao Tempo Necessário para a Evacuação (TNE), conferindo-nos desta forma uma margem de segurança (equação 2.3).

$$TSE \gg TNE \quad (2.3)$$

Os conceitos referidos encontram-se esquematizados na Figura 2.7.



Figura 2.7 – Representação esquemática dos conceitos de TNE e TSE

2.2.1 Método de cálculo analítico da NFPA130

Em conjugação com as respetivas legislações nacionais, a norma “NFPA130 – *Standard for Fixed Guideway Transit and Passenger Rail Systems*” (NFPA, 2020) é utilizada como referência no projeto de estações de metro em muitos países, incluindo em Portugal.

Esta norma define dois tempos de evacuação chave que devem ser garantidos: o tempo de evacuação da plataforma que deve ser inferior a 4 minutos, e o tempo de evacuação da estação que deve ser inferior a 6 minutos. Estes tempos são calculados em função do tipo de deslocamento e considerando os fluxos de pessoas indicados no Quadro 2.17.

Para obtenção dos tempos de evacuação referidos, são calculados os tempos de movimento (nas plataformas, escadas, e circulações horizontais), bem como os tempos de espera (nas escadas de ligação aos cais e ao exterior e nos canais de validação de títulos). Este método foi utilizado para efetuar uma análise comparativa de resultados em relação ao cenário mais gravoso simulado (ver capítulo 5.7).

Quadro 2.17 – Critérios para determinação do tempo de evacuação de acordo a NFPA130
[adaptado de (NFPA, 2020)]

Meios de saída	Fluxo de pessoas (máximo)	Velocidade de deslocamento (máximo)
Caminho horizontal	0,0819 pessoas/mm/min	37,8 m/min
Portas de emergência	0,0893 pessoas/mm/min	-
Escadas	0,0555 pessoas/mm/min	14,63 m/min
Canais de validação de títulos	50 pessoas/min	-

2.2.2 Simulação computacional da evacuação

O conceito tradicional de Tempo Necessário à Evacuação - TNE (em inglês, *Required Safe Escape Time* - RSET) e de Tempo de Sustentabilidade da Evacuação – TSE (em inglês, *Available Safe Escape Time* - ASET) apresenta algumas limitações (Babrauskas et al., 2010; Schröder et al., 2020), nomeadamente o facto de a ocorrência de um incêndio ser frequentemente ignorada no cálculo do TNE, isto é, geralmente assume-se que os ocupantes irão em direção a uma saída, ignorando os efeitos do incêndio no seu movimento.

Para minimizar este problema têm vindo a ser desenvolvidos diversos programas de simulação computacional de evacuação, alguns deles permitindo a integração do modelo de incêndio no próprio modelo de evacuação. O programa EXITT (Levin, 1989) foi um dos primeiros modelos de evacuação a considerar o efeito do incêndio no processo de evacuação. Atualmente existem múltiplos programas para modelação computacional da evacuação, mas entre os mais utilizados estarão o *Building-Exodus* (Owen et al., 1996), o FDS+EVAC (T Korhonen et al., 2007), e o *Pathfinder* (Thornton et al., 2011). O Quadro 2.18 resume a informação reunida por Abir et al. (2022) relativa às principais características dos programas de simulação computacional de evacuação *Building-Exodus*, FDS+EVAC e *Pathfinder*.

No desenvolvimento dos estudos apresentados nos capítulos seguintes deste documento utilizou-se o programa de simulação de evacuação *Pathfinder*, baseado em agentes, em que cada “indivíduo” tem características e estratégias de fuga individuais (cujo funcionamento é descrito em pormenor no capítulo 3.3.1). A seleção deste programa de simulação computacional de evacuação foi baseada em vários fatores, entre eles a experiência prévia do autor com este programa, a facilidade de utilização, a possibilidade de integração de

ficheiros CAD, bem como o facto da sua utilização para fins académicos ser gratuita. De referir também a possibilidade de integração com o programa *PyroSim* (também ele com licença gratuita para fins académicos), e que utiliza o motor de cálculo computacional de dinâmica de fluidos do “*Fire Dynamics Simulator (FDS)*”, do NIST - *National Institute of Standards and Technology*, sendo os resultados integrados no modelo de evacuação nos cenários em que for considerada a ocorrência de um incêndio.

Quadro 2.18 – Comparação das principais características dos programas de simulação computacional de evacuação Building-Exodus, FDS+EVAC e Pathfinder
[informação reunida em (Abir et al., 2022)]

Caraterísticas	Programa de simulação		
	Building-Exodus	FDS + Evac	Pathfinder
Inteligência artificial	Baseada em regras	Baseada em regras	Baseada em regras
Evacuação assistida	Sim	-	Sim
Dispositivos de movimento	Sim	-	Sim
Importação ficheiros CAD	Sim	Não	Sim
Utilização de elevadores	Não	Não	Sim
Padrão da malha	Fina	Fina	Contínua
Contra-fluxo	Sim	Sim	Sim
Perspetiva do modelo	Global	Individual	Individual/Global
Tempo de pré-movimento	Sim	Sim	Sim
Suporte de grupo	Não	Não	Sim
Evacuação prioritária	Sim	Não	Sim
Atributos	Sim	Sim	Sim

2.3 Considerações finais

Foram apresentados neste capítulo os principais fatores que influenciam a evacuação de um edifício, tendo sido demonstrado que as características arquitetónicas do edifício, como sejam a largura das vias e das saídas, a existência de escadas, ou as distâncias a percorrer, têm bastante importância na evacuação, sendo esta também influenciada pelas características da população presente no edifício, como por exemplo o número de ocupantes ou a densidade de ocupação.

Estes fatores culminam naquilo que se pode traduzir por tempo de movimento da evacuação, que tem em conta, por um lado, a velocidade de movimento e a distância percorrida pelos ocupantes, por outro, o tempo necessário para passar em determinados pontos críticos (como sejam portas, ou no caso em estudo, os pontos de controlo de bilhetes), onde geralmente ocorre uma redução da largura de passagem disponível, levando a uma maior densidade de ocupantes e conseqüentemente a uma redução do fluxo de passagem de pessoas nesses pontos.

Por outro lado, foi possível identificar aquele que é o maior condicionante da evacuação, isto é, o comportamento humano. Este fator é afetado por diversos aspetos, todos eles com potencial para condicionar a evacuação, sendo o tempo de pré-movimento, aquele que tem maior influência no tempo total de evacuação. Isto é, para que uma evacuação decorra de forma célere, e ocorra na fase inicial do incêndio (fase em que as vias ainda apresentam condições de sustentabilidade) é vital que, não só o incêndio seja detetado e o alarme seja ativado, mas acima de tudo que os ocupantes se apercebam do sinal de alarme, e deem início ao movimento de evacuação.

3 MODELAÇÃO DA EVACUAÇÃO DE UMA ESTAÇÃO DE METRO

3.1 Objeto do estudo

No presente estudo selecionou-se a Estação de Metro Baixa-Chiado, em Lisboa, Portugal, por forma a estudar a evacuação de gares subterrâneas de transporte em caso de incêndio aplicada à realidade portuguesa (Figura 3.1). Os principais motivos para a seleção desta estação foram a sua dimensão, profundidade, o elevado número de passageiros e ser uma estação que serve duas linhas de metro.

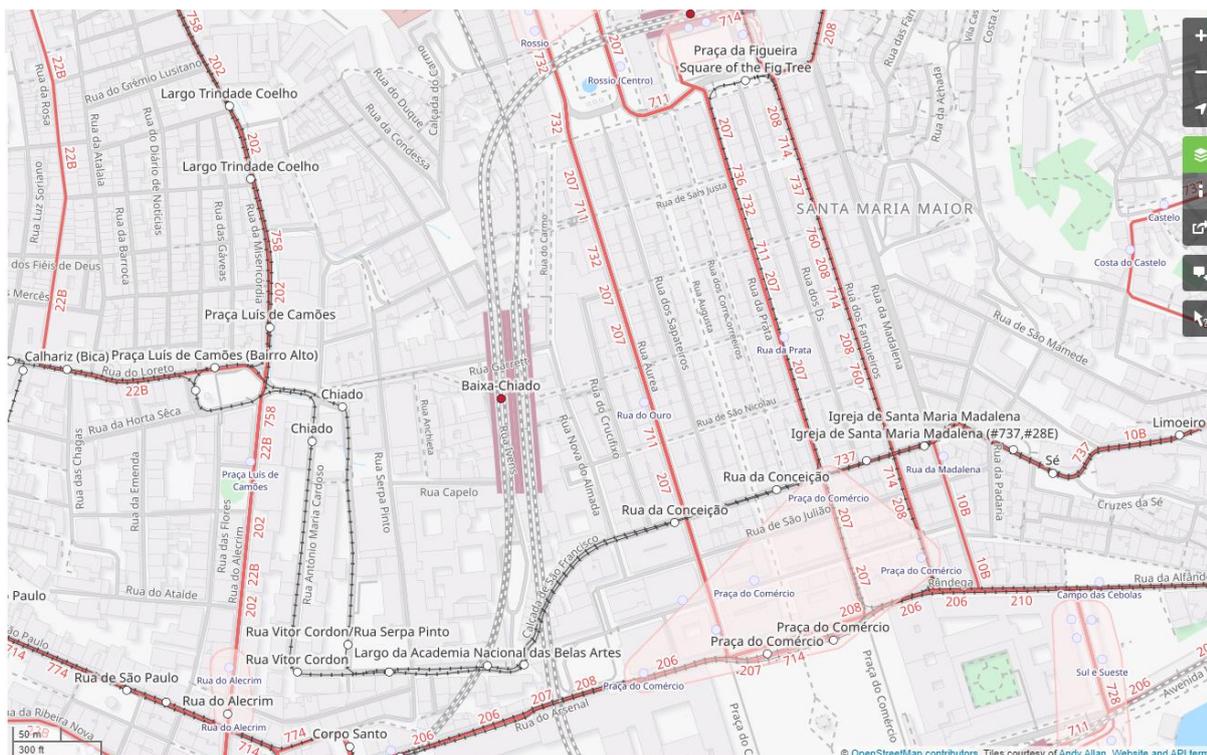


Figura 3.1 – Localização da Estação Baixa-Chiado
(fonte: opentstreetmaps.com)

A rede do Metropolitano de Lisboa é constituída por 56 estações (com mais duas em construção), distribuídas por quatro linhas e com um total de 44,5 quilómetros de extensão (Figura 3.2). O material circulante é constituído por 333 carruagens e em 2019 foram transportados 173 milhões de passageiros (Metropolitano de Lisboa, 2020, 2021). A Estação

Baixa-Chiado foi inaugurada em 1998 e é uma estação dupla, com cerca de 45 metros de profundidade, servindo a Linha Verde e a Linha Azul. Em 2018 foi utilizada por cerca de 13,6 milhões passageiros, considerando entradas e saídas (Metropolitano de Lisboa, 2019). A estação é constituída por duas galerias onde se localizam as plataformas das duas linhas, existindo 3 pontos de ligação entre elas ao nível dos cais e 5 pontos de ligação no nível superior da estação; existem ainda dois túneis de saída para o exterior (Rua do Crucifixo e Largo do Chiado).



Figura 3.2 – Diagrama da rede do metropolitano de Lisboa e identificação da Estação Baixa-Chiado (fonte: metrolisboa.pt)

Até ao momento não ocorreu nenhum grande incêndio no Metropolitano de Lisboa, no entanto, existem alguns incidentes a registar, nomeadamente:

- Estação Arroios, 1976 – incêndio num comboio de 4 carruagens (ML7) que se encontrava junto à estação Arroios mas sem passageiros (Metropolitano de Lisboa, 1976);
- Estação Alameda, 1997 – incêndio no estaleiro de construção da linha vermelha, junto à Estação da Alameda, no qual morreram dois funcionários (Ribeiro & Lopes, 1999); Os bombeiros foram chamados mas dirigiram-se por engano à estação Areeiro não tendo encontrado o incêndio; quando foram rechamados a situação já estava descontrolada.

Desconhece-se se os dois funcionários do Metropolitano de Lisboa se tentam esconder ou se se aperceberam do incidente, mas pensava-se que teriam conseguido sair, o que não se verificou (António Valente, com. pess., 22 de maio de 2022).

- Estação Sete Rios, 2012 – pequeno incêndio que ficou circunscrito a uma loja, não tendo afetado a circulação do metro (TVI24, 2012);
- Estação Amadora Este, 2016 – pequeno foco de incêndio, num caixote de lixo, que levou a evacuar a estação como medida de precaução (SIC Notícias, 2016);
- Estação Entrecampos, 2018 – incêndio numa passadeira rolante (CM Jornal, 2018);
- Túnel entre Estação Marquês e Parque, 2019 – incêndio no túnel causado pela "fricção da carruagem" com o carril (Observador, 2019).

De referir também que o Metropolitano de Lisboa tem implementado um conjunto de procedimentos em que, após a ocorrência de um acidente, é sempre constituída uma comissão de inquérito para análise das condições do ocorrido, audição das testemunhas e verificação de meios técnicos adicionais (caixas negras). Deste inquérito são produzidas conclusões e recomendações para melhorar o sistema e mitigar os riscos identificados. (António Valente, com. pess., 22 de maio de 2022). Existe também um protocolo de cooperação com os Bombeiros Sapadores de Lisboa, onde são realizados regularmente, nas diversas estações da rede, exercícios de atuação dos meios de socorro, o que potenciará uma rápida intervenção em caso de ocorrência de um incêndio (António Valente, com. pess., 15 de setembro de 2021).

3.1.1 Caracterização da Estação Baixa-Chiado

A Estação Baixa-Chiado é uma estação dupla, com cerca de 45 metros de profundidade, servindo a Linha Verde e a Linha Azul. Possui dois níveis principais: um nível inferior onde se situam os cais das duas linhas, e um nível superior, interligado com os cais por uma série de aberturas: é a partir deste nível que são feitos os acessos ao exterior. Ao nível do cais cada linha tem cerca de 105 metros de comprimento e 15 metros de largura, sendo interligadas neste nível por três galerias, conforme esquematizado na Figura 3.3.

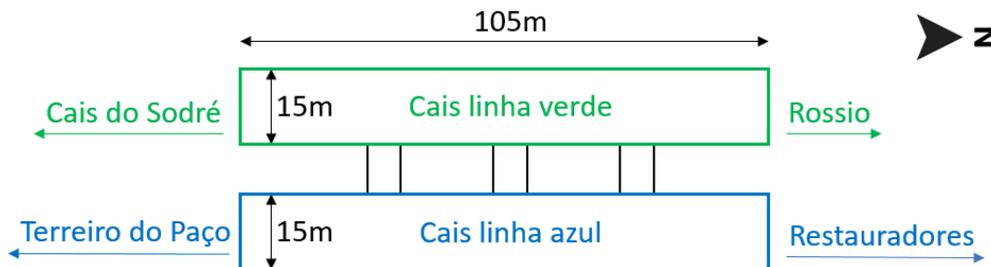


Figura 3.3 – Representação esquemática do nível inferior da Estação Baixa-Chiado

No topo de cada cais existe uma escadaria que o interliga com o nível superior; em cada linha, existem um total de oito aberturas horizontais que interligam os dois níveis (Figura 3.4). No nível superior, cada linha tem cerca de 140 metros de comprimento e 15 metros de largura; sendo interligadas neste nível por cinco galerias, conforme esquematizado na Figura 3.4. Os tetos da estação no nível superior são abobadados, incluindo nas linhas, galerias de interligação e galerias de acesso à superfície.

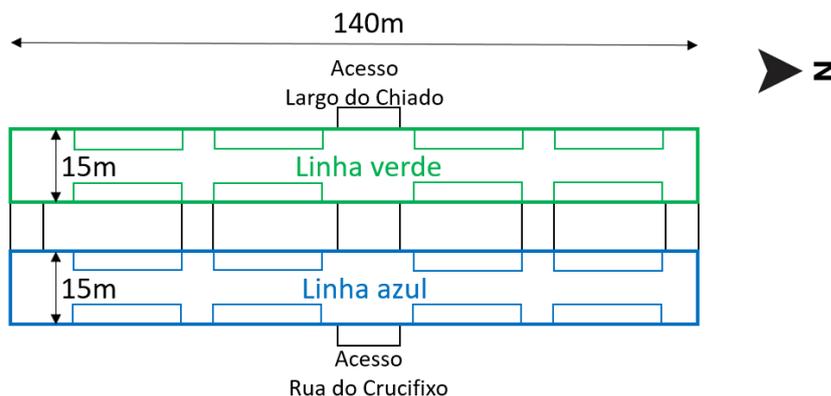


Figura 3.4 – Representação esquemática do nível superior da Estação Baixa-Chiado

O acesso à superfície faz-se por dois acessos, a partir do nível superior da estação, um que dá acesso à Rua do Crucifixo e outro ao Largo do Chiado. O acesso à Rua do Crucifixo tem cerca de 75 metros de comprimento, vencendo um desnível de cerca de 10 metros, através de dois lanços de escadas duplos (cada um com cerca de 2,1 metros de largura útil); entre as duas escadas existe um conjunto de duas escadas rolantes. O acesso ao Largo do Chiado tem cerca de 165 metros de comprimento, vencendo um desnível de cerca de 36 metros, através de quatro lanços de escadas duplos (cada um com cerca de 2,1 metros de largura útil) e um quinto lanço de escadas, já parcialmente ao ar livre, com cerca de 6 metros de largura útil; entre as duas escadas existe um conjunto de duas escadas rolantes.

3.1.2 Enquadramento regulamentar da Estação Baixa-Chiado em termos de SCIE

A presente regulamentação de segurança contra incêndio em edifícios categoriza os mesmos em doze utilizações-tipo (UT) distintas, em função do tipo de uso dominante dos mesmos, e dentro de cada utilização-tipo atribui uma categoria de risco, que corresponde a uma classificação em quatro níveis de risco de incêndio (sendo a 4ª categoria a mais gravosa).

De acordo com o ponto 1, do Artigo 8º, do RJ-SCIE (2008), a estação Baixa-Chiado enquadra-se na utilização-tipo VIII, «Comerciais e gares de transportes», que corresponde “*a edifícios ou partes de edifícios, recebendo público, ocupados por estabelecimentos comerciais onde se exponham e vendam materiais, produtos, equipamentos ou outros bens, destinados a ser consumidos no exterior desse estabelecimento, ou ocupados por gares destinados a aceder*

a meios de transporte rodoviário, ferroviário, marítimo, fluvial ou aéreo, incluindo as gares intermodais, constituindo espaço de interligação entre a via pública e esses meios de transporte, com exceção das plataformas de embarque ao ar livre”.

O Quadro 3.1 reproduz o Quadro VII, do Anexo III, do RJ-SCIE (2008) onde são definidos os critérios para atribuição da categoria de risco a edifícios da UT-VIII.

Quadro 3.1 – Reprodução do Quadro VII, do Anexo III, do RJ-SCIE (2008)

Categoria	Altura da UT VIII	Valores máximos referentes à utilização-tipo VIII	
		Número de pisos ocupados pela UT VIII abaixo do plano de referência (*)	Efetivo da UT VIII
1. ^a	≤ 9 m	0	≤ 100
2. ^a	≤ 28 m	≤ 1	≤ 1000
3. ^a	≤ 28 m	≤ 2	≤ 5000
4. ^a	> 28 m	> 2	> 5000

(*) Não são contabilizados os pisos destinados exclusivamente a instalações e equipamentos técnicos que apenas impliquem a presença de pessoas para fins de manutenção e reparação, e/ou que disponham de instalações sanitárias.

De forma a determinar a categoria de risco do edifício há que determinar o efetivo total do mesmo, sendo que o mesmo corresponde ao somatório dos efetivos de todos os seus espaços suscetíveis de ocupação. Tendo em conta que a estação possui quatro plataformas, cada uma com cerca de 400 m² de área útil, e que segundo o Quadro XXVII, do Artigo 51.º, do RT-SCIE (2008), o índice de ocupação das plataformas de embarque é 3 pessoas/m², há a considerar 1200 pessoas em cada cais de embarque.

Segundo o Artigo 266.º, do RT-SCIE (2008), “nas gares e terminais de transporte, a área dos espaços exclusivamente ocupados por corredores, escadas fixas ou mecânicas e passarelas rolantes, não deve ser tomada em consideração para o cálculo do efetivo”, no entanto, sendo uma zona de passagem e de acesso (sendo inclusivamente utilizada por transeuntes que atravessam a estação sem utilizarem o metro), estima-se um efetivo adicional de 200 pessoas no piso superior.

Deste forma, o cálculo do efetivo da estação poderá ser sistematizado conforme indicado no Quadro 3.2; este efetivo corresponde a uma densidade de ocupação bastante elevada, e será testada num dos conjuntos de cenários de evacuação definidos no capítulo 3.3.3.

Quadro 3.2 – Sistematização do cálculo do efetivo de acordo com a regulamentação em vigor

Número de pessoas presentes em cada zona da estação					Total [pessoas]
Linha Verde		Linha Azul		Nível superior	
Cais Oeste	Cais Este	Cais Oeste	Cais Este		
1200	1200	1200	1200	200	5000

Tendo em conta os critérios apresentados no Quadro 3.1, a elevada profundidade da estação (apesar de só existirem 2 pisos propriamente ditos, considera-se que a profundidade equivalente é superior a 2 pisos abaixo do plano de referência), e também ao facto de o efetivo calculado estar no limiar das 5000 pessoas, classificar-se-ia a estação como pertencendo à 4ª categoria de risco.

De referir também que a Estação Baixa-Chiado foi construída antes da publicação da legislação de SCIE atualmente em vigor.

3.2 Modelação de incêndio

3.2.1 Programa de simulação de incêndio

As simulações desenvolvidas neste trabalho tiveram por base o motor de cálculo computacional de dinâmica de fluidos (em inglês, “*Computational Fluid Dynamics*” – CFD) do “*Fire Dynamics Simulator (FDS)*”, desenvolvido pelo “*Building and Fire Research Laboratory*” do NIST – “*National Institute of Standards and Technology*”. A sua primeira versão foi lançada em 2000, tendo sido utilizada a versão FDS 6.7.5 neste trabalho. O “*Smokeview*” é um programa que acompanha o FDS e permite a visualização gráfica dos resultados; ambos os programas são de acesso livre.

Por sua vez, o *PyroSim* é um programa desenvolvido pela *Thunderhead Engineering*, que utiliza o motor de cálculo do FDS, e cujo o objetivo principal é o de apoiar o utilizador na definição e parametrização do seu modelo, uma vez que o mesmo possui um interface gráfico de utilização mais facilitada do que o FDS (por exemplo, permite a importação de geometrias em formato CAD ou IFC). Este programa permite a parametrização da geometria a utilizar no modelo, definição das características dos materiais, tipos de reações, sendo todos estes os parâmetros possíveis de definir no FDS. Na prática o *PyroSim* é um pré-processador, isto é, é um programa que recebe informações (definidas pelo utilizador) e as exporta de forma a corresponder aos requisitos de entrada de outro programa (neste caso o FDS). Neste trabalho foi utilizada a sua versão 2020.5.1118, através de uma licença gratuita para fins académicos.

O modo como os diferentes modelos de CFD lidam com a turbulência constitui a principal diferença entre eles, sendo esta complexa de prever principalmente em situações com a presença de fogo e fumo (Bilge, 2018).

Existem três métodos comumente utilizados para modelar a turbulência: o método da Simulação Numérica Direta (em inglês “*Direct Numerical Simulation*” – DNS), o método de equações médias de Reynolds de Navier-Stokes (em inglês “*Reynolds Averaged Navier Stokes*” – RANS) e o método de simulação das grandes escalas (em inglês “*Large Eddy Simulation*” – LES) (Mishra & Aharwal, 2018). O modelo DNS responde diretamente aos efeitos de turbulência, enquanto o modelo LES ignora as turbulências de menor escala (através da utilização de um filtro passa-baixo), por sua vez o modelo RANS ignora as flutuações na turbulência e pretende apenas calcular o fluxo médio de turbulência. O FDS resolve numericamente uma forma das equações diferenciais de Navier-Stokes (que descrevem o escoamento de fluidos), através do modelo de LES, apropriado para baixas velocidades ($Ma < 0,3$), com um fluxo acionado termicamente com ênfase no transporte de fumo e calor proveniente de um incêndios (McGrattan et al., 2021).

As equações do modelo LES são obtidas através da aplicação de um filtro passa-baixo, parametrizado para uma dimensão Δ , sobre as equações de transporte de massa, momento e energia. No âmbito do FDS é possível interpretar os filtros nas equações de LES como células. Por exemplo, numa dimensão, a densidade filtrada para uma célula de comprimento Δ seria dada pela equação 3.1

$$\bar{\rho}(x, t) = \frac{1}{\Delta} \int_{x-\Delta/2}^{x+\Delta/2} \rho(r, t) dr \quad (3.1)$$

No FDS, o filtro de dimensão Δ é equivalente à dimensão dx de uma célula.

3.2.2 Caracterização do modelo utilizado

O modelo da estação em estudo foi criado no *PyroSim*, tendo em conta as plantas da estação e de acordo com as dimensões referidas acima (Figuras 3.5 e 3.6). Foi utilizada uma malha de cálculo com dimensões de 0,5 x 0,5 x 0,5 metros, por ser a que apresentou a melhor relação entre a fiabilidade dos resultados e o tempo de cálculo necessário. Durante o desenvolvimento deste trabalho verificou-se a ocorrência de erros de instabilidade numérica no FDS quando se utilizaram malhas de cálculo com dimensões de 1,0 x 1,0 x 1,0 metros, ou quando se misturavam malhas com dimensões de 0,5 x 0,5 x 0,5 metros com malhas de 1,0 x 1,0 x 1,0 metros; pensa-se que este facto estará associado às elevadas velocidades de ar, associadas ao sistema de controlo de fumo.

Tendo em conta que este estudo se foca no estudo da evacuação em cenário de incêndio da estação propriamente dita, e de forma a ser possível a simplificação do modelo, e rentabilização do tempo de processamento das simulações, não foi considerada toda a extensão dos túneis de ligação à rede do Metro de Lisboa, tendo sido considerados apenas os 20 metros iniciais de extensão nos túneis de ligação às Estações do Rossio, Cais do Sodré e Terreiro do Paço, e 50 metros de extensão no túnel de ligação aos Restauradores (por ser o mais próximo do foco de incêndio considerado).

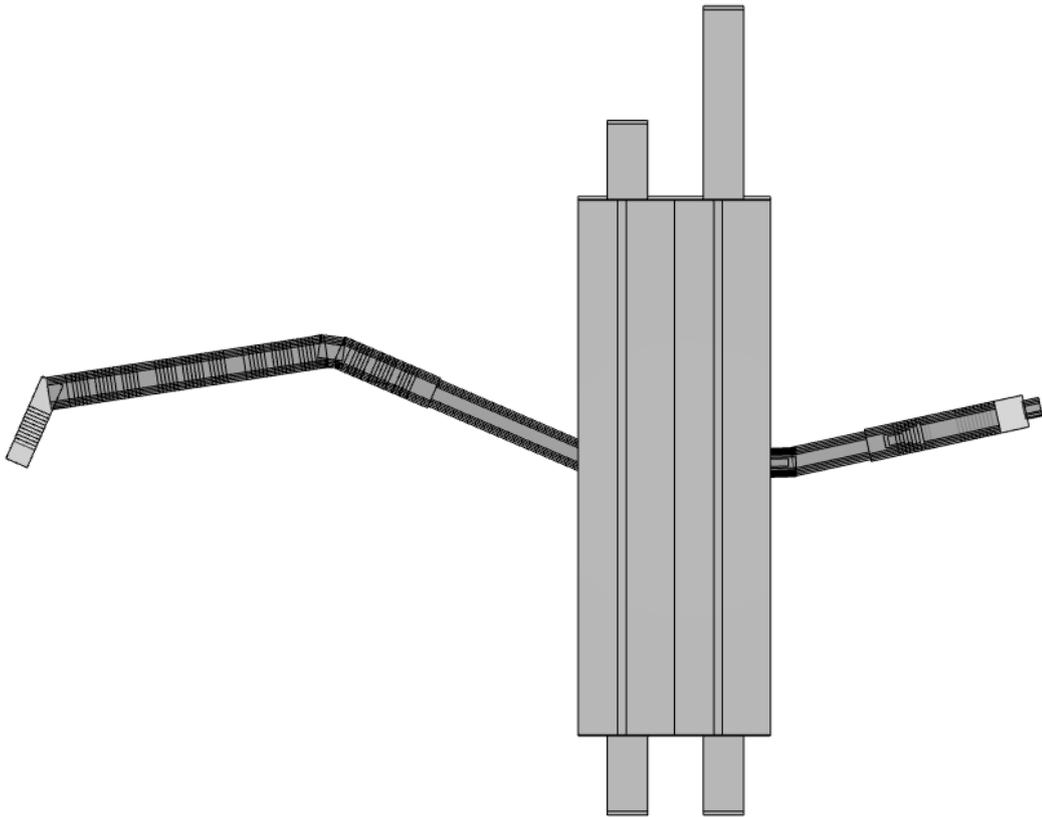


Figura 3.5 – Geometria da estação modelada no *PyroSim* - vista superior

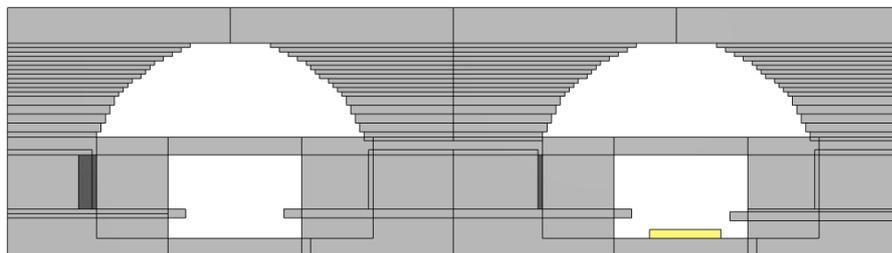


Figura 3.6 – Geometria da estação modelada no *PyroSim* - vista em corte

Para parametrização do incêndio há que definir qual a taxa máxima de libertação de calor (em inglês, *Heat Release Rate* - HRR) a utilizar na simulação. Segundo Chiam (2005), existem diversos métodos que podem ser usados para estimar a HRR máxima num incêndio numa carruagem de metro, ainda que nem todos consigam prever de forma realista a HRR máxima, devido ao facto de não considerarem o comportamento ao fogo de alguns materiais ou as geometrias do comboio ou do túnel. De acordo com o levantamento de informação efetuado pelo mesmo autor, os valores de pico para a HRR adotados nas diversas linhas de metro analisadas, são os apresentados no Quadro 3.3, variando estes valores entre 5 MW e 31,1 MW, consoante o método utilizado para a sua determinação.

Quadro 3.3 – Valores de taxa de libertação de calor máxima adotados em algumas linhas de metro [informação reunida em (Chiam, 2005)]

País	Linha de Metro	HRR máxima [MW]	Referência
Singapura	North South Line (NSL)	24	(Chua, 2003)
	East West Line (EWL)	24	(Chua, 2003)
	North East Line (NEL)	15	(Chua, 2003)
	Circle Line (CCL)	10	(Chua, 2003)
Austrália	New South Link	10	(Chua, 2003)
Hong Kong	Lantau Airport Line (LAL)	5	(Chua, 2003)
	Airport Express Line (AEL)	10	(Chua, 2003)
Tailândia	Chaloem Ratchamongkhon MRT line, Bangkok	7	(Drake & Meeks, 2000; Yau et al., 2002)
Grécia	Metro de Atenas	10	(Castro et al., 1997)
Reino Unido	St Paul's City Thameslink, Londres	16	-
Estados Unidos da América	Mount Lebanon Tunnel light rail transit, Pittsburgh, PA	13,2	(Kennedy & Patel, 1988)
	Amtrak New York City Tunnels	31,1	-
	Ventilation system upgrade study for Washington DC (WMATA) system	18	(Hettinger & Barnett, 1991)
		23,1	(Kennedy et al., 1998)

Tendo em conta o indicado acima, optou-se por estudar dois conjuntos de situações de incêndio, descritas em pormenor no capítulo 3.2.4, considerando duas taxas de libertação de calor máximas, uma de 10 MW, e outra mais gravosa de 20 MW que, de acordo com a literatura referida no Quadro 3.3 são representativas deste tipo de ocorrência. A norma NFPA 204 (2012) classifica os incêndios em função da sua taxa de crescimento: um incêndio com uma taxa de crescimento de 187 W/s^2 é considerado ultra rápido, com $46,9 \text{ W/s}^2$ é considerado rápido, $11,7 \text{ W/s}^2$ é considerado médio e $2,9 \text{ W/s}^2$ é considerado como tendo um crescimento lento.

Como não foi possível identificar na literatura uma taxa de crescimento específica para um incêndio numa carruagem, estando esta dependente do tipo de materiais existentes no comboio e também da origem do mesmo, optou-se por considerar um incêndio com uma taxa de crescimento de $46,9 \text{ W/s}^2$ correspondendo a um incêndio de crescimento rápido. Esta escolha é coerente com a utilizada por outros autores na simulação de incêndios em estações/túneis de metro (e.g. Bilge, 2018).

Desta forma, considerando uma curva de incêndio do tipo t^2 , o incêndio atinge o seu pico aos 462 segundos para uma HRR de 10 MW, e aos 654 segundos para uma HRR de 20 MW, conforme se pode observar na Figura 3.7.

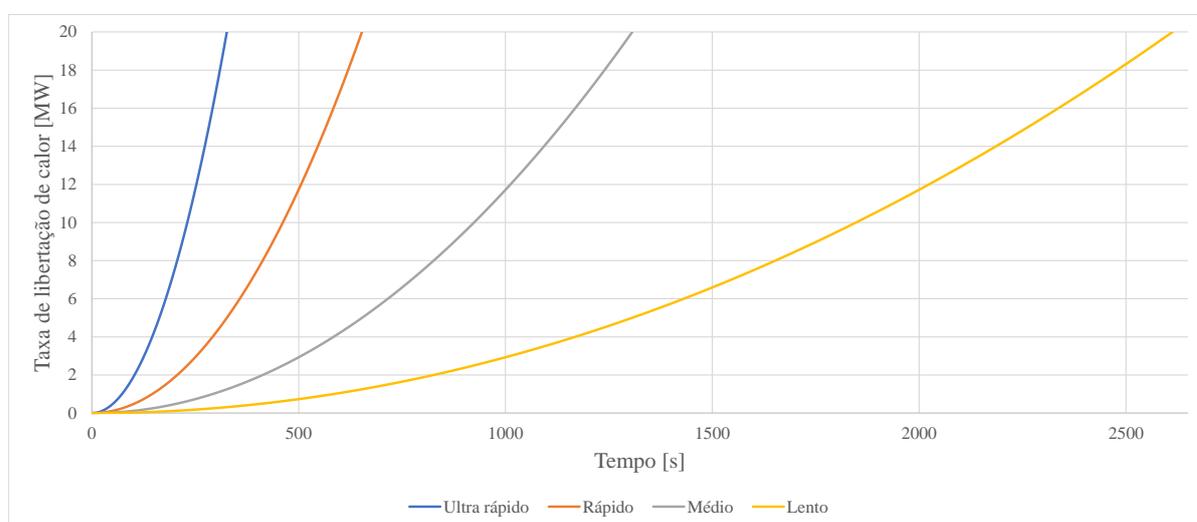


Figura 3.7 – Taxa de libertação de calor para diferentes taxas de crescimento do incêndio (curva t^2)

No programa de simulação foi parametrizado um incêndio, constituído por uma superfície com 40 m^2 , do tipo “burner”, com uma HRR de 250 kW/m^2 (para uma HRR máxima de 10 MW) ou 500 kW/m^2 (para uma HRR máxima de 20 MW). As curvas de incêndio utilizadas são do tipo t^2 , considerando os tempos de crescimento referidos acima.

A localização do foco de incêndio considerada para diversos cenários estudados, está indicada na Figura 3.8, correspondendo a um potencial incêndio numa carruagem parada no topo norte do cais da Linha Azul, junto ao túnel que liga à estação dos Restauradores.

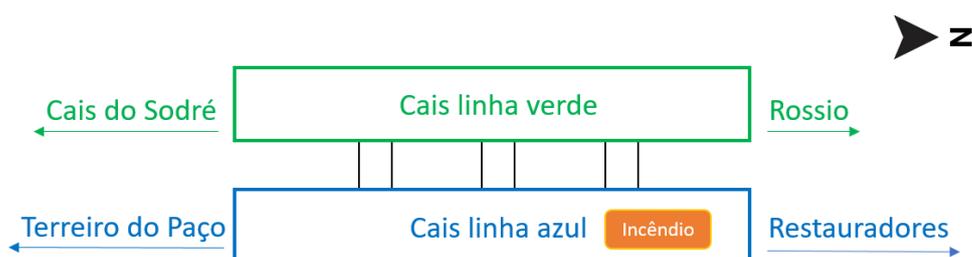


Figura 3.8 – Localização do incêndio utilizado na simulação

No FDS a produção de fumo, e consequentemente a visibilidade, são controlados pelo parâmetro “*soot yield*”, que corresponde à fração da massa do combustível que é convertida em fuligem, e que depende do tipo de material que vai ser consumido no incêndio. Por exemplo, este parâmetro corresponde a 0,015 kg/kg para o heptano, enquanto que para o poliuretano corresponde a 0,1 kg/kg. Importa, portanto, identificar os materiais presentes numa carruagem de metro típica para, em função disso, determinar a quantidade de fuligem que será produzida durante um incêndio. De acordo com o levantamento de informação efetuado por Bilge (2018), estudos anteriores identificaram os valores de “*soot yield*” apresentados no Quadro 3.4.

Quadro 3.4 – Valores de “*soot yield*” identificados em estudos anterior
[informação reunida em (Bilge, 2018)]

Tipo de carruagem	Ano	Soot Yield [kg/kg]	Referência
Metropolitano	2007	0,08	(Roh et al., 2009)
	2007	0,164	K. Kang
	2009	0,117	(Musluoglu, 2009)
Comboio de passageiros	2010	0,1	Michael Belinsky

Na parametrização do incêndio no programa de simulação considerou-se o heptano como sendo a fonte de combustível, por se tratar de um hidrocarboneto genérico presente no programa. Optou-se, no entanto, por atualizar o parâmetro “*soot yield*” para 0,117 kg/kg, uma vez que segundo Musluoglu (2009), que investigou as propriedades dos materiais presentes numa carruagem de metro típica, este valor representa uma boa estimativa para este parâmetro.

O sistema de controlo de fumo da rede do Metro de Lisboa é constituído por um conjunto de ventiladores, localizados em pontos estratégicos dos túneis que interligam as várias estações, e que funcionam em modo reversível, isto é, consoante a localização do potencial incêndio, podem funcionar em modo de insuflação, introduzindo ar novo no túnel, ou em modo de extração, retirando neste caso o fumo do incêndio. Este sistema é comandado à distância pelo posto de comando central. Em caso de avaria de algum dos ventiladores mais próximos da estação, poderão ser acionados outros ventiladores situados a montante ou a jusante da estação

em causa (isto é, situados noutras estações ou nos meios troços entre estações). A entrada em funcionamento destes ventiladores é ativada a partir do posto de comando central (António Valente, com. pess., 15 de setembro de 2021).

Neste estudo, tendo em conta a localização preconizada para o incêndio utilizado na simulação (Figura 3.8), considerou-se que a extração de fumo será feita pelos túneis de ligação às estações de Restauradores e Rossio, e que a insuflação de ar novo se fará através dos túneis de ligação às estações de Cais do Sodré e Terreiro do Paço. Estas extrações e insuflações de ar foram modeladas no *PyroSim* através de superfícies do tipo “*exhaust*” e “*supply*” respetivamente, tendo cada uma destas superfícies sido definida com um caudal volumétrico de 300 m³/s, de acordo com a informação disponibilizada pelo Metropolitano de Lisboa; considerou-se que após a atuação destas superfícies de extração e insuflação (de acordo com os tempos definidos nos cenários de incêndio simulado) as mesmas demoram 50 segundos a atingir o pico, pretendendo-se emular de forma aproximada o efeito de arranque dos ventiladores.

Tendo em conta que este estudo se foca no estudo da evacuação em cenário de incêndio da estação propriamente dita, e de forma a ser possível a simplificação do modelo, e rentabilização do tempo de processamento das simulações, não foi considerada toda a extensão dos túneis de ligação à rede do Metro de Lisboa (Figura 3.5), tendo sido considerados apenas os 20 metros iniciais de extensão nos túneis de ligação às Estações do Rossio, Cais do Sodré e Terreiro do Paço, e 50 metros de extensão no túnel de ligação aos Restauradores (por ser o mais próximo do foco de incêndio considerado, tendo-se verificado nas simulações uma maior acumulação de fumo no mesmo). Nos cenários de incêndio sem controlo de fumo foram anuladas as superfícies de extração e insuflação, tendo sido considerado na simulação que os túneis são abertos para o exterior, permitindo a entrada de ar e saída de algum do fumo do incêndio (simulando a sua propagação ao longo da extensão dos túneis).

A estação constitui um único compartimento corta-fogo, sendo ambos os pisos interligados por múltiplas aberturas horizontais, e sendo os dois lados das linhas interligados por várias galerias. Tendo em conta os testes feitos no âmbito deste trabalho, posicionando o foco de incêndio em diferentes localizações e níveis da estação, concluiu-se que a localização do incêndio teria pouca influência num estudo de evacuação, uma vez que o fumo rapidamente se espalha por todo o espaço da estação (caso não se considere a ativação do sistema de controlo de fumo – ver mais pormenor no capítulo 4.1); verificou-se que para um estudo de evacuação como o que se pretende desenvolver as maiores condicionantes serão a taxa de libertação de calor máxima, a existência ou não de um sistema de desenfumagem, e o momento de ativação do mesmo. Por este motivo optou-se por estudar apenas uma localização para o incêndio, variando os restantes parâmetros referidos.

3.2.3 Localização dos pontos de medição no modelo

Os resultados apresentados (capítulos 4 e 5) foram obtidos através do posicionamento de dispositivos de medição de densidade ótica de fumo, de temperatura e de FED (dose efetiva fracionária) no modelo de simulação de incêndio.

De forma a facilitar a leitura da relação entre o pontos medidos nos vários níveis da estação, foi utilizada uma referência baseada nas coordenadas do ponto de medição [representados por círculos pretos na Figura 3.9 (nível dos cais) e na Figura 3.10 (nível superior), ocorrendo uma variação no eixo do Y].

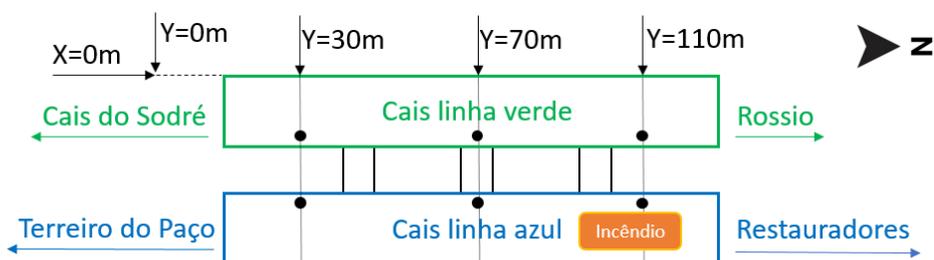


Figura 3.9 – Representação esquemática dos pontos de medição de temperatura e densidade ótica de fumo ao nível dos cais da estação (●)

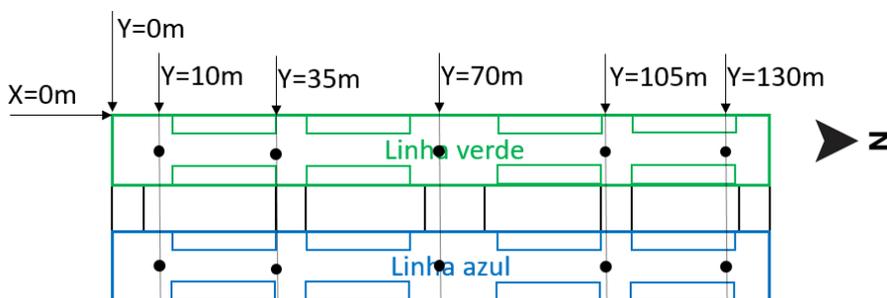


Figura 3.10 – Representação esquemática dos pontos de medição de temperatura e densidade ótica de fumo no nível superior da estação (●)

De forma equivalente, nos acessos que interligam o nível superior da estação à Rua do Crucifixo (Figura 3.11) e ao Largo do Chiado (Figura 3.12), foi igualmente usada como referência a variação no eixo do X.

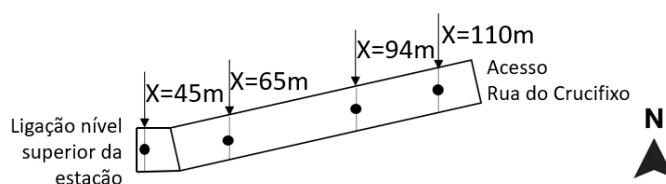


Figura 3.11 – Representação esquemática dos pontos de medição de temperatura e densidade ótica de fumo no acesso do nível superior da estação à Rua do Crucifixo

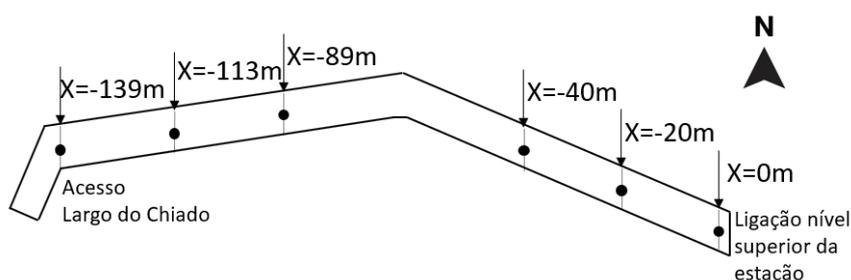


Figura 3.12 – Representação esquemática dos pontos de medição de temperatura e densidade ótica de fumo no acesso do nível superior da estação ao Largo do Chiado

3.2.4 Definição de cenários de incêndio

Foram considerados dois conjuntos de cenários de incêndio (Quadro 3.5), de acordo com os pressupostos referidos no capítulo 3.2.2. Ambos os cenários correspondem a um potencial incêndio numa carruagem parada no topo Norte do cais da Linha Azul, junto ao túnel que liga à estação dos Restauradores, um considerando uma taxa de libertação de calor máxima de 10 MW e outro mais gravoso com 20 MW.

Em cada conjunto de cenários efetuaram-se quatro simulações, uma considerando que o incêndio ocorre sem ativação do sistema de controlo de fumo da estação e, outras três, uma considerando uma atuação da desenfumagem rápida, após 150 segundos (2,5 minutos) do início do incêndio, outra considerando uma atuação da desenfumagem após 300 segundos (5 minutos) do início do incêndio, e por fim outra considerando uma atuação mais tardia da desenfumagem após 450 segundos (7,5 minutos) do início do incêndio. A definição destes cenários pretende, por um lado, analisar a influência da existência de um sistema de controlo de fumo nas condições de sustentabilidade da evacuação da estação e, por outro, efetuar um estudo de sensibilidade do momento de entrada em funcionamento da desenfumagem, de forma a utilizar estes resultados nos cenários de simulação de evacuação a desenvolver.

O tempo de simulação foi de 900 segundos (15 minutos) em todos os cenários, exceto no caso dos cenários INC.2.0 e INC.2.2, que foram os selecionados para utilizar nas simulações de evacuação com incêndio, onde o tempo de simulação considerado foi superior (2850 segundos

e 1800 segundos, respetivamente), de forma a permitir a integração dos resultados nas simulações de evacuação com situações de incêndio.

Quadro 3.5 – Caracterização dos cenários considerados na simulação de incêndio

Taxa de libertação de calor de pico	Designação do cenário	Tempo de atuação do sistema de controlo de fumo (após o início do incêndio)
10 MW	Cenário INC.1.0	Sem atuação
	Cenário INC.1.1	150 segundos
	Cenário INC.1.2	300 segundos
	Cenário INC.1.3	450 segundos
20 MW	Cenário INC.2.0	Sem atuação
	Cenário INC.2.1	150 segundos
	Cenário INC.2.2	300 segundos
	Cenário INC.2.3	450 segundos

3.3 Modelação de evacuação

3.3.1 Programa de simulação de evacuação

Para efetuar uma análise comparativa do tempo de evacuação da Estação de Metro Baixa-Chiado, em múltiplos cenários, variando o efetivo presente no edifício e variando algumas condições associadas à evacuação, utilizou-se um modelo de simulação de evacuação baseado em agentes, em que cada “indivíduo” apresenta características e estratégias de fuga individuais. As simulações foram efetuadas com recurso ao programa *Pathfinder*, desenvolvido pela *Thunderhead Engineering*. Por intermédio desta ferramenta computacional pretendeu-se estimar o tempo de evacuação do edifício, e verificar quais os pontos críticos de acumulação de efetivo a evacuar.

O *Pathfinder* é programa de simulação de evacuação baseado em agentes que, de acordo com o manual do programa (Thunderhead Engineering, 2021), tem dois modos de modelação do movimento de pessoas:

1. Modo SFPE, que implementa os conceitos do “*SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*” (SFPE, 2016) e do “*SFPE Engineering Guide: Human Behavior in Fire*” (SFPE, 2019), isto é, considera um modelo de fluxo, onde as velocidades de deslocamento são determinadas pela densidade de ocupantes dentro de cada espaço, onde o fluxo de pessoas nos vãos é controlado pela largura da porta e onde os ocupantes não se tentam evitar uns aos outros;
2. Modo de comportamento direcional (em inglês, “*steering mode*”) que assenta no conceito de comportamento direcional inverso. O conceito de comportamento direcional foi introduzido por Reynolds (1999) e corresponde a um conjunto de

diferentes comportamentos que são usados para gerir organicamente o movimento de um agente de inteligência artificial, nomeadamente comportamentos de como evitar obstáculos, seguir outro agente, ou funcionamento em grupo. Este conceito foi mais tarde evoluído para o comportamento direcional inverso (Ben Amor et al., 2006), permitindo que um comportamento mais complexo surja naturalmente como resultado dos algoritmos de movimento de pessoas, eliminando a necessidade explícita de filas na passagem de vãos ou de cálculos de densidade de ocupação.

Seguidamente serão abordadas as questões essenciais no funcionamento do programa, no que diz respeito à geometria, comportamento dos ocupantes, navegação, dos modos de cálculo do movimento dos ocupantes e ainda a integração de resultados de simulações de incêndio.

3.3.1.1. Geometria

Em termos geométricos o *Pathfinder* utiliza um modelo em três dimensões (Figura 3.13-A), sendo criada, no interior deste modelo, uma malha de navegação (em inglês, “*navigation mesh*”), que é constituída por triângulos adjacentes em duas dimensões (Figura 3.13-B). O movimento dos ocupantes ocorre nas fronteiras desta malha de navegação.

Como se observa na Figura 3.13, apenas são representadas as zonas de pavimento passíveis de serem preenchidas pelos ocupantes; as paredes, mobiliário e outras obstruções são simplesmente representadas de forma implícita como aberturas na malha de navegação. O programa permite a criação do modelo de raiz, ou a importação da geometria a partir de ficheiros do FDS, *PyroSim*, ou ainda a partir de ficheiros CAD ou IFC.

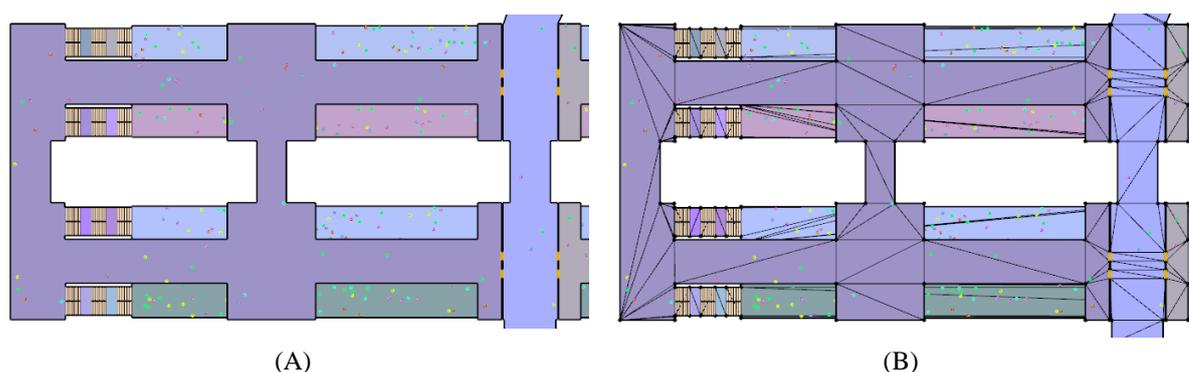


Figura 3.13 – Excerto do modelo de simulação de evacuação definido:
(A) – Geometria 3D / (B) Malha de navegação

A geometria do modelo é composta por compartimentos (em inglês, “*rooms*”) com dimensões e formas variadas, sendo que as fronteiras de cada compartimento não podem ser atravessadas pelos ocupantes. A passagem de um compartimento para outro apenas é possível através de portas de ligação. Uma porta que não sirva de ligação entre dois compartimentos e seja definida

na fronteira do modelo é considerada como uma porta de saída final, podendo ser definidas diversas portas de saída num modelo. Quando a simulação é feita no modo SFPE as portas atuam como principal mecanismo de controlo de fluxo de pessoas (detalhes no capítulo 3.3.1.3), enquanto no modo de comportamento direcional, as portas apenas registam o fluxo de ocupantes que passam de um compartimento para outro (sendo, por exemplo, possível a limitação a um fluxo máximo de pessoas). No modo SFPE quando um ocupante chega a uma porta de saída é criada uma fila de espera que vai sendo reduzida de acordo com o fluxo específico em função da densidade de ocupantes definido no modelo da SFPE (Figura 2.4). No modo de comportamento direcional (em inglês, “*steering mode*”), os ocupantes que chegam a uma porta de saída final são removidos da simulação imediatamente.

Cada localização presente na malha de navegação pode ser categorizada em quatro tipos diferentes de terreno: espaço aberto, escadas, portas de ligação ou portas de saída. As rampas e os compartimentos são ambos tratados como espaço aberto (eventuais obstruções são representadas como aberturas, conforme referido anteriormente). Cada tipo de terreno tem um efeito diferente nos ocupantes que ocupam aquela zona da malha de navegação.

As escadas fazem a ligação entre compartimentos localizados em níveis diferentes, sendo interligadas a estes através de duas portas de ligação, uma na base outra no topo. É possível parametrizar a largura, definir a possibilidade de serem utilizadas apenas num sentido ou em ambos, ou serem ativadas por eventos específicos. As escadas correspondem a áreas onde a velocidade máxima dos ocupantes é controlada por um cálculo específico, em função do modo de cálculo utilizado.

3.3.1.2. Comportamentos e objetivos

A cada ocupante é atribuído um comportamento, que define uma sequência de objetivos que devem ser alcançados na simulação. Existem dois tipos de objetivos principais no programa:

- **Espera** – onde o ocupante permanece imóvel até que um determinado evento ocorra, como por exemplo um atraso inicial no movimento (introduzindo na simulação a componente do tempo de pré-movimento), a espera por assistência na evacuação ou a espera enquanto um elevador se desloca para outro piso;
- **Procura de uma localização** – onde o ocupante se desloca para um determinado destino, seja um ponto intermédio, um compartimento, um elevador ou uma saída. O ocupante utiliza as ferramentas de navegação discutidas seguidamente no capítulo 3.3.1.3.

Existem ainda os objetivos instantâneos que ocorrem num único momento temporal, como por exemplo a alteração do comportamento de um ocupante ou a separação de outro ocupante numa evacuação assistida.

3.3.1.3. Navegação

Quando um ocupante tem um objetivo de procura por uma localização necessita de um plano em como chegar ao destino, um caminho a seguir, e uma forma de seguir o caminho contando com os obstáculos dinâmicos (isto é, os outros ocupantes).

Conforme referido anteriormente, o *Pathfinder* permite a utilização de dois modos de navegação: o modo SFPE e o modo de comportamento direcional (em inglês, “*steering mode*”).

➤ Planeamento do caminho

O planeamento do caminho (em inglês, “*path planning*”) é um processo que estabelece um plano para o ocupante se mover para uma determinada localização. Este planeamento tem em conta que podem existir múltiplos caminhos para chegar ao mesmo destino, com diferentes comprimentos, e com diferentes ocupações por outros ocupantes. Numa primeira abordagem, tendencialmente, poder-se-ia pensar que o melhor caminho é o mais curto. Na verdade, existem diversos fatores que podem levar a outra opção, que leve menos tempo a percorrer.

Cada ocupante utiliza os seguintes procedimentos para planear um caminho (repetindo os mesmos sequencialmente até que o objetivo final seja atingido):

1. Gerar uma lista de metas locais (em inglês “*local targets*”), como por exemplo atingir a porta de ligação ao compartimento adjacente, calculando o “custo” para cada meta local;
2. Escolher uma meta local com menor “custo”, baseado no conhecimento do compartimento local e do modelo no global, bem como das preferências do ocupante (definidas no seu comportamento);
3. Mover-se em direção à meta local através dos procedimentos de criar um caminho ou seguir um caminho.

A abordagem do programa a este problema consiste no conceito “*Locally Quickest*” (que poderá ser traduzido para “localmente mais rápido”), onde o caminho é planeado de forma hierárquica, tendo em conta a informação disponível no compartimento atual do ocupante, bem como um conhecimento global do edifício. É assumido que cada ocupante tem conhecimento de todas as portas existentes no seu compartimento, da sua distância a cada uma delas, bem como de eventuais congestionamentos que existam. Com esta informação o ocupante escolhe uma porta, baseado no “custo” do percurso até à mesma, e é criado um caminho até à porta, podendo o ocupante seguir para o compartimento seguinte.

O “custo” de cada meta local é definido tendo por base os seguintes princípios:

- **Tempo de movimento no compartimento local, t_{lt}** – Correspondendo ao tempo que o ocupante demora a atingir a meta local, à velocidade máxima, e ignorando os outros ocupantes;

- **Tempo de espera no compartimento local, t_q** – Se a meta local não for uma porta, o tempo de espera é nulo. Se for uma porta fechada, que não voltará a abrir, essa porta é excluída da análise. Se for uma porta fechada, que abrirá no futuro (por exemplo, a porta de um elevador ou uma porta com uma temporização associada), esse facto é tido em conta. Se for uma porta aberta, o tempo de espera é uma estimativa do tempo que o ocupante terá de permanecer na fila, tendo em conta a sua posição na fila, e o fluxo de passagem de pessoas observado.
- **Tempo de movimento global, t_{gt}** – Correspondendo ao tempo que o ocupante demora a mover-se da meta local até ao seu objetivo em curso (que por definição base deverá ser sair do edifício), à velocidade máxima, e ignorando os outros ocupantes. Se a meta local corresponder ao seu objetivo em curso, este valor é nulo;
- **Distância percorrida no compartimento, d_t** – Correspondendo à distância percorrida pelo ocupante desde que entrou no compartimento.

No programa, na parametrização das características de cada ocupante, é ainda possível definir os seguintes parâmetros:

- **Fator de custo do tempo de movimento no compartimento local, k_{lt}** – Fator associado ao tempo de movimento no compartimento local;
- **Fator de custo do tempo de espera no compartimento local, k_q** – Fator associado ao tempo de espera no compartimento local;
- **Fator de custo do tempo de movimento global, t_{gt}** – Fator associado ao tempo de movimento global;
- **Preferência pela porta mais recente, p** – Parâmetro que atribui ao ocupante a preferência pela porta escolhida mais recentemente. Este parâmetro ajuda a prevenir que os ocupantes alternem frequentemente entre metas locais;
- **Distância de penalização no compartimento local, k_{dd}** – Fator de custo correspondendo a uma duplicação da distância. Este fator faz aumentar o custo do tempo de movimento à medida que o ocupante avança no compartimento. Origina que os ocupantes prefiram portas com distâncias mais curtas, em vez de tempos mais curtos, sendo uma forma simplista de simular a fadiga dos ocupantes.

O custo de uma determinada meta local é calculado da seguinte forma (equações 3.2, 3.3 e 3.4):

$$Custo_{target} = \text{máximo}(p_d k_{lt} t_{lt} | k_{qh} k_q t_q) \quad (3.2)$$

Onde,

$$p_d = e^{k_{dd} d_t} \quad (3.3)$$

$$k_d = \frac{\log 2}{k_{dd}} \quad (3.4)$$

Na equação 3.2, o parâmetro k_{qh} será $1 - p$ para a porta mais recentemente escolhida como meta local, e 1 para as restantes.

Sempre que um ocupante entra num compartimento é escolhida uma porta utilizando o procedimento enunciado acima. A segunda escolha é definida de forma aleatória, por ocupante, entre 0 e 1 segundos depois. A terceira escolha, e escolhas subsequentes, ocorrem em intervalos de 1 segundo depois da segunda escolha de porta.

Os ocupantes apenas têm conhecimento das filas de espera e fluxos de saída no compartimento onde se encontram. Sempre que um ocupante entre num novo compartimento esta informação é atualizada, substituindo a anterior. Este procedimento funciona como uma prevenção do retrocesso dos ocupantes; quando um ocupante sai de um compartimento, utilizando uma determinada porta, fica comprometido com a rota escolhida, segundo o princípio de que a próxima porta que o ocupante irá selecionar não pode dar acesso a um compartimento onde este já tenha estado. Na eventualidade deste princípio eliminar todas as hipóteses de saída, então o procedimento de prevenção do retrocesso é desativado, sendo permitido ao ocupante selecionar qualquer porta.

➤ **Criação do caminho**

Depois de selecionada uma meta local, através do procedimento de planeamento do caminho, é necessário proceder à criação do caminho para chegar à meta (em inglês, “*target*”). O programa utiliza o algoritmo de busca A^* , proposto por Hart et al. (1968) e procede a uma triangulação através da malha de navegação. Deste procedimento resulta um caminho, representado por uma série de pontos nas fronteiras dos triângulos da malha de navegação, que constituem um caminho irregular. De forma a suavizar este caminho irregular, o programa utiliza uma variação da técnica conhecida como “*string pulling*” (Johnson, 2006). Este procedimento realinha os pontos de modo que o caminho resultante apenas seja curvo nos cantos das obstruções, mas garanta um afastamento a estas obstruções, correspondente pelo menos ao raio do ocupante.

A Figura 3.14 representa um exemplo deste procedimento onde são visíveis os pontos intermédios (em inglês “*waypoints*”), representados através de circunferências, e o caminho criado entre o ocupante e a saída, representado através de uma linha preta. Quando um ponto intermédio é gerado o programa elimina os pontos intermédios que se localizam numa linha reta entre este e o anterior, permitindo que sejam utilizados apenas os pontos intermédios onde ocorre uma mudança de direção.

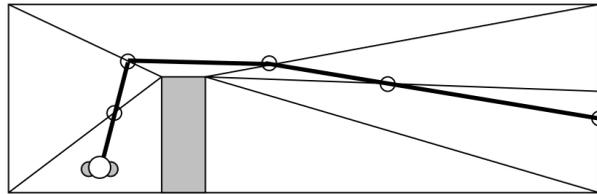


Figura 3.14 – Exemplo da criação de um caminho através de pontos intermédios
(Thunderhead Engineering, 2021)

➤ **Seguir um caminho**

Depois do caminho criado, o ocupante percorre os pontos intermédios do caminho através do seguinte procedimento:

1. São identificados dois pontos intermédios, o atual e o seguinte;
2. O ocupante verifica se o próximo ponto intermédio deve passar a ser o atual. O programa verifica se o ocupante cruzou uma linha infinita ligando o ponto intermédio atual com o ponto intermédio seguinte. Se a linha for cruzada, o ponto intermédio torna-se o atual e um novo ponto intermédio é determinado;
3. O ocupante verifica a necessidade de recalcular o caminho. Este novo cálculo do caminho é feito se os ocupantes não puderem ver uma linha reta para seu ponto intermédio atual ou se for o momento de reavaliar a escolha da porta atual de acordo com o procedimento “*locally quickest*” descrito acima;
4. Uma curva de ligação é gerada para definir o movimento desejado. No modo SFPE, esta curva é meramente um segmento de reta da posição atual ao ponto intermédio seguinte. No modo de comportamento direcional, este é uma curva “*B-spline* quadrática” usando a posição atual, o ponto intermédio e um ponto de controle que é projetado de volta ao longo da direção do ponto intermédio atual até o próximo ponto intermédio;
5. O ocupante tenta mover-se ao longo da tangente à curva de ligação atual. Este movimento é fortemente influenciado pelo modo de movimento selecionado (SFPE ou comportamento direcional), conforme discutido nos capítulos seguintes.

A Figura 3.15 exemplifica o procedimento descrito acima para os dois modos de navegação possíveis de utilizar no programa. As linhas verdes representam as curvas de ligação atuais para cada ocupante, enquanto os pontos e linhas vermelhas representam os pontos intermédios e caminhos seguintes. De notar que no modo SFPE as linhas de ligação são retas, em comparação com as linhas curvas, e mais próximas do movimento real das pessoas, do modo de comportamento direcional.

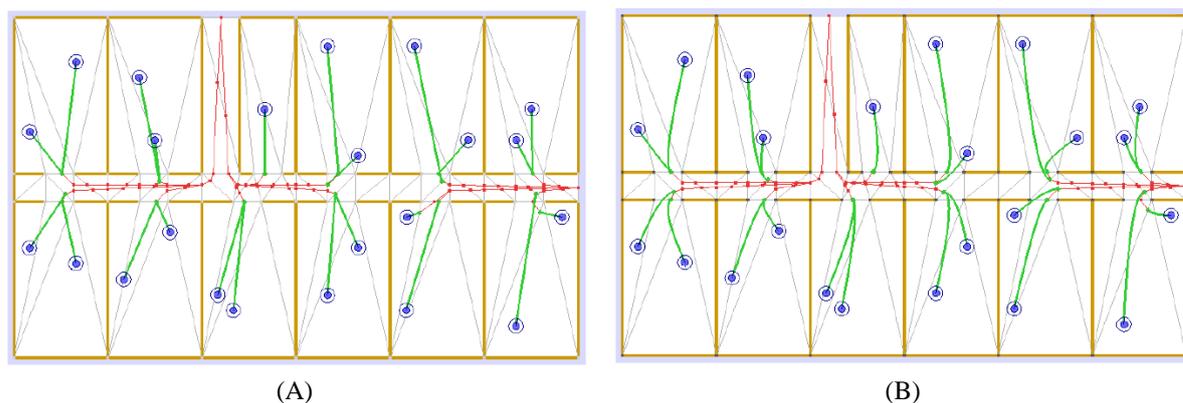


Figura 3.15 – Exemplo dos caminhos e pontos intermédios criados no *Pathfinder*:
 (A) no modo SFPE / (B) no modo de comportamento direcional
 (Thunderhead Engineering, 2021)

3.3.1.4. Modo SFPE

O *Pathfinder* permite o cálculo do movimento dos ocupantes através do Modo SFPE, em que são implementados os conceitos do “*SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*” (SFPE, 2016) e do “*SFPE Engineering Guide: Human Behavior in Fire*” (SFPE, 2019), isto é, considera-se um modelo de fluxo, onde as velocidades de deslocamento são determinadas pela densidade de ocupantes dentro de cada espaço, onde o fluxo de pessoas nos vãos é controlado pela largura da porta e onde os ocupantes não se tentam evitar uns aos outros.

No modo SFPE múltiplos ocupantes podem ocupar o mesmo ponto da superfície de navegação. Na sua parametrização são utilizados os seguintes parâmetros:

- **Densidade máxima do compartimento ($D_{m\acute{a}x} > 0$; valor referência = 3,55 pessoas/m²)** – Este parâmetro controla o máximo de ocupantes que podem entrar num compartimento. O programa utiliza esta densidade para determinar a velocidade de movimento e o fluxo de passagem pelas portas; quando os ocupantes chegam a uma fila para passar uma porta apenas podem avançar para o compartimento seguinte se a densidade de ocupação do mesmo estiver abaixo deste valor;
- **Camada fronteira (em inglês, “*boundary layer*”) ($BL \geq 0$)** – Este parâmetro controla a largura efetiva de cada porta, incluindo as “portas” associadas às escadas. A largura efetiva da porta é calculada através da equação 3.5, onde W é a largura da porta. A largura efetiva da porta controla o fluxo de pessoas que podem passar pela mesma.

$$W_{effective} = W - 2 \times BL \quad (3.5)$$

- **Fluxo de passagem na porta em alta densidade, usar um fluxo específico calculado (“on”/”off” ; valor de referência – “on”)** – Esta opção controla o cálculo do fluxo específico de passagem nas portas, em função da densidade. Quando ligada, o fluxo é calculado com base na densidade de ocupação dos compartimentos adjacentes;
- **Fluxo de passagem na porta em alta densidade, usar sempre o fluxo específico máximo (“on”/”off” ; valor de referência – “off”)** – Quando esta opção é ligada o fluxo de passagem nas portas é sempre o máximo.

➤ **Velocidade**

A velocidade (v) à qual um ocupante se move depende de vários fatores, nomeadamente da velocidade máxima (v_{max}), definida no programa para esse ocupante, do tipo de terreno em que este se encontra, de parâmetros de modificação da velocidade, associados ao terreno e da densidade de ocupação do compartimento em que se encontra.

A velocidade base (v_b) do ocupante é definida como uma função (equação 3.6) da densidade, do tipo de terreno e da fração da velocidade tendo em conta a curva da SFPE. Não são tidos em conta parâmetros de modificação da velocidade associados ao terreno e à densidade.

$$v_b = v_{max} \times v_f(D) \times v_{ft} \quad (3.6)$$

Onde $v_f(D)$ é uma fração da velocidade dada pela equação 3.7:

$$v_f(D) = \begin{cases} 1, & D < 0,55 \text{ pessoas/m}^2 \\ \max \left[v_{f,min} \times \frac{1}{0,85} \times (1 - 0,266D) \right], & D \geq 0,55 \text{ pessoas/m}^2 \end{cases} \quad (3.7)$$

Onde $v_{f,min}$ corresponde à fração mínima de velocidade definida pelo utilizador (valor de referência = 0,15) e D é a densidade de ocupação do compartimento atual.

v_{ft} é uma fração de velocidade que depende do tipo de terreno atravessado pelo ocupante, sendo definida de acordo com a equação 3.8:

$$v_{ft} = \frac{k}{1,4} \quad (3.8)$$

De acordo com o definido no “*SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*” (SFPE, 2016), para compartimentos e rampas $k = 1,4 \text{ m/s}$, para escadas o valor de k depende das características das escadas variando entre os seguintes valores [1,0 ; 1,08 ; 1,16 ; 1,23].

➤ Densidade

No modo SFPE a densidade é considerada como sendo uniforme em todo o compartimento, sendo dada pela equação 3.9, em função do número de ocupantes do compartimento (n_{person}), da área do compartimento (A_{room}) e da área da camada fronteira (A_{BL}):

$$D = \frac{n_{person}}{A_{room} - A_{BL}} \quad (3.9)$$

➤ Passagem através de portas

Neste modo de cálculo, o fluxo de passagem de pessoas através de uma porta de ligação entre dois compartimentos é implementado através de um temporizador de atraso, que controla a passagem de ocupantes através da porta.

Este temporizador encontra-se inicialmente a zero, sendo calculado o tempo de atraso, baseado no fluxo específico da porta, sempre que um ocupante passa pela mesma. O tempo de atraso é então adicionado e só depois deste decorrer é que outro ocupante poderá passar pela porta.

O fluxo específico para uma porta, considerando uma determinada direção, é dado pela equação 3.10, sendo um valor que depende da direção que os ocupantes estão a seguir, e o tipo de terreno à qual a porta está associada, conforme ilustrado na Figura 2.4.

$$F_s = (1 - 0,266 \times D) \times k \times D \quad (3.10)$$

3.3.1.5. Modo de comportamento direcional

No modo de comportamento direcional (em inglês, “*steering mode*”) o programa utiliza uma combinação de mecanismos de comportamento direcional e de controlo de colisões de forma a comandar a forma como o ocupante segue a curva de ligação entre os pontos de um caminho. Estes mecanismos permitem ao ocupante desviar-se do caminho inicial, mantendo a direção correta rumo ao seu objetivo.

➤ Velocidade

À medida que um ocupante se move ao longo de um caminho, o programa calcula a velocidade máxima modificada (v'_{max}), que depende da velocidade máxima (v_{max}) definida para cada ocupante e do espaçamento em relação aos outros ocupantes nas proximidades. O espaçamento em relação aos outros ocupantes é usado para estimar uma densidade de ocupação (D). Estes parâmetros são então utilizados para calcular a velocidade (v), descrita no modo SFPE, que se torna então na velocidade máxima modificada (v'_{max}).

No modo de comportamento direcional, os parâmetros $v_f(D)$ e v_{ft} , que são utilizados para calcular \dot{v}_{max} podem ser calculados de modo idêntico ao descrito no modo SFPE, ou ser definidos pelo utilizador, nos perfis dos ocupantes. Depois de calculada a velocidade máxima modificada (\dot{v}_{max}), a mesma é utilizada para o cálculo do vetor de velocidade.

➤ Aceleração

No cálculo do movimento a aceleração de um ocupante é dividida em múltiplos componentes, dependendo do vetor de velocidade calculado pelo sistema de comportamento direcional.

É calculada uma componente tangencial direta da aceleração de acordo com a equação 3.11:

$$a_{f,max} = \frac{v_{max}}{t_{accel}} \quad (3.11)$$

O tempo de aceleração (t_{accel}) é um parâmetro definido no perfil dos ocupantes (valor de referência = 1,1 segundos). Por sua vez, a componente tangencial inversa da aceleração e a componente radial da aceleração são dadas, respetivamente pelas equações 3.12 e 3.13, sendo estas componentes utilizadas para determinar o vetor de aceleração final.

$$a_{b,max} = 2 \times a_{f,max} \quad (3.12)$$

$$a_{r,max} = 1,5 \times a_{f,max} \quad (3.13)$$

➤ Densidade

Para determinar a densidade é utilizado o espaçamento entre o ocupante e os outros ocupantes nas proximidades, e o espaçamento longitudinal e lateral médios, conforme descrito por Fruin & Strakosch (1987), e representado na Figura 3.16.

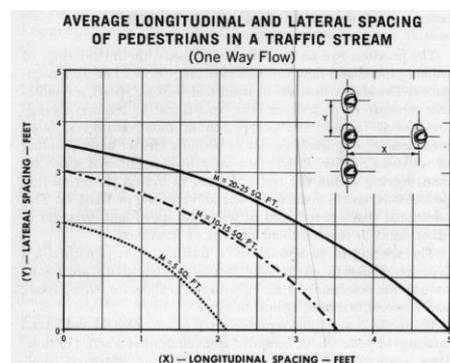


Figura 3.16 – Espaçamento médio longitudinal e lateral (Fruin & Strakosch, 1987), in Thunderhead Engineering, 2021)

➤ Comportamento direcional

O sistema de comportamento direcional permite aos ocupantes mover-se, seguindo as curvas de ligação dos caminhos criados (conforme descrito no capítulo 3.3.1.3) permitindo uma resposta a alterações que ocorram no ambiente à sua volta.

O comportamento direcional inverso, utilizado no *Pathfinder*, constitui um processo de avaliação, para cada ocupante, de um conjunto de direções de movimento possíveis (Figura 3.17) e a escolha da direção que minimiza uma função de custo.

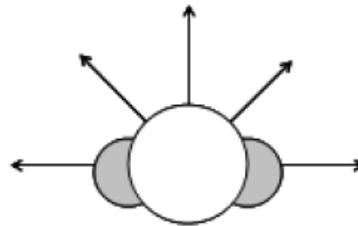


Figura 3.17 – Exemplo de direções possíveis no comportamento direcional inverso
(Thunderhead Engineering, 2021)

A função do custo é avaliada através da combinação de vários comportamentos direcionais de forma a produzir um custo.

Os comportamentos direcionais definidos no programa são: “*seek*”, “*idle separate*”, “*seek separate*”, “*seek wall separate*”, “*avoid walls*”, “*avoid occupants*”, “*pass*”, “*lanes*” e “*cornering*”. A maioria dos comportamentos atribui um custo entre 0 e 1 para cada direção analisada. O custo total de uma direção é uma soma ponderada desses valores.

- ***Seek* (C_{seek})** – Corresponde ao comportamento de procura de uma localização, e que movimenta o ocupante ao longo de uma curva de ligação num caminho.
- ***Idle separate* (C_{isep})** – Corresponde ao comportamento onde o ocupante mantém uma determinada distância dos outros ocupantes, quando está num estado parado. Este comportamento funciona de forma inversa ao sistema de comportamento direcional, isto é, antes de avaliar as direções possíveis, é calculado o vetor de movimento absoluto pretendido (direção e distância);
- ***Seek separate* (C_{ssep})** – Corresponde ao comportamento onde os ocupantes se espalham de forma a maximizar a velocidade do conjunto, calculada em função da curva de velocidade-densidade e da relação de espaçamento de Fruin (Figura 3.16);

- **Seek wall separate** (C_{swsep}) – Corresponde ao comportamento que permite aos ocupantes moverem-se de forma a manter uma determinada distância das paredes, de modo semelhante ao referido para a camada fronteira (em inglês, “*boundary layer*”) no modo SFPE;
- **Avoid walls** (C_{aw}) – Corresponde ao comportamento onde são detetadas as paredes nas proximidades e o ocupante é deslocado de forma a evitar colisões com as mesmas;
- **Avoid occupants** (C_{ao}) – Corresponde ao comportamento onde são detetados outros ocupantes nas proximidades e o ocupante é deslocando de forma a evitar colisões com os mesmos;
- **Pass** (C_{pass}) – Corresponde ao comportamento onde os ocupantes preferem deslocar-se atrás de outros ocupantes que se estejam a mover-se mais rapidamente;
- **Lanes** (C_{lanes}) – Corresponde ao comportamento onde os ocupantes se agrupam em fila quando detetam que estão em contra-fluxo com outros ocupantes;
- **Cornering** (C_{cnr}) – Corresponde ao comportamento dos ocupantes, quando integrados num grupo, fazem curvas mais largas, sem atalharem caminho em frente dos outros ocupantes do grupo.

O custo final da direção é dado pela equação 3.14, que conjuga os vários custos dos comportamentos direcionais referidos acima.

$$C_{ds} = 0,5 \times C_{seek} + w_{isep}C_{isep} + w_{ssep}C_{ssep} + w_{swsep}C_{swsep} + w_{aw}C_{aw} + w_{ao}C_{ao} + w_{pass}C_{pass} + w_{lanes}C_{lanes} + w_{cnr}C_{cnr} \quad (3.14)$$

Os parâmetros “w” correspondem aos fatores de ponderação de cada custo, em função do estado do ocupante (Quadro 3.6).

Quadro 3.6 – Fator de ponderação dos comportamentos direcionais em função do estado dos ocupantes (Thunderhead Engineering, 2021)

Fator de ponderação	Estado do ocupante = “Idle”/parado	Estado do ocupante = “Seeking”/a mover-se
w_{isep}	1	0
w_{ssep}	0	2
w_{swsep}	0	1
w_{aw}	1	1
w_{ao}	1	1
w_{pass}	0	0,5
w_{lanes}	0	1
w_{cnr}	0,2	0,2

➤ **Avaliação do movimento**

Depois de determinado o custo final da direção, são calculadas a velocidade e a aceleração às quais os ocupantes se irão mover.

Para além do custo de cada comportamento direcional, é também calculada a distância máxima (D_{max}) que o ocupante se deverá mover ao longo da direção amostrada. Esta distância máxima é então usada para determinar a velocidade desejada, \bar{v}_{des} , de acordo com a equação 3.15

$$\bar{v}_{des} = |\bar{v}_{des}| \times \bar{d}_{des} \quad (3.15)$$

Correspondendo \bar{d}_{des} ao menor custo da direção de amostra, e $|\bar{v}_{des}|$ é dado pela equação 3.16:

$$|\bar{v}_{des}| = \begin{cases} 0, & D_{max} \leq D_{stop} \\ v_{max} & D_{max} > D_{stop} \end{cases} \quad (3.16)$$

e onde,

$$D_{stop} = \frac{v_{curr}^2}{2a_{max}} \quad (3.17)$$

A aceleração é então calculada a equação 3.18, proposta por Reynolds (1999):

$$\bar{a} = \frac{\bar{v}_{des} - \bar{v}_{curr}}{|\bar{v}_{des} - \bar{v}_{curr}|} \times a_{max} \quad (3.18)$$

O método de Euler explícito é então usado para calcular a velocidade (\bar{v}_{next}) e a posição (\bar{p}_{next}) de cada ocupante para o próximo intervalo de tempo da simulação, através das equações 3.19 e 3.20.

$$\bar{v}_{next} = \bar{v}_{curr} + \bar{a} \times \delta_t \quad (3.19)$$

$$\bar{p}_{next} = \bar{p}_{curr} + \bar{v}_{next} \times \delta_t \quad (3.20)$$

Onde δ_t é a dimensão do intervalo de tempo e \bar{p}_{curr} é a posição atual

➤ **Conflitos de movimento entre ocupantes**

Em algumas situações pode existir um conflito entre os movimentos dos ocupantes, geralmente devido a limitações geométricas, nomeadamente quando surgem pontos de estrangulamento da passagem (como seja uma porta, um torniquete ou uma barreira de controlo de acessos) ou em situações onde ocorra um contra-fluxo na evacuação.

Na Figura 3.18 são visíveis dois exemplos de conflitos de movimento entre ocupantes (retirados de uma das simulações efetuadas no âmbito deste trabalho); os cilindros representam ocupantes, e a cor de cada um deles representa a direção que o mesmo está a seguir.

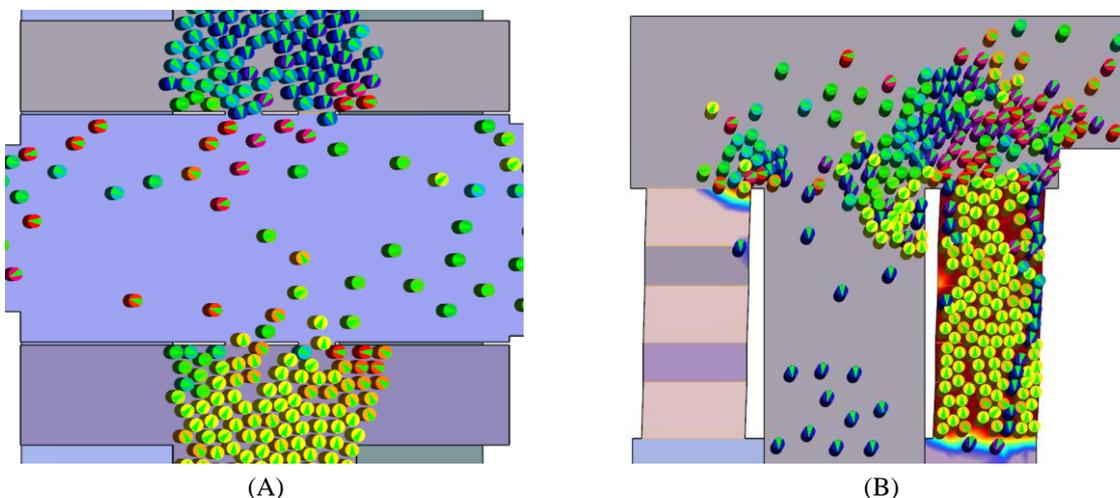


Figura 3.18 – Exemplo de conflitos de movimento entre ocupantes:
 (A) – Estrangulamento na largura de passagem / (B) Movimento em contra-fluxo

Nestas situações os ocupantes têm de negociar entre si uma forma para que se possam mover, de acordo com o seguinte procedimento:

1. O ocupante executa o seu comportamento direcional, conforme descrito anteriormente, e determina se o menor custo é permanecer imóvel ou mover-se no sentido contrário, devido à presença do outro ocupante;
2. O ocupante executa um teste “*free pass*” que avalia se o outro ocupante tem uma prioridade de movimento inferior (definida pelo utilizador) ou, tendo a mesma prioridade, se tem uma probabilidade maior de chegar primeiro ao ponto de interseção entre os caminhos dos dois ocupantes;
3. O ocupante recalcula o seu movimento com uma prioridade superior. Neste caso irá parecer ter uma prioridade superior quando estiver em conflito com outros ocupantes com o mesmo nível de prioridade de base, mas esta permanece inalterada se o ocupante em conflito já tiver uma prioridade de base superior;
4. Se o ocupante conseguir avançar com esta nova prioridade calculada então esta passa a ser temporariamente a sua prioridade (sendo ativado um temporizador). Adicionalmente é aplicado um fator de redução na dimensão do ocupante, permitindo-lhe “encolher” para passar por entre os outros ocupantes (se este ocupante for detetado pelos outros ocupantes, também estes irão reduzir o seu raio de forma a facilitar a passagem). Se não conseguir avançar passa para o passo seguinte;

5. Quando um ocupante eleva a sua prioridade é ativado um temporizador, se este temporizador tiver sido ativado o processo continua conforme indicado no ponto seguinte; caso não tenha sido ativado permanecem imóveis;
6. Se o tempo do temporizador ainda não tiver chegado ao fim, o ocupante permanece imóvel, com uma prioridade elevada, esperando que um dos outros ocupantes lhe ceda a passagem por via da sua prioridade elevada. Se o temporizador tiver chegado ao fim o processo passa para o ponto seguinte;
7. O ocupante permanece com a prioridade elevada e entra num estado em que consegue passar pelos ocupantes que estão no seu caminho.

3.3.1.6. Integração de resultados da simulação de incêndio

O *Pathfinder* possibilita a integração dos resultados da simulação de incêndio, efetuada com o FDS/PyroSim, no modelo de evacuação. Esta integração dos dados relativos ao incêndio permite incluir a influência do fumo no movimento de pessoas.

O programa considera que a velocidade máxima de movimento dos ocupantes começa a diminuir linearmente quando a visibilidade é de 3 metros, sendo reduzida até uma velocidade mínima de 0,2 m/s. Este processo é descrito pela equação 3.21, proposta por Fridolf et al. (2019).

$$w = \min(w_{smoke-free}; \max(0,2; w_{smoke-free} - 0,34 \times (3 - x))) \quad (3.21)$$

Onde,

w = A velocidade máxima de movimento de um ocupante na presença de fumo;

$w_{smoke-free}$ = A velocidade máxima de movimento de um ocupante em condições normais;

x = A visibilidade (em metros) na localização do ocupante, sendo este um resultado obtido através do FDS.

O *Pathfinder* efetua também o cálculo da dose efetiva fracionária (em inglês, “fractional effective dose” - FED), através das equações descritas por Purser & McAllister (2016), abordada no capítulo 2.1.5; esta implementação é semelhante à utilizada noutro programa de simulação de referência, o FDS+EVAC (Timo Korhonen, 2018), e tem em conta as concentrações do monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂) e oxigénio (O₂), de acordo com indicado na equação 3.22.

$$FED_{total} = FED_{CO} \times V_{CO_2} + FED_{O_2} \quad (3.22)$$

Este cálculo não inclui os efeitos do cianeto de hidrogénio (HCN) e o efeito do CO₂ corresponde apenas à hiperventilação; o dióxido de carbono não tem efeitos tóxicos em concentrações até 5%, mas estimula a respiração o que aumenta a taxa à qual os outros produtos da combustão são assimilados (Thunderhead Engineering, 2021), sendo o fator multiplicativo dado pela equação 3.23 (SFPE, 2016):

$$V_{CO_2} = \exp(0,1903 \times \%CO_2 + 2,0004) / 7,1 \quad (3.23)$$

Onde %CO₂ é a fração volúmica de CO₂ (v/v).

A fração de uma dose incapacitante de CO é calculada de acordo com a equação 3.24 (SFPE, 2016):

$$F_{ICO} = 3,317 \times 10^{-5} [CO]^{1,036} (V)(t) / D \quad (3.24)$$

Onde CO é a concentração de monóxido de carbono (ppm v/v 20 °C), V é o volume de ar inspirado por minuto (l/min), sendo o valor de referência considerado de 25 l/min (Quadro 3.7), t é tempo de exposição em minutos, e D corresponde à dose de exposição para a incapacitação (em percentagem de carboxi-hemoglobina / %COHb), sendo o valor de referência de 30% para uma atividade de “Trabalho leve – caminhar para fugir” (SFPE, 2016); a carboxi-hemoglobina corresponde à combinação de monóxido de carbono com a hemoglobina, que ocorre na intoxicação por monóxido de carbono e impede o sangue de transportar oxigénio.

Quadro 3.7 – Volume de ar inspirado em função do tipo de atividade desenvolvida (SFPE, 2016)

Tipo de atividade	Volume de ar inspirado (l/min)
Descansar ou dormir	8,5
Trabalho leve – caminhar para fugir	25
Trabalho pesado – corrida suave ou subir escadas	50

A fração de uma dose incapacitante por falta de oxigénio (hipoxia) é calculada de acordo com a equação 3.25 (SFPE, 2016):

$$FED_{O_2} = t / \exp[8,13 - 0,54(20,9 - \%O_2)] \quad (3.25)$$

Onde %O₂ é a fração volúmica de O₂ (v/v) e t é tempo de exposição em minutos.

O conceito da equação 3.25 tem como consequência permitir valores diferentes de zero mesmo quando as condições são seguras; por exemplo, considerando a concentração de 20,9% (nível do mar) obtém-se um valor de FED_{O_2} de 1,0 após 2,36 dias. De forma a evitar resultados enganadores, o *Pathfinder* permite ao utilizador definir o valor limite da hipoxia, sendo o valor base de referência de 19,5%. Este valor de referência de 19,5% é considerado como o limite inferior da concentração de oxigénio para condições de trabalho seguras (OSHA, 1995), ainda que, segundo Purser (2010), a maioria das pessoas consiga tolerar a hipoxia até cerca de 11% de oxigénio inspirado sem sofrer consequências graves.

Tendo em conta que as concentrações de monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂) e oxigénio (O₂) variam no tempo e no espaço, as equações referidas são integradas usando cada intervalo de tempo de exposição do ocupante para calcular a FED.

3.3.2 Caracterização do modelo utilizado

O modelo da estação foi criado no programa *Pathfinder* (Figura 3.19), tendo por base o modelo inicialmente criado no programa *PyroSim*, e que teve em conta as plantas da estação e de acordo com as dimensões referidas acima (Figuras 3.5 e 3.6).

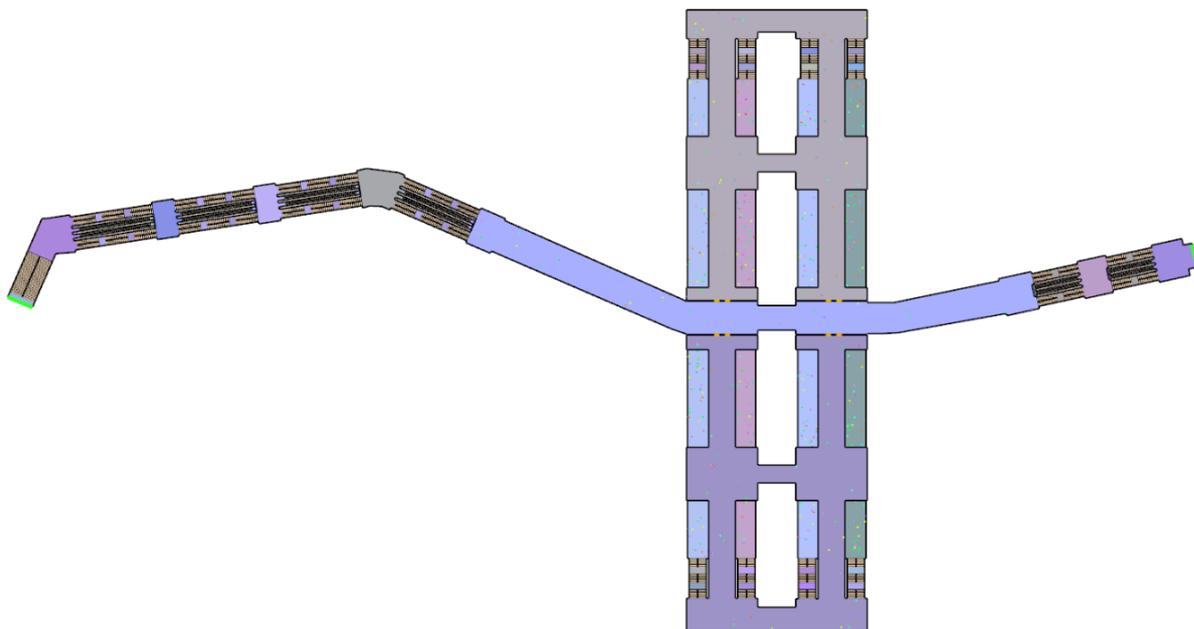


Figura 3.19 – Geometria da estação modelada no *Pathfinder* - vista superior

No topo de cada cais, interligando o mesmo com o nível superior, foi definida uma escada com 3,9 metros de largura (cada uma constituída por três troços, com patamares intermédios). Conforme descrito no capítulo 3.1.1, a ligação do nível superior da estação à superfície faz-se através de dois acessos, um que dá acesso à Rua do Crucifixo e outro ao Largo do Chiado.

O acesso à Rua do Crucifixo tem cerca de 75 metros de comprimento, vencendo um desnível de cerca de 10 metros, através de dois lanços de escadas duplos (cada um com cerca de 2,1 metros de largura útil, sendo constituído por dois troços, com um patamar intermédio); entre as duas escadas existe um conjunto de duas escadas rolantes.

O acesso ao Largo do Chiado tem cerca de 165 metros de comprimento, vencendo um desnível de cerca de 36 metros, através de quatro lanços de escadas duplos (cada um com cerca de 2,1 metros de largura útil, sendo constituído por três troços, com dois patamares intermédios) e um quinto lanço de escadas, já parcialmente ao ar livre, com cerca de 6 metros de largura útil; entre as duas escadas existe um conjunto de duas escadas rolantes. No modelo de simulação considerou-se também a existência das escadas rolantes referidas, tendo as mesmas sido definidas com 0,90 metros de largura, e sendo utilizadas em alguns dos cenários de evacuação (conforme definido no capítulo 3.3.3).

No nível superior existe uma zona central, a partir da qual é feito o acesso às duas linhas, existindo em cada lado dois conjuntos de barreiras de controlo de acessos, constituída por um conjunto de canais de validação de títulos, que permitem a passagem com a abertura de duas meias portas deslizantes. Cada conjunto é constituído por cerca de seis canais, cada um com uma largura útil de passagem média de cerca de 0,60 m; nas laterais existem ainda portas adicionais que em caso de emergência podem ser abertas, aumentando a largura de passagem disponível. A abertura destes canais e portas de emergência é comandada no local e à distância, a partir da bilheteira, do ponto de paragem do maquinista e do posto de comando central (António Valente, com. pess., 15 de setembro de 2021).

No decorrer deste estudo verificou-se que fazendo uma modelação detalhada de cada conjunto de canais de validação de títulos e portas emergência, cada um com uma largura reduzida, se obteria resultados irrealistas, com grandes tempos de estrangulamento neste ponto (mesmo com um número de ocupantes reduzido). Este facto é derivado dos algoritmos de cálculo da evacuação utilizados no programa, nomeadamente ao conceito de “*boundary layer*” abordado anteriormente (onde os ocupantes se irão mover de forma a manter uma determinada distância das paredes – esta distância é geralmente de 0,15 de cada lado, restando uma pequena dimensão para o ocupante passar nos canais de validação de títulos), e também aos comportamentos de seleção do caminho mais curto, e de manutenção dos afastamentos aos obstáculos.

Por este motivo, e de forma a tornar os resultados mais realistas, optou-se por modelar cada zona de barreiras de controlo de acessos através de duas passagens de largura equivalente (cada uma com 1,2 m de largura); optou-se por não modelar as portas adicionais por se considerar que as mesmas se encontram integradas nesta largura equivalente, e por se ter verificado que

esta é a solução que apresenta melhores resultados na distribuição uniforme das saídas existentes.

Em termos de população presente na estação considerou-se uma população mista, com uma distribuição de género e grupo etário média para a população da Área Metropolitana de Lisboa [de acordo com os dados da PORDATA (2011)], e que se considera ser representativa da população que utiliza a rede do Metropolitano de Lisboa, conforme indicados no Quadro 3.8.

Quadro 3.8 – Número de habitantes da Área Metropolitana de Lisboa, por género e grupo etário (PORDATA, 2011)

Género	Grupos etários [anos]							
	0-4	5-9	10-14	15-19	20-24	25-29	30-34	35-39
Masculino	73729	74836	75011	73231	75625	88938	108190	114027
Feminino	70817	71319	72169	70115	76072	93290	114913	120934
Género	Grupos etários [anos]							
	40-44	45-49	50-54	55-59	60-64	65-69	70-74	75 ou mais
Masculino	98098	91344	85225	81772	81319	69802	56343	87115
Feminino	105918	101609	97659	96580	95294	81961	70716	147905

Tendo em conta o local em análise e os períodos em que se prevê maior ocupação, considerou-se apenas as faixas etárias correspondentes à população ativa (entre os 15 anos e os 64 anos). Desta forma, as características da população considerada são as indicadas no Quadro 3.9. Em cada cenário de evacuação definir-se-á uma população para cada zona da estação, respeitando a distribuição percentual da população indicada.

Quadro 3.9 – Características da população considerada

Grupo etário	Género	Percentagem da população presente na estação [%]
< 30 anos	Masculino	13
	Feminino	13
> 30 anos	Masculino	22
< 50 anos	Feminino	24
> 50 anos	Masculino	13
	Feminino	15

A distribuição de pessoas será feita pelo programa, de forma aleatória, em cada uma das cinco zonas consideradas nos cenários de evacuação (dois cais da Linha Verde, dois cais da Linha Azul e nível superior da estação).

Para os diferentes géneros e grupos etários, consideram-se os valores sugeridos pela *International Maritime Organization* – IMO (2016), para as velocidades de movimento em vias horizontais e verticais, e indicados, respetivamente nos Quadros 2.2 e 2.9. Nas escadas rolantes (nos cenários em que as mesmas são utilizadas para a evacuação dos ocupantes), e tendo em conta que se pressupõe que as mesmas estariam na posição parada, foi introduzido um fator de correção de 75% da velocidade de forma a representar a dificuldade adicional de subida. As velocidades médias de subida obtidas após a aplicação deste fator corretivo são coerentes com os estudos de Okada et al. (2012), que identificaram que a velocidade média de subida numa escada rolante parada foi de 0,77 m/s para um único indivíduo, e que quando a subida é feita em grupo a velocidade média de subida foi de apenas 0,54 m/s.

Em termos de comportamento dos ocupantes, utilizou-se como base o comportamento pré-definido no programa “*Goto Any Exit*” em que os ocupantes selecionam a saída mais vantajosa para a evacuação (Thunderhead Engineering, 2021). Em alguns cenários, a fim de simular a evacuação de forma distribuída pelas saídas, isto é, considerando que parte dos ocupantes utiliza a saída da Rua do Crucifixo e a restante utiliza a saída do Largo do Chiado (à semelhança do indicado na sinalética de saída existente na estação), foram criados os comportamentos “*Goto Crucifixo*” e “*Goto Chiado*”, em que os ocupantes com este comportamento atribuído utilizam, respetivamente, a saída da Rua do Crucifixo ou a saída do Largo do Chiado. Nos cenários de evacuação com incêndio foi introduzido um atraso inicial no movimento dos ocupantes, correspondente ao tempo de pré-movimento.

Relativamente ao movimento dos ocupantes foi utilizado o modo de comportamento direcional (em inglês, “*steering mode*”) em todas as simulações de evacuação, uma vez que este reproduz de forma mais realista o comportamento dos ocupantes durante uma evacuação (conforme discutido no capítulo 3.3.1). A modelação do movimento através do modo de comportamento direcional permite recriar comportamentos que ocorrem durante um cenário de evacuação, como sejam a formação de filas, a prevenção de colisões com outros ocupantes ou a simulação de movimentos de peões.

De forma a validar esta opção foram efetuadas simulações em tudo idênticas aos cenários descritos no capítulo 3.3.3 (e cujos resultados são analisados em pormenor no capítulo 5), mas adotando uma modelação do movimento dos ocupantes através do modo SFPE. Verificou-se que em todos os cenários o tempo de movimento dos ocupantes foi sempre inferior ao obtido nas simulações com o modo de comportamento direcional, o que está de acordo com o descrito acima (isto é, o modo SFPE é mais simplificado e, portanto, apresenta valores inferiores).

No capítulo 5.7 são apresentados resultados para a simulação do cenário de evacuação mais gravoso que foi definido (cenário EVAC.9.0) utilizando o modo SFPE, de forma a comparar os resultados obtidos com os obtidos através do cálculo analítico efetuado com o modelo da NFPA130 e ainda com os resultados base da simulação efetuada com o modo de comportamento direcional.

3.3.3 Definição de cenários de evacuação

Com o propósito de efetuar uma análise comparativa do tempo de evacuação da estação, foram definidos nove conjuntos de cenários de evacuação, fazendo-se em cada um deles uma variação da ocupação das diversas zonas da estação, correspondendo a períodos temporais com diferentes densidades de ocupação, conjugados com a chegada de comboios em diferentes plataformas, conforme descrito no Quadro 3.10.

Nos períodos de baixa ocupação da estação considerou-se um índice de ocupação de 0,25 pessoas/m² em cada cais, nos períodos de ocupação média da estação considerou-se um índice de ocupação de 0,5 pessoas/m² em cada cais e nos períodos de ocupação elevada o índice de ocupação considerado em cada cais foi de 1,0 pessoas/m². Nos cenários em que se considera a chegada de um comboio a um determinado cais, o índice de ocupação considerado nesse cais foi de 3,0 pessoas/m².

Quadro 3.10 – Caracterização dos pressupostos de ocupação considerados em cada conjunto de cenários definidos para a simulação de evacuação da estação

Cenário	Descrição
EVAC 1."x"	Período de baixa ocupação da estação
EVAC 2."x"	Período de ocupação média da estação
EVAC 3."x"	Período de ocupação elevada da estação
EVAC 4."x"	Período de ocupação média da estação + chegada de um comboio no cais Este da Linha Azul
EVAC 5."x"	Período de ocupação média da estação + chegada de um comboio no cais Oeste da Linha Verde
EVAC 6."x"	Período de ocupação elevada da estação + chegada de um comboio no cais Este da Linha Azul
EVAC 7."x"	Período de ocupação média da estação + chegada de um comboio no cais Oeste da Linha Verde e de um comboio no cais Este da Linha Azul
EVAC 8."x"	Período de ocupação elevada da estação + chegada de um comboio no cais Oeste da Linha Verde e de um comboio no cais Este da Linha Azul
EVAC 9."x"	Chegada de quatro comboios (corresponde ao efetivo definido no RT-SCIE)

Nota: o "x" corresponde a cada um dos sub-cenários referidos no Quadro 3.12.

Tendo em conta os pressupostos definidos acima, foi definido o número de pessoas para cada um dos conjuntos de cenários de evacuação simulados, conforme indicado no Quadro 3.11.

Quadro 3.11 – Caracterização do número de pessoas presentes na estação em cada conjunto de cenários definidos para a simulação de evacuação da estação

Cenário	Número de pessoas presentes em cada zona da estação				Nível superior	Total [pessoas]
	Linha Verde		Linha Azul			
	Cais Oeste	Cais Este	Cais Oeste	Cais Este		
EVAC 1."x"	100	100	100	100	100	500
EVAC 2."x"	200	200	200	200	200	1000
EVAC 3."x"	400	400	400	400	200	1800
EVAC 4."x"	200	200	200	1200	200	2000
EVAC 5."x"	1200	200	200	200	200	2000
EVAC 6."x"	400	400	400	1200	200	2600
EVAC 7."x"	1200	200	200	1200	200	3000
EVAC 8."x"	1200	400	400	1200	200	3400
EVAC 9."x"	1200	1200	1200	1200	200	5000

Nota: o "x" corresponde a cada um dos sub-cenários referidos no Quadro 3.12.

Em cada conjunto de cenários efetuaram-se cinco simulações (sub-cenários), mantendo a população definida para esse conjunto de cenários, e variando alguns parâmetros, como a possibilidade e utilização das escadas rolantes, a imposição da evacuação ser feita pela saída do Largo do Chiado, para os ocupantes dos cais da Linha Verde e pela Rua do Crucifixo para os ocupantes dos cais da Linha Azul, e ainda a existência de um incêndio, conforme descrito no Quadro 3.12.

Quadro 3.12 – Caracterização dos sub-cenários considerados em cada conjunto de cenários definidos para a simulação de evacuação da estação

Cenário	Descrição
EVAC."y".0	Cenário base – Não é possível utilizar as escadas rolantes e os ocupantes podem utilizar qualquer uma das saídas
EVAC."y".1	Idem Cenário EVAC."y".0, sendo possível a utilização das escadas rolantes (que se consideram estar paradas)
EVAC."y".2	Idem Cenário EVAC."y".0, considerando que a evacuação dos cais da Linha Verde é feita para o lado do Largo do Chiado e que a evacuação dos cais da Linha Azul se faz para o lado da Rua do Crucifixo. No piso superior a evacuação faz-se para qualquer saída.
EVAC."y".3	Idem Cenário EVAC."y".0, considerando a existência de um incêndio na Linha Azul, com HRR máxima de 20 MW, e sem sistema de controlo de fumo [utilizando os resultados da simulação do cenário INC.2.0]
EVAC."y".4	Idem Cenário EVAC."y".3, considerando a existência de um sistema de controlo de fumo, atuado aos 300 segundos [utilizando os resultados da simulação do cenário INC.2.2]

Nota: o "y" corresponde a cada um dos conjuntos de cenários referidos no Quadro 3.10.

Os cenários EVAC.“y”.3 e EVAC.“y”.4 foram definidos de forma a se poder integrar na simulação de evacuação os dados obtidos na simulação de incêndio, e analisar o efeito dos mesmos na evacuação dos ocupantes.

O cenário EVAC.“y”.3 considera a existência de um incêndio na Linha Azul, com taxa de libertação de calor (HRR) máxima de 20 MW, e assume-se que o sistema de controlo de fumo não é ativado; este constitui o cenário de incêndio mais gravoso considerado, sendo por isso utilizado na análise. Por sua vez, o cenário EVAC.“y”.4 contempla a existência de um incêndio de iguais características, mas onde o sistema de desenfumagem é ativado aos 300 segundos da simulação. Na análise dos resultados da simulação de incêndio (ver capítulo 4.1) este demonstrou ser o momento limite para ativação do sistema de controlo de fumo (idealmente deveria ser ativado antes), uma vez que quanto mais tardia for esta ativação mais fumo se acumulará no nível superior, logo, maior exposição ao mesmo terão os ocupantes.

Considera-se também que, tendo em conta que a estação constitui um único compartimento de fogo, com inúmeras aberturas entre os pisos e entre as duas galerias principais, um potencial incêndio seria rapidamente identificado (presencialmente por um funcionário do Metro, ou remotamente através do sistema de videovigilância); depois desta identificação é feita a confirmação do incêndio, e são despoletadas as diversas ações previstas, entre elas a ativação da desenfumagem. A escolha do momento de ativação do sistema de controlo de fumo aos 300 segundos é também coerente com outros estudos desenvolvidos na área (*e.g.* Belinsky et al., 2010).

Na parametrização dos cenários EVAC.“y”.3 e EVAC.“y”.4 no *Pathfinder* foi introduzido um atraso inicial no movimento dos ocupantes, correspondente ao tempo de pré-movimento. Na definição deste atraso inicial foi utilizado o valor sugerido para gares de transporte, considerando que os ocupantes têm um nível intermédio de formação em segurança (Quadro 2.12), isto é, considerou-se um atraso inicial de 120 segundos no movimento dos ocupantes (que permanecem imóveis durante esta temporização).

Considerou-se que este tempo inclui uma parcela correspondente aos tempos de deteção e verificação, e eventualmente de saída dos ocupantes do comboio para a plataforma. Admitiu-se ser razoável, uma vez que a estação constitui um único compartimento corta-fogo, possuindo ambas as galerias principais diversas aberturas entre elas, tal como entre os dois níveis da mesma; por este motivo considera-se que haverá facilmente uma confirmação visual da veracidade do incêndio o que, conjugado com as mensagens difundidas pelo sistema de alarme por voz, reduzirá o tempo necessário ao início do movimento por parte dos ocupantes.

Esta opção, de não agravar em demasia o valor considerado para o tempo de movimento, corresponde ao sugerido por Olsson & Regan (2001) cujos estudos evidenciaram que os tempos de pré-movimento apresentados na literatura de referência (capítulo 2.1.3) tendem a ser muito conservadores em comparação com os intervalos de tempo registados; os autores indicam também que a existência de um sistema de alarme por voz potencia um tempo de pré-movimento inferior (considerou-se a existência deste sistema na estação em estudo).

Estes cenários pretendem analisar as condições de evacuação numa situação de emergência, incluindo situações de ocorrência de um incêndio, mas também verificar a capacidade adicional necessária para evacuação dos ocupantes quando entra um comboio (ou vários comboios) na estação, somando-se o efetivo já presente nas plataformas de embarque com aquele que vem dentro do metro.

Segundo a informação disponibilizada pelo Metropolitano de Lisboa, a capacidade máxima de cada comboio é de cerca de 800 pessoas, sendo considerado, no dimensionamento do efetivo máximo da Estação Baixa-Chiado, um total de 2400 pessoas (800 pessoas num comboio e 400 pessoas em cada cais). Verifica-se também que a estação tem algum efeito pendular nos movimentos entre Baixa-Chiado e Cais do Sodré e entre Baixa-Chiado e Santa Apolónia; significa que quando o comboio vem cheio de Cais do Sodré, irá com pouca capacidade de Baixa-Chiado para Cais do Sodré (António Valente, com. pess., 6 de fevereiro de 2022).

Por este motivo, considera-se que os cenários EVAC 9."x" são particularmente gravosos; considera-se também que estes cenários, apesar de possíveis do ponto de vista teórico, poderão não ocorrer na prática, tendo em conta a frequência entre comboios. No entanto, entendeu-se que os mesmos deveriam ser considerados neste estudo pois correspondem à densidade de ocupação prevista na regulamentação em vigor (*RT-SCIE*, 2008), correspondendo esta a uma condição limite de ocupação da estação.

3.4 Considerações finais

Neste capítulo foi caracterizado o objeto do estudo de evacuação que se levou a cabo, isto é, a estação Baixa-Chiado. Identificaram-se as suas principais características e condicionantes, como sejam a sua dimensão, a sua profundidade, o elevado número de passageiros que a utilizam e ser uma estação que serve duas linhas de metro.

Foi selecionado o programa de simulação de incêndio a utilizar (*FDS/Pyrosim*), e analisado o seu funcionamento. Foi feita uma caracterização do modelo utilizado, tendo sido feita uma descrição detalhada dos parâmetros adotados em cada uma das simulações, como seja, a taxa máxima de libertação de calor (em inglês, *Heat Release Rate* - HRR) ou a curva de incêndio t^2

que foi adotada. Foi identificado um parâmetro chave para a simulação do incêndio, isto é, a produção de fumo, e conseqüentemente a visibilidade que os ocupantes terão durante a evacuação. Foram definidos dois conjuntos de cenários de incêndio, variando a taxa de libertação de calor, e o momento de ativação do sistema de controlo de fumo, cujos resultados serão analisados e discutidos no capítulo 4.

Foi estabelecida a parametrização do modelo de evacuação utilizado nas simulações, incluindo as características geométricas da estação, da população (como o género e a idade) e também de comportamento. O funcionamento do programa de simulação de evacuação (*Pathfinder*) foi analisado em detalhe, tendo sido adotado o modo de comportamento direcional (em inglês, “*steering mode*”) nas simulações a desenvolver, por ser o modo de simulação onde o comportamento dos ocupantes mais se aproxima de uma situação real. Foi também definido um conjunto de cenários para as simulações de evacuação, cada um deles variando a ocupação das diversas zonas da estação (correspondendo a períodos temporais com diferentes densidades de ocupação, conjugados com a chegada de comboios em diferentes plataformas). Nestes cenários foram incluídas diversas situações, de forma a ser possível analisar a influência destas condicionantes na evacuação. Para além da ocorrência de um incêndio, pretendeu-se analisar a influência no tempo de evacuação da estação do número de ocupantes, da utilização das escadas rolantes, da escolha da saída e das características dos ocupantes (como seja o género ou o grupo etário). Os resultados serão analisados e discutidos no capítulo 5.

4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES DE PROPAGAÇÃO E DESENVOLVIMENTO DO INCÊNDIO

As simulações de incêndio foram desenvolvidas em dois conjuntos de cenários, um considerando a ocorrência de um incêndio com uma taxa de libertação de calor (HRR) máxima de 10 MW e outro com 20 MW. Considerou-se que as curvas de incêndio são do tipo t^2 , com uma taxa de crescimento rápido ($46,9 \text{ W/s}^2$), pelo que as mesmas atingem o seu pico, respetivamente aos 462 segundos e 654 segundos (Figura 4.1); depois de atingido o pico a HRR mantém-se constante durante o restante período da simulação.

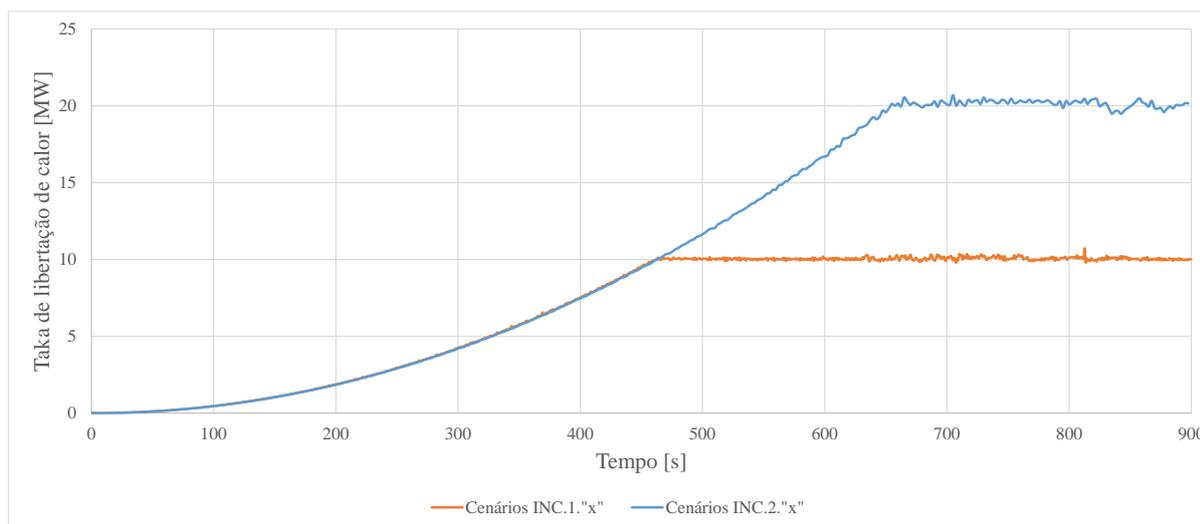


Figura 4.1 – Taxa de libertação de calor ao longo do tempo – Cenários INC.1."x" e INC.2."x"

Sendo o objetivo principal deste trabalho o estudo da evacuação em situação de incêndio, há que verificar os principais critérios de sustentabilidade para uma evacuação segura. Estes critérios estão relacionados com os limites acima dos quais poderá haver uma incapacitação dos ocupantes, ou no limite um efeito letal. Este tema foi explorado em maior detalhe no capítulo 2, mas optou-se por sistematizar os mesmos no Quadro 4.1.

A existência ou não de condições para uma evacuação segura, num cenário de incêndio, pode ser avaliada através da análise dos valores para a densidade ótica de fumo e temperatura à cota de 2 m do pavimento, nas diversas zonas da estação. Os efeitos dos gases e produtos da

combustão serão analisados através da dose efetiva fracionária (FED), conjuntamente com os resultados da simulação de evacuação, no capítulo 5.1

Quadro 4.1 – Sistematização dos critérios de sustentabilidade da evacuação

Critério	Valor de referência	Referência
Altura da camada de fumo	> 2 m	(Purser & McAllister, 2016)
Temperatura da camada de fumo	< 200 °C	(Purser & McAllister, 2016)
Temperatura na camada livre de fumo	< 60 °C	(Purser & McAllister, 2016)
Fluxo radiante sobre as pessoas	< 2,5 kW/m ²	(Purser, 2000)
Densidade ótica de fumo	< 0,15 m ⁻¹	(Jin, 2002)
Visibilidade	13 m	(Jin, 2002)
Teor de CO	< 1400 ppm (30 min)	(Purser & McAllister, 2016)
FED	< 0,3	(ISO, 2012)

Os resultados apresentados seguidamente foram obtidos através do posicionamento de dispositivos de medição de temperatura e densidade ótica de fumo no modelo de simulação de incêndio. De forma a facilitar a leitura da relação entre os pontos medidos nos vários níveis da estação, foi utilizada uma referência baseada nas coordenadas do ponto de medição (ver capítulo 3.2.3 para detalhes).

4.1 Análise dos resultados relativos à densidade ótica de fumo

Para o cenário INC.1.0, que considera a ocorrência de um incêndio com uma taxa de libertação de calor máxima de 10 MW, e que o sistema de controlo de fumo não é ativado, verifica-se que no cais da Linha Azul, à cota de 2 m do pavimento, a densidade ótica de fumo excede o valor de 0,15 m⁻¹ sensivelmente aos 200 segundos (Figura 4.2-A).

Este valor corresponde ao momento em que deixam de existir as condições de visibilidade necessárias para a evacuação. Este parâmetro aumenta de forma progressiva estabilizando em valores de cerca de 0,7 m⁻¹, na zona mais próxima do incêndio. Nas restantes zonas do cais da Linha Azul este limiar é excedido pouco depois dos 400 segundos. De igual modo, também nos cais da Linha Verde este valor é excedido aproximadamente aos 400 segundos (Figura 4.3-A).

Nos cenários em que o sistema de controlo de fumo é ativado, verifica-se a eficácia do mesmo na redução dos níveis da densidade ótica de fumo. Observa-se que quando a desenfumagem é ativada precocemente, aos 150 segundos após o início do incêndio, os níveis de densidade ótica de fumo são residuais, quer nos cais da Linha Azul (Figura 4.2-B), quer na Linha Verde (Figura 4.3-B).

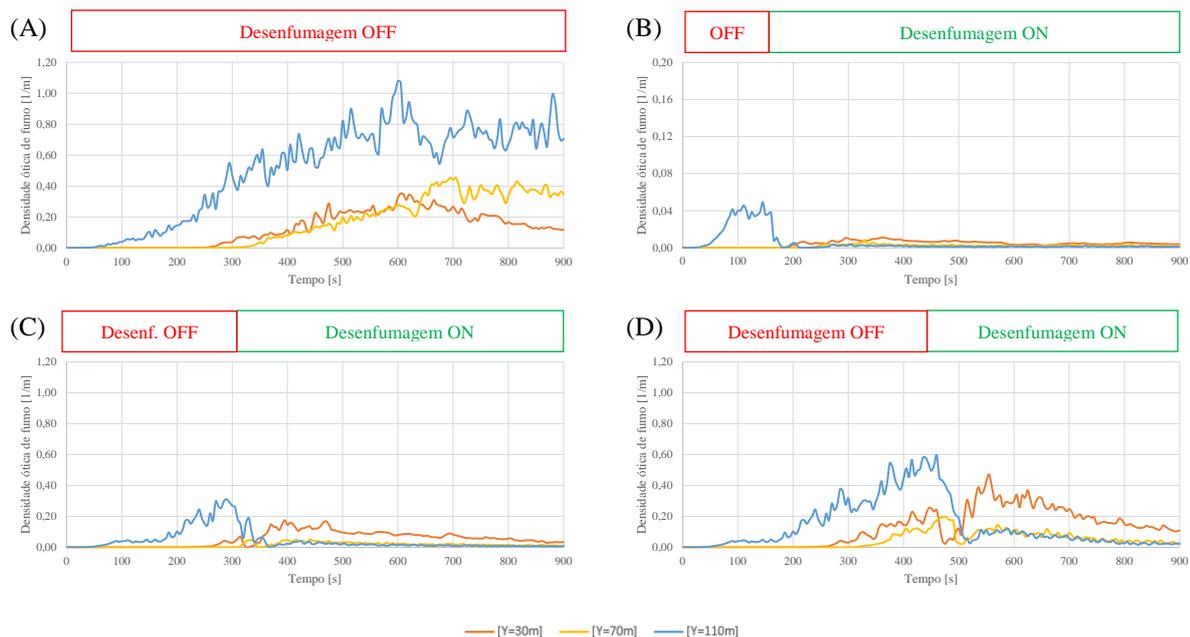


Figura 4.2 – Densidade ótica de fumo à cota de 2m do pavimento, ao nível dos cais da Linha Azul:
 (A) Cenário INC.1.0 / (B) Cenário INC.1.1 / (C) Cenário INC.1.2 / (D) Cenário INC.1.3

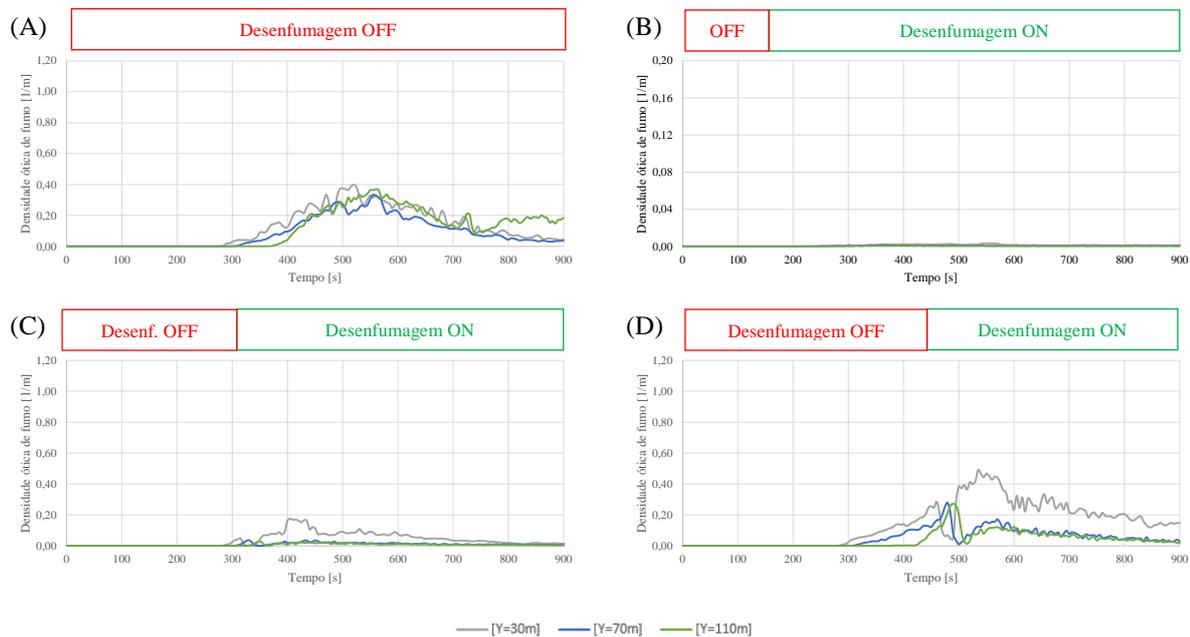


Figura 4.3 – Densidade ótica de fumo à cota de 2m do pavimento, ao nível dos cais da Linha Verde:
 (A) Cenário INC.1.0 / (B) Cenário INC.1.1 / (C) Cenário INC.1.2 / (D) Cenário INC.1.3

Por outro lado, quando a ativação da desenfumagem é mais tardia, aos 450 segundos após o início do incêndio, verifica-se que, quer nos cais da Linha Azul, quer nos cais da Linha Verde, é excedido o valor de referência para a densidade ótica de fumo. Consta-se também que após a entrada em funcionamento do sistema de desenfumagem este valor é reduzido de forma considerável nas zonas central e superior dos cais da Linha Azul (Figura 4.2-D) e da Linha Verde (Figura 4.3-D), enquanto que na zona mais afastada do incêndio ($Y=30\text{m}$), a densidade ótica de fumo aumenta drasticamente. Este fenómeno estará relacionado, por um lado, com o facto de a insuflação de ar ser feita na zona central da linha, ocorrendo uma abertura deste fluxo na zona central da estação, conjugado com a passagem de fumo do nível superior para inferior, o que explica o aumento da densidade ótica de fumo nesta zona; observa-se também que este valor será reduzido progressivamente.

No cenário INC.1.2, a desenfumagem é ativada 300 segundos após o início do incêndio, sendo este aquele de apresenta melhores resultados. A densidade ótica de fumo ultrapassa pontualmente o limiar dos $0,15\text{ m}^{-1}$, na zona do cais da Linha Azul mais próxima do incêndio (Figura 4.2-C), mas é reduzida para valores residuais após a entrada em funcionamento do sistema de controlo de fumo. À semelhança do referido anteriormente, após a entrada em funcionamento da desenfumagem observa-se um ligeiro aumento da densidade ótica de fumo na zona mais afastada do incêndio, em ambos os cais, reduzindo-se progressivamente ao longo do resto do tempo de simulação.

Em relação ao nível superior da estação observa-se que, de um modo geral, a densidade ótica de fumo apresenta valores superiores aos verificados no nível dos cais. No cenário INC.1.0, em que o sistema de controlo de fumo não é ativado, verifica-se que do lado da Linha Azul, à cota de 2 m do pavimento, a densidade ótica de fumo excede o valor de $0,15\text{ m}^{-1}$ sensivelmente aos 180 segundos (Figura 4.4-A), na zona mais próxima do incêndio. Este parâmetro aumenta de forma progressiva estabilizando em valores de cerca de $1,0\text{ m}^{-1}$, nas extremidades do piso, e $0,8\text{ m}^{-1}$, na zona mais central. De igual modo, também no lado da Linha Verde este valor é excedido por volta dos 300 segundos (Figura 4.5-A), aumentando de forma progressiva estabilizando em valores de cerca de $0,9\text{ m}^{-1}$.

Os cenários em que o sistema de controlo de fumo é ativado permitem demonstrar a eficácia deste sistema. Consta-se que quando a desenfumagem é ativada precocemente, aos 150 segundos após o início do incêndio, os níveis de densidade ótica de fumo ultrapassam pontualmente o valor de $0,15\text{ m}^{-1}$ na zona mais próxima do incêndio, reduzindo-se drasticamente após a entrada em funcionamento do sistema de controlo de fumo (Figura 4.4-B); no lado da Linha Verde este parâmetro apresenta valores residuais (Figura 4.5-B).

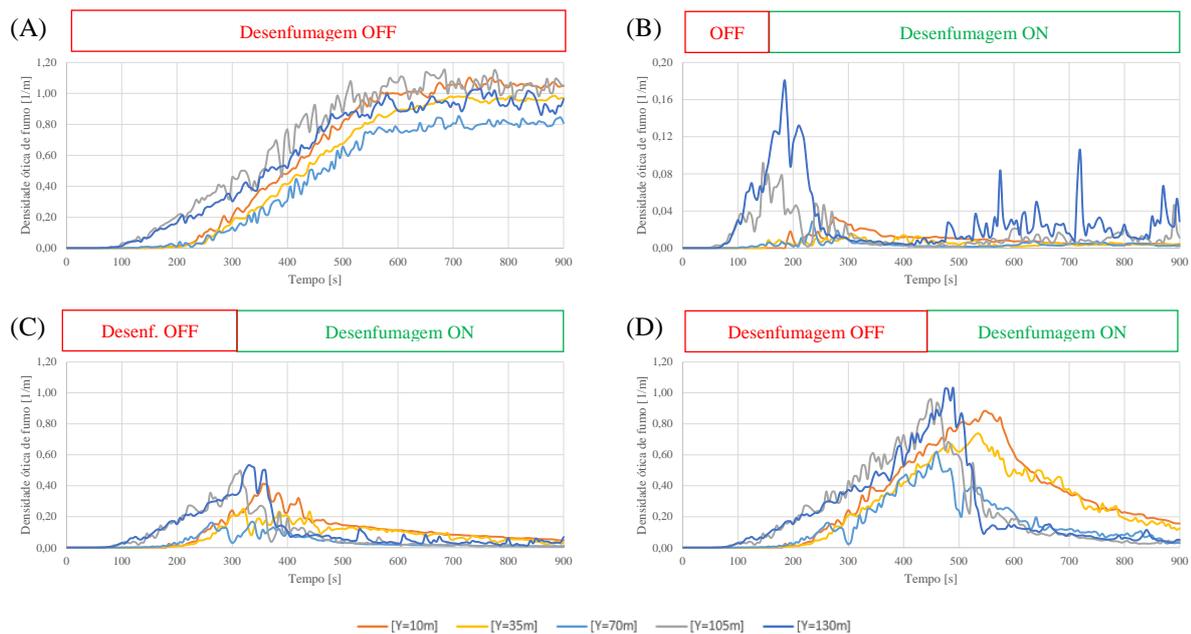


Figura 4.4 – Densidade ótica de fumo à cota de 2m do pavimento, no nível superior da Linha Azul:
 (A) Cenário INC.1.0 / (B) Cenário INC.1.1 / (C) Cenário INC.1.2 / (D) Cenário INC.1.3

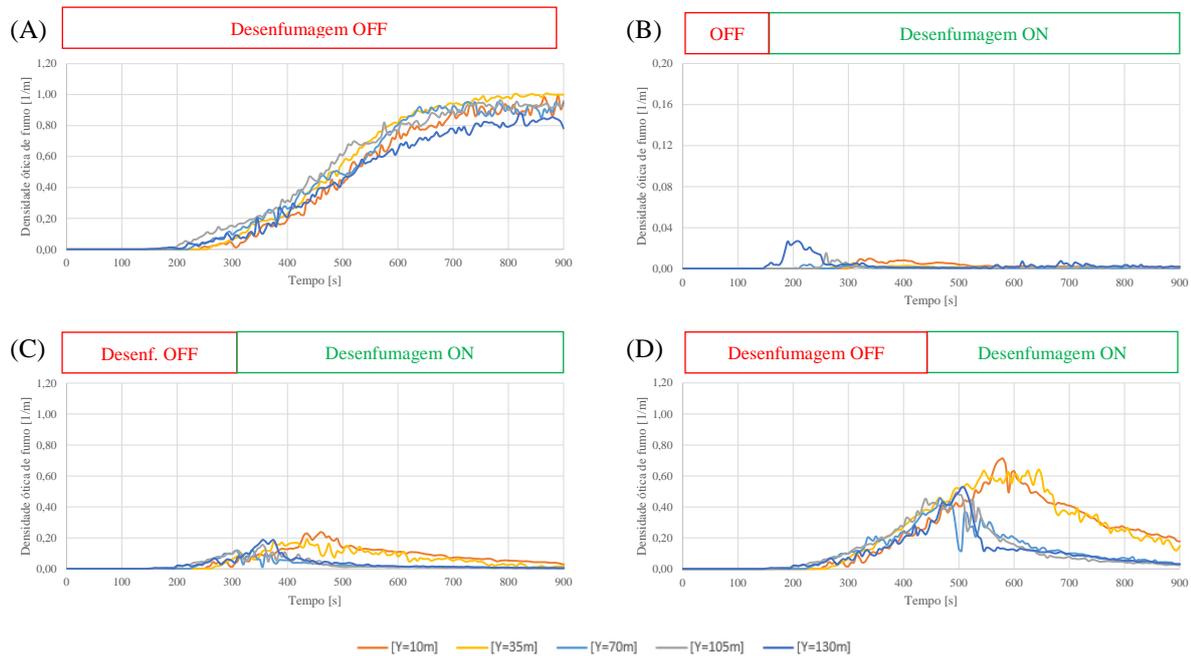


Figura 4.5 – Densidade ótica de fumo à cota de 2m do pavimento, no nível superior da Linha Verde:
 (A) Cenário INC.1.0 / (B) Cenário INC.1.1 / (C) Cenário INC.1.2 / (D) Cenário INC.1.3

De notar que, quando a ativação da desenfumagem é mais tardia, aos 450 segundos após o início do incêndio, o valor de referência para a densidade ótica de fumo é largamente excedido no nível superior. No momento de entrada em funcionamento do sistema de controlo de fumo este parâmetro é de cerca de $0,9 \text{ m}^{-1}$ no lado da Linha Azul (Figura 4.4-D) e de cerca de $0,4 \text{ m}^{-1}$ no lado da Linha Verde (Figura 4.5-D). Estes valores são progressivamente reduzidos, em particular nas zonas mais próximas dos pontos de extração de fumo, e mais lentamente nas zonas mais afastadas.

No cenário INC.1.2, em que a desenfumagem é ativada aos 300 segundos após o início do incêndio, verifica-se que a densidade ótica de fumo atinge valores de cerca de $0,50 \text{ m}^{-1}$ no lado da Linha Azul, e de $0,20 \text{ m}^{-1}$ no lado da Linha Verde, sendo ambos os casos consideravelmente reduzida após ativação do sistema de controlo de fumo, para valores inferiores a $0,15 \text{ m}^{-1}$ (Figura 4.4-C e Figura 4.5-C). À semelhança do referido anteriormente, após a entrada em funcionamento da desenfumagem observa-se um ligeiro aumento da densidade ótica de fumo na zona mais afastada do incêndio, em particular no lado da Linha Verde, reduzindo-se progressivamente ao longo do resto do tempo de simulação.

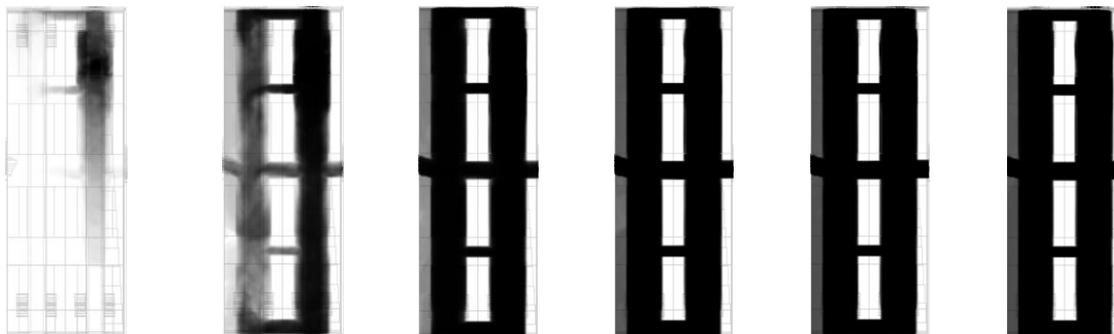
A Figura 4.6 representa a dispersão de fumo no nível superior da estação em 6 momentos chave da simulação (150, 300, 450, 600, 750 e 900 segundos), e permite analisar visualmente os fenómenos descritos nas figuras anteriores.

De um modo geral, observa-se que, em todos os cenários, aos 300 segundos da simulação, praticamente todo o nível superior está preenchido com fumo; com exceção do cenário INC.1.1, em que o sistema de controlo de fumo foi ativado aos 150 segundos e consegue retirar praticamente todo o fumo do incêndio, sendo este residual no nível superior da estação em todo o período de simulação.

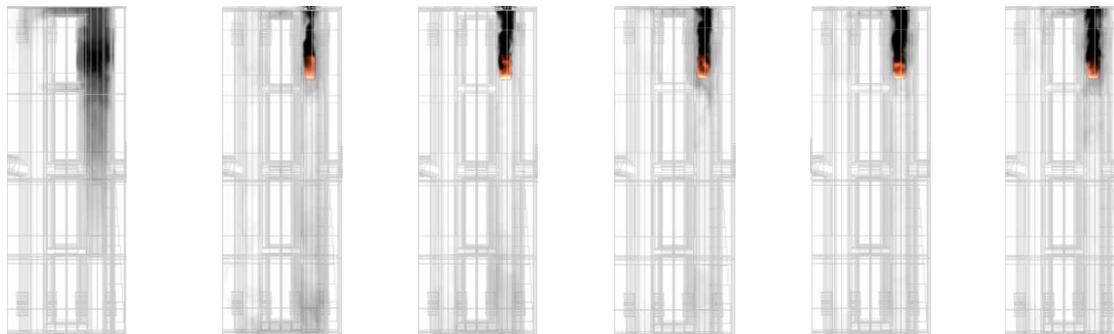
Relativamente ao cenário INC.1.2, em que a desenfumagem entra em funcionamento aos 300 segundos, observa-se que apesar de nesse momento o nível superior estar já bastante enfumado (principalmente no lado da Linha Azul), após a ativação do sistema ocorre uma redução progressiva do fumo no nível superior. Esta redução é também visível no cenário INC.1.4, mas de modo mais tardio.

Assim, verifica-se que idealmente o sistema de desenfumagem deverá ser ativado antes dos 300 segundos, uma vez que quanto mais tardia for esta ativação mais fumo se acumulará no nível superior, logo, maior exposição ao mesmo terão os ocupantes.

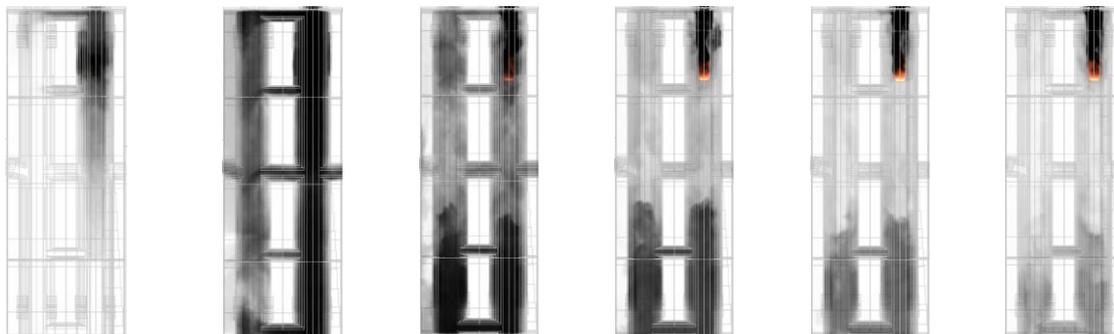
Cenário INC.1.0



Cenário INC.1.1



Cenário INC.1.2



Cenário INC.1.3



(A)

(B)

(C)

(D)

(E)

(F)

Figura 4.6 – Dispersão do fumo do incêndio no nível superior da estação – Cenários INC.1.”x”:
(A) aos 150 segundos / (B) aos 300 segundos / (C) aos 450 segundos / (D) aos 600 segundos / (E) aos 750 segundos / (F) aos 900 segundos

Relativamente às galerias de acesso, que interligam o nível superior da estação com o exterior, observa-se que no cenário INC.1.0, em que o sistema de controlo de fumo não é ativado, a densidade ótica de fumo, à cota de 2 m do pavimento da galeria de acesso à Rua do Crucifixo, excede o valor de $0,15 \text{ m}^{-1}$ sensivelmente aos 350 segundos na zona mais próxima da estação e aos 460 segundos na zona superior (Figura 4.7-A). Este parâmetro aumenta de forma progressiva estabilizando em valores de cerca de $0,8 \text{ m}^{-1}$.

No caso da galeria de acesso ao Largo do Chiado este limiar é excedido sensivelmente aos 370 segundos na zona mais próxima da estação e aos 500 segundos na zona superior (Figura 4.8-A). Este parâmetro aumenta de forma progressiva estabilizando em valores de cerca de $0,9 \text{ m}^{-1}$.

No cenário em que a ativação da desenfumagem ocorre aos 450 segundos após o início do incêndio, o valor de referência para a densidade ótica de fumo é também excedido em ambas as galerias de acesso ao exterior (Figura 4.7-D e Figura 4.8-D). No entanto, estes valores serão progressivamente reduzidos.

Nos cenários INC.1.1 e INC.1.2 os valores para a densidade ótica de fumo nas galerias de acesso ao exterior são residuais (Figura 4.7-B,C e Figura 4.8-B,C), demonstrando a eficácia do sistema, quando atuado de forma célere.

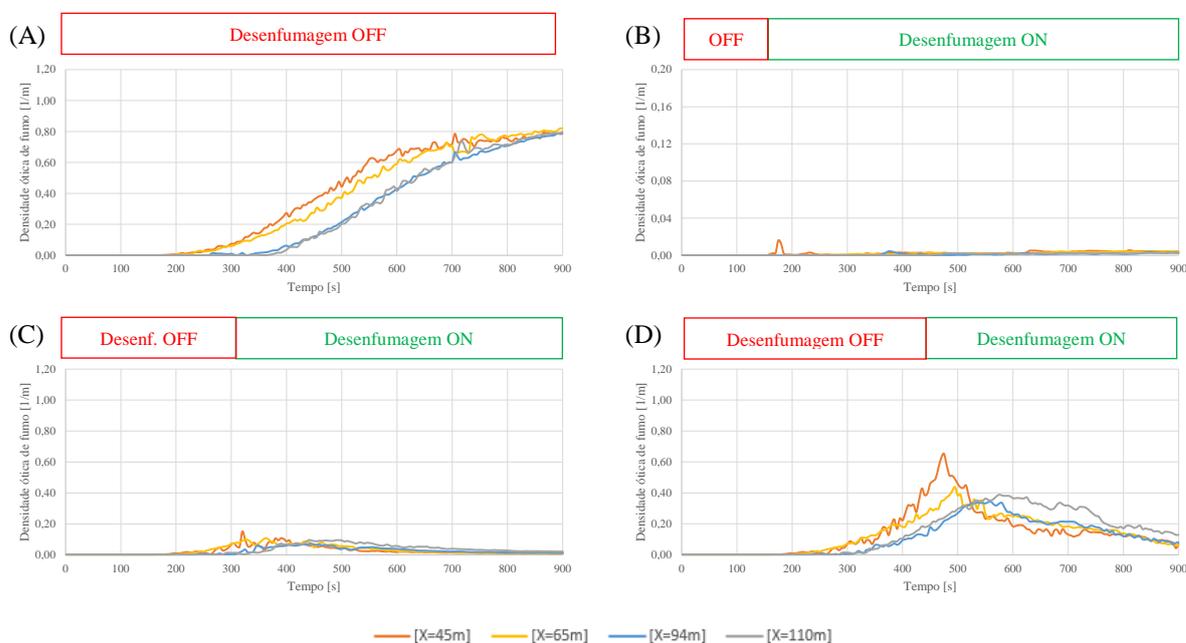


Figura 4.7 – Densidade ótica de fumo à cota de 2m do pavimento, no acesso da Rua do Crucifixo: (A) Cenário INC.1.0 / (B) Cenário INC.1.1 / (C) Cenário INC.1.2 / (D) Cenário INC.1.3

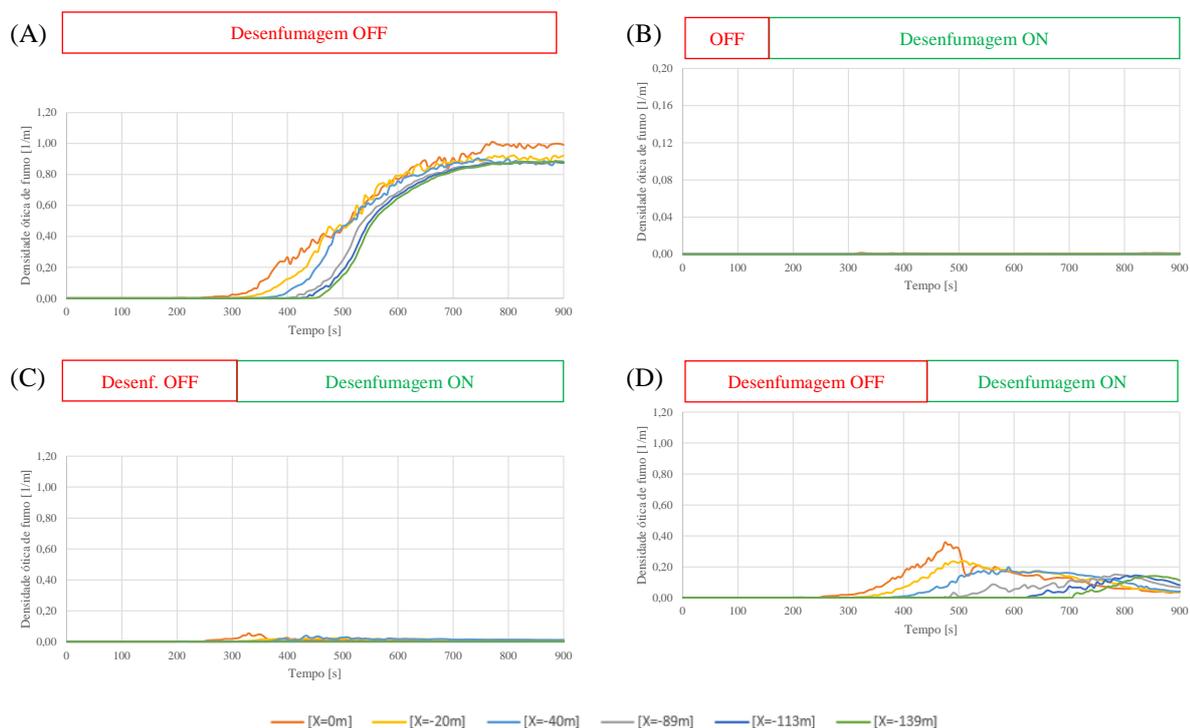


Figura 4.8 – Densidade ótica de fumo à cota de 2m do pavimento, no acesso do Largo do Chiado:
 (A) Cenário INC.1.0 / (B) Cenário INC.1.1 / (C) Cenário INC.1.2 / (D) Cenário INC.1.3

Analisando os resultados obtidos para os cenários INC.2.0, em que ocorre um incêndio com uma taxa de libertação de calor máxima de 20 MW, e o sistema de controlo de fumo não é ativado, verifica-se que no cais da Linha Azul, à cota de 2 m do pavimento, a densidade ótica de fumo excede também o valor de $0,15 \text{ m}^{-1}$ sensivelmente aos 200 segundos (Figura 4.9-A), correspondendo também este ao momento em que deixam de existir as condições de visibilidade necessárias para a evacuação.

Este parâmetro aumenta de forma progressiva estabilizando em valores de cerca de $1,0 \text{ m}^{-1}$, na zona mais próxima do incêndio. Nas restantes zonas do cais da Linha Azul este limiar é excedido pouco depois dos 400 segundos. De igual modo, também nos cais da Linha Verde este valor é excedido por volta dos 400 segundos (Figura 4.10-A).

De forma análoga ao caso anterior, nos cenários em que o sistema de controlo de fumo é ativado, verifica-se a eficácia do mesmo na redução dos níveis da densidade ótica de fumo (Figura 4.9-B,C,D e Figura 4.10-B,C,D).

4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES DE PROPAGAÇÃO E DESENVOLVIMENTO DO INCÊNDIO

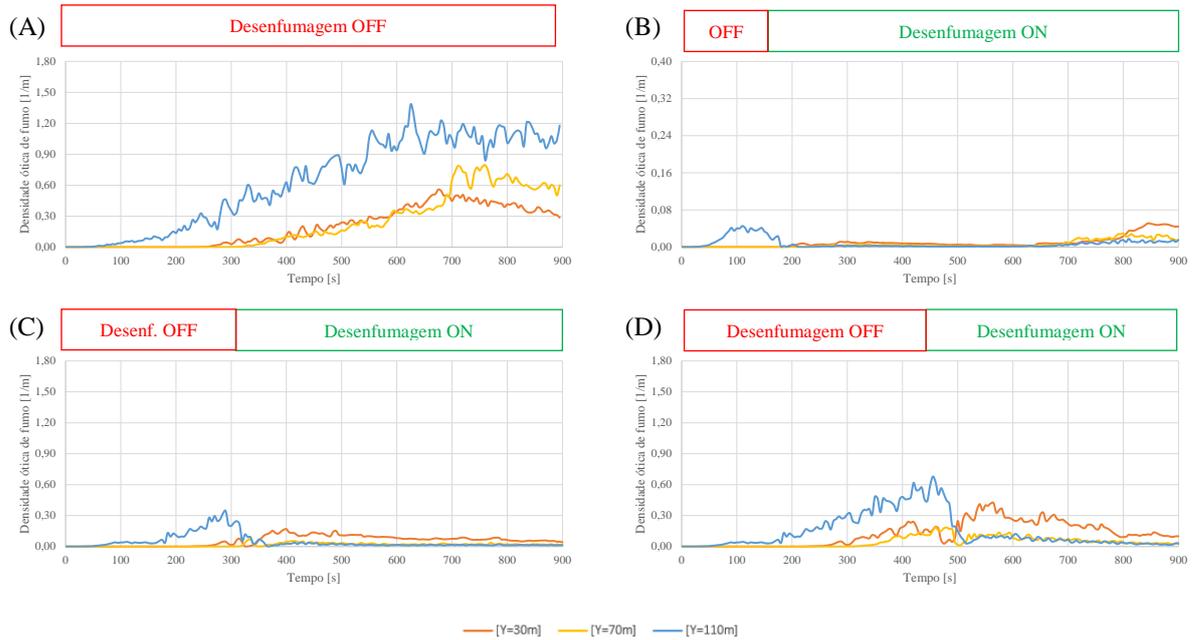


Figura 4.9 – Densidade ótica de fumo à cota de 2m do pavimento, ao nível dos cais da Linha Azul: (A) Cenário INC.2.0 / (B) Cenário INC.2.1 / (C) Cenário INC.2.2 / (D) Cenário INC.2.3

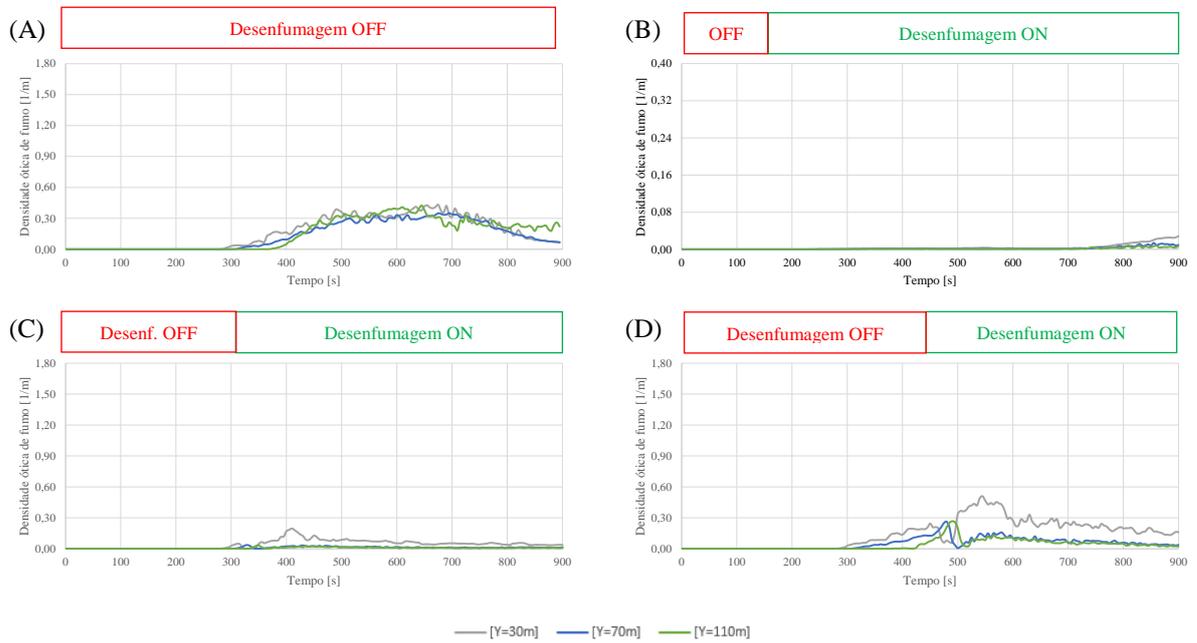


Figura 4.10- Densidade ótica de fumo à cota de 2m do pavimento, ao nível dos cais da Linha Verde: (A) Cenário INC.2.0 / (B) Cenário INC.2.1 / (C) Cenário INC.2.2 / (D) Cenário INC.2.3

No que diz respeito ao nível superior da estação observa-se que, em geral, a densidade ótica de fumo apresenta valores superiores.

No cenário INC.2.0, em que o sistema de controlo de fumo não é ativado, verifica-se que no lado da Linha Azul, à cota de 2 m do pavimento, a densidade ótica de fumo excede o valor de $0,15 \text{ m}^{-1}$ sensivelmente aos 180 segundos (Figura 4.11-A), na zona mais próxima do incêndio. Este parâmetro aumenta de forma progressiva estabilizando em valores de cerca de $1,5 \text{ m}^{-1}$, nas extremidades do piso, e $1,2 \text{ m}^{-1}$, na zona mais central.

De igual modo, também no lado da Linha Verde este valor é excedido por volta dos 300 segundos (Figura 4.12-A), aumentando de forma progressiva estabilizando em valores de cerca de $1,4 \text{ m}^{-1}$. Em ambos os casos, os valores em que a densidade ótica de fumo estabiliza são bastante superiores ao do cenário INC.1.0.

À semelhança do caso anterior, nos cenários em que o sistema de controlo de fumo é ativado, verifica-se a contribuição do mesmo na redução dos níveis da densidade ótica de fumo (Figura 4.11-B,C,D e Figura 4.12-B,C,D).

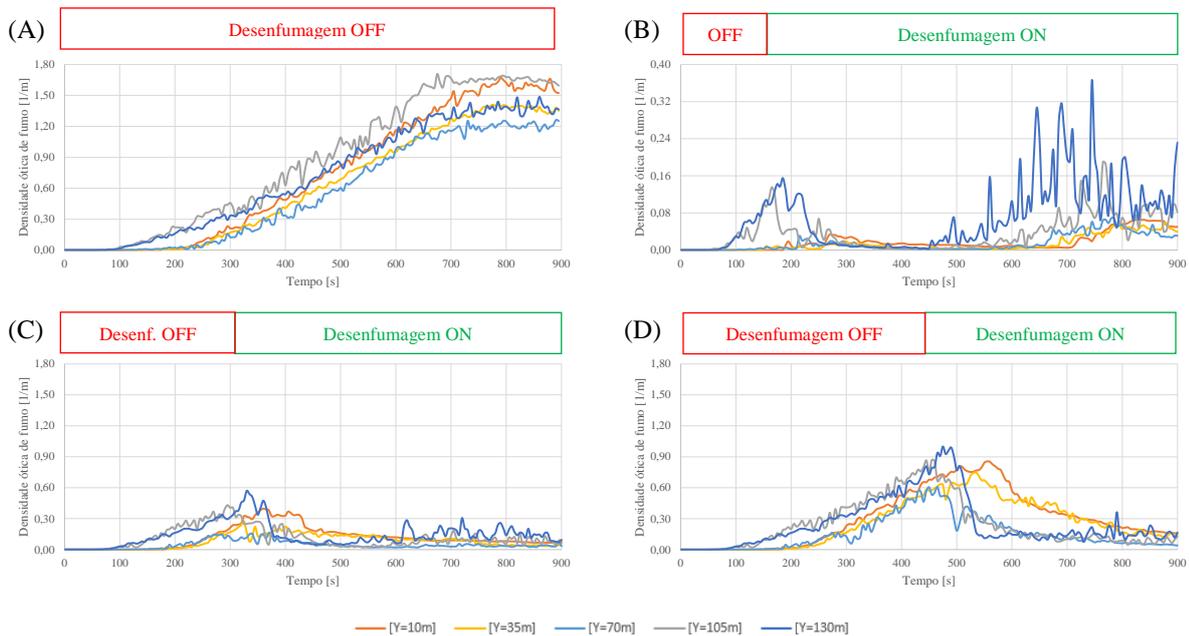


Figura 4.11 – Densidade ótica de fumo à cota de 2m do pavimento, no nível superior da Linha Azul: (A) Cenário INC.2.0 / (B) Cenário INC.2.1 / (C) Cenário INC.2.2 / (D) Cenário INC.2.3

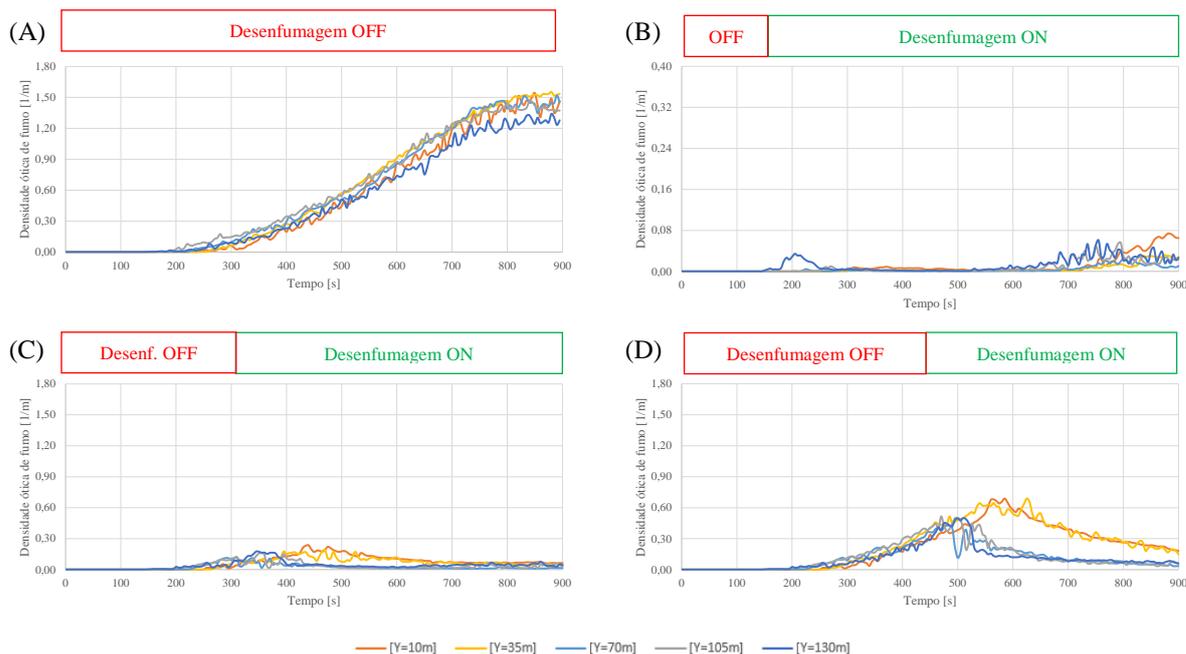


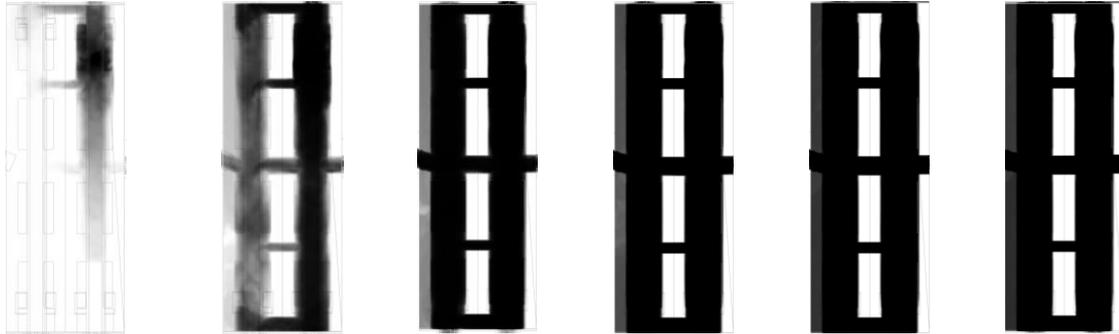
Figura 4.12 – Densidade ótica de fumo à cota de 2m do pavimento, no nível superior da Linha Verde:
 (A) Cenário INC.2.0 / (B) Cenário INC.2.1 / (C) Cenário INC.2.2 / (D) Cenário INC.2.3

A Figura 4.13 representa a dispersão de fumo no nível superior da estação em 6 momentos chave da simulação (150, 300, 450, 600, 750 e 900 segundos), e permite representar visualmente os fenómenos descritos nos gráficos das figuras anteriores.

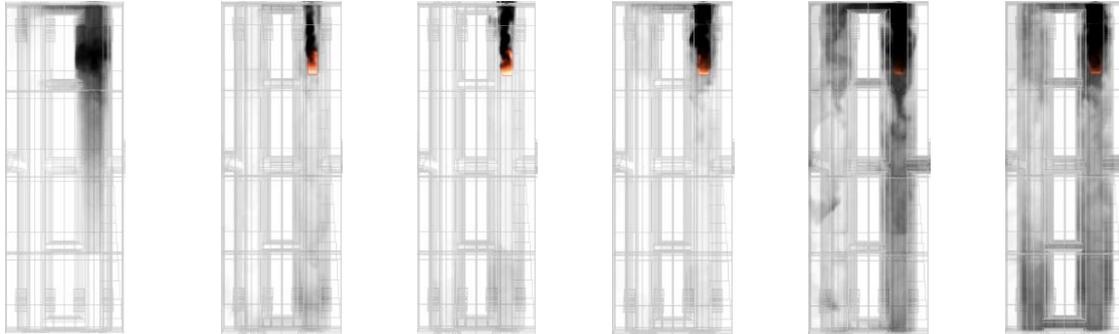
Tal como se verificou para os cenários 1.”x” (Figura 4.6), observa-se que aos 300 segundos da simulação, praticamente todo o nível superior está preenchido com fumo; exceto no cenário INC.2.1, em que o sistema de controlo de fumo foi ativado aos 150 segundos. Como principal diferença em relação ao cenário INC.1.1, uma vez que neste caso a taxa de libertação de calor do incêndio é superior, verifica-se que a partir dos 750 segundos (já após o incêndio ter atingido a sua HRR de pico) começa a haver alguma acumulação de fumo no nível superior, ainda que continue a ser em quantidades reduzidas.

Assim, verifica-se que idealmente o sistema de desenfumagem deverá ser ativado antes dos 300 segundos, uma vez que quanto mais tardia for esta ativação mais fumo se acumulará no nível superior, logo, maior exposição ao mesmo terão os ocupantes. Por este motivo o cenário INC.2.2 foi selecionado para integração nos cenários EVAC.”y”.4, conforme descrito em pormenor no capítulo 3.3.3. A escolha do momento de ativação do sistema de controlo de fumo aos 300 segundos é também coerente com outros estudos desenvolvidos na área (*e.g.* Belinsky et al., 2010).

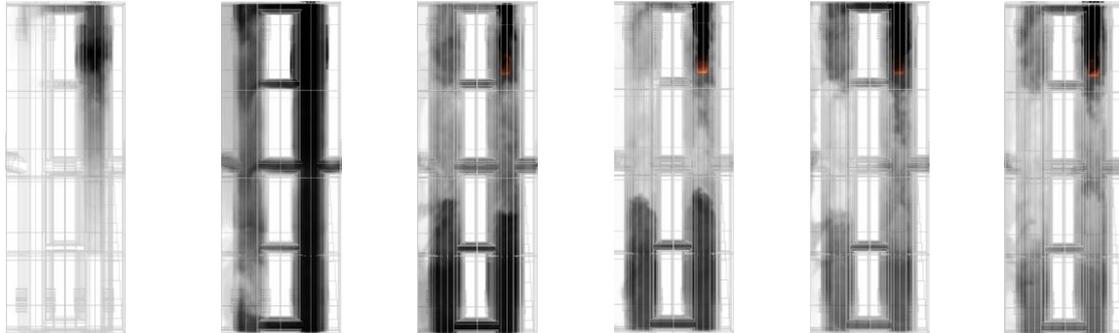
Cenário INC.2.0



Cenário INC.2.1



Cenário INC.2.2



Cenário INC.2.3



(A)

(B)

(C)

(D)

(E)

(F)

Figura 4.13 – Dispersão do fumo do incêndio no nível superior da estação – Cenários INC.2.”x”:
(A) aos 150 segundos / (B) aos 300 segundos / (C) aos 450 segundos / (D) aos 600 segundos / (E) aos 750 segundos / (F) aos 900 segundos

Relativamente às galerias de acesso, que interligam o nível superior da estação com o exterior, observa-se que no cenário INC.2.0, em que o sistema de controlo de fumo não é ativado, a densidade ótica de fumo, à cota de 2 m do pavimento da galeria de acesso à Rua do Crucifixo, excede o valor de $0,15 \text{ m}^{-1}$ sensivelmente aos 350 segundos na zona mais próxima da estação e aos 460 segundos na zona superior (Figura 4.14-A). Este parâmetro aumenta de forma progressiva estabilizando em valores de cerca de $1,2 \text{ m}^{-1}$.

No caso da galeria de acesso ao Largo do Chiado este limiar é excedido sensivelmente aos 370 segundos na zona mais próxima da estação e aos 500 segundos na zona superior (Figura 4.15-A). Este parâmetro aumenta de forma progressiva estabilizando em valores de cerca de $1,4 \text{ m}^{-1}$. Em ambos os casos, os valores em que a densidade ótica de fumo estabiliza são bastante superiores ao do cenário INC.1.0.

De forma análoga ao caso anterior, nos cenários em que o sistema de controlo de fumo é ativado, verifica-se a eficácia do mesmo na redução dos níveis da densidade ótica de fumo (Figura 4.14-B,C,D e Figura 4.15-B,C,D).

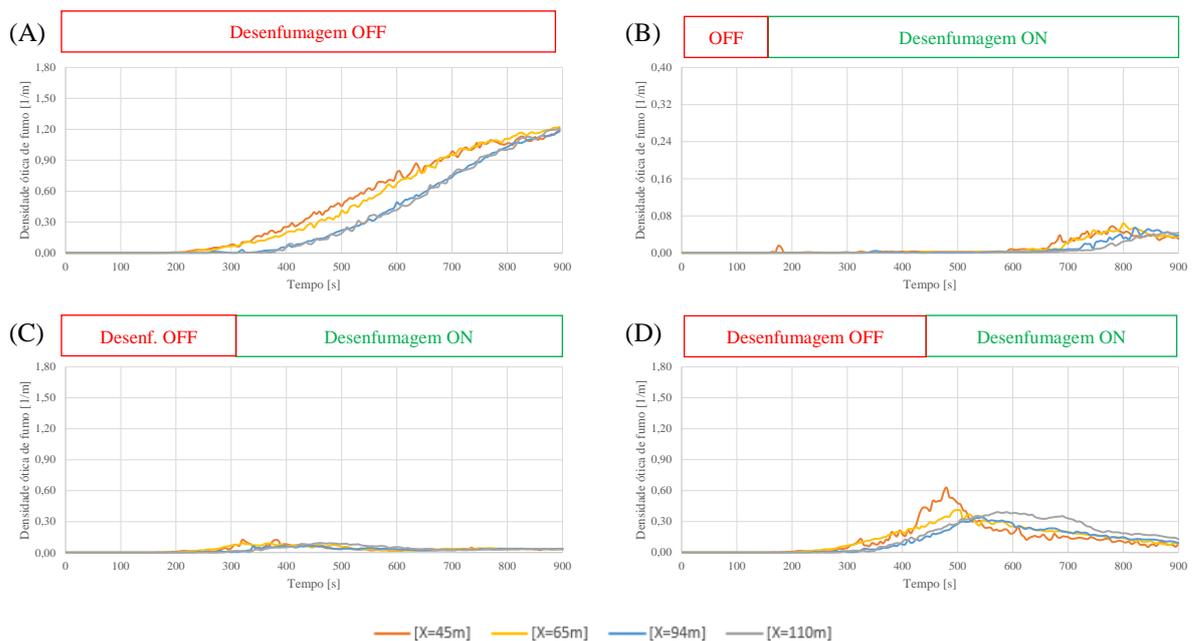


Figura 4.14 – Densidade ótica de fumo à cota de 2m do pavimento, no acesso da Rua do Crucifixo: (A) Cenário INC.2.0 / (B) Cenário INC.2.1 / (C) Cenário INC.2.2 / (D) Cenário INC.2.3

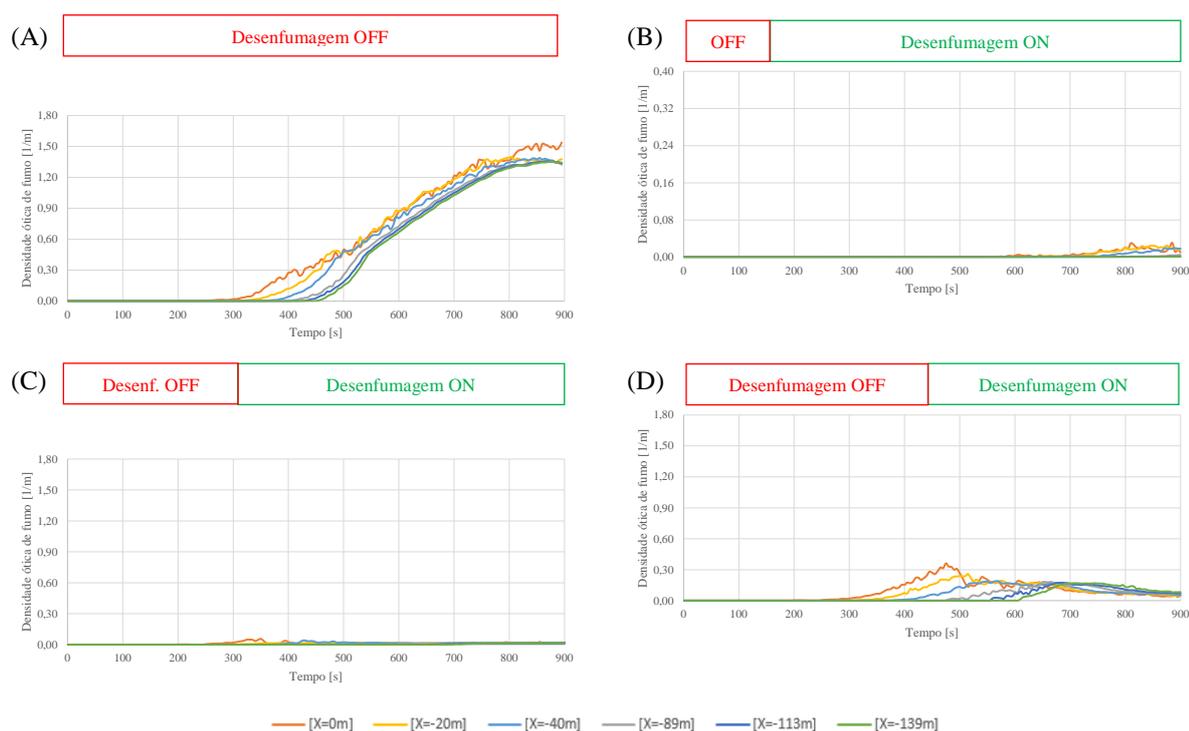


Figura 4.15 – Densidade ótica de fumo à cota de 2m do pavimento, no acesso do Largo do Chiado: (A) Cenário INC.2.0 / (B) Cenário INC.2.1 / (C) Cenário INC.2.2 / (D) Cenário INC.2.3

4.2 Análise dos resultados relativos à temperatura

No que se refere à temperatura, os resultados obtidos para o cenário INC.1.0, que considera a ocorrência de um incêndio com uma taxa de libertação de calor máxima de 10 MW, e onde o sistema de controlo de fumo não é ativado, observa-se que no cais da Linha Azul, à cota de 2 m do pavimento, a temperatura excede o valor de 60 °C sensivelmente aos 290 segundos (Figura 4.16-A). Este valor corresponde à temperatura que, em caso de exposição prolongada (> 30 min) poderá levar à incapacitação dos ocupantes, isto é, os ocupantes tornam-se incapazes de desenvolver as ações necessárias para realizar a própria fuga de um incêndio. Este parâmetro aumenta de forma progressiva estabilizando, depois de cerca de 500 segundos, em valores de cerca de 100 °C, na zona mais próxima do incêndio. Nas restantes zonas do cais da Linha Azul este limiar não chega a ser excedido. De igual modo, também nos cais da Linha Verde este parâmetro mantém-se abaixo do valor de referência (Figura 4.17-A).

Nos cenários em que o sistema de controlo de fumo é ativado, o mesmo contribui na redução dos níveis da temperatura. Observa-se que quando a desenfumagem é ativada precocemente, aos 150 segundos após o início do incêndio, os níveis de temperatura não sofrem alterações relevantes, quer nos cais da Linha Azul (Figura 4.16-B), quer da Linha Verde (Figura 4.17-B).

4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES DE PROPAGAÇÃO E DESENVOLVIMENTO DO INCÊNDIO

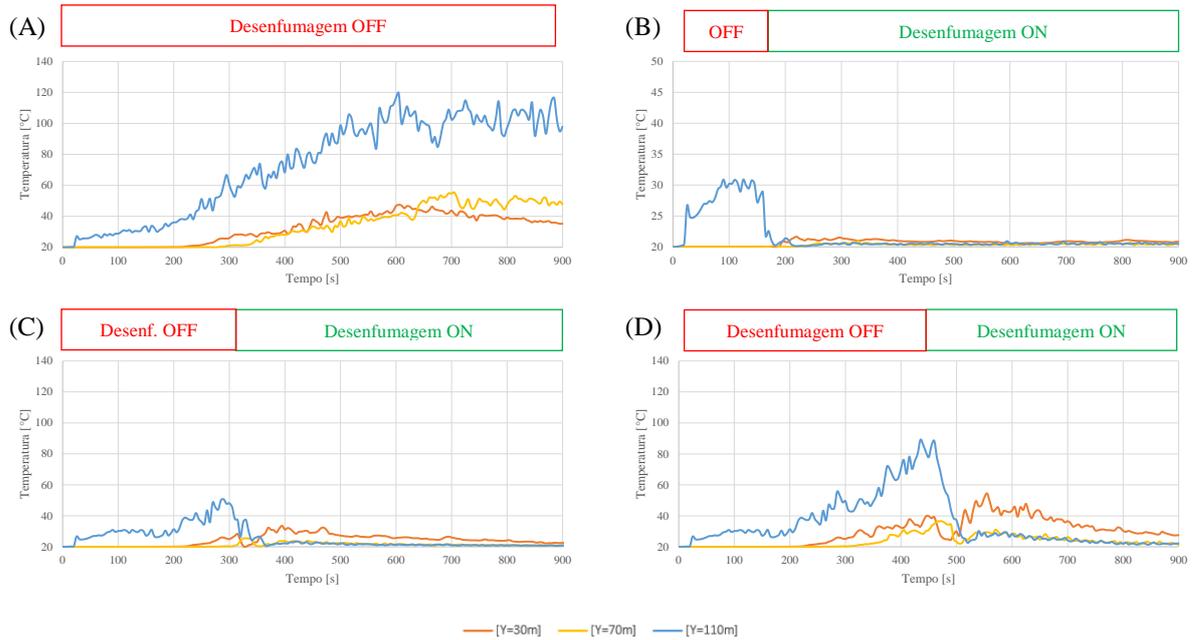


Figura 4.16 – Temperatura à cota de 2m do pavimento, ao nível dos cais da Linha Azul: (A) Cenário INC.1.0 / (B) Cenário INC.1.1 / (C) Cenário INC.1.2 / (D) Cenário INC.1.3

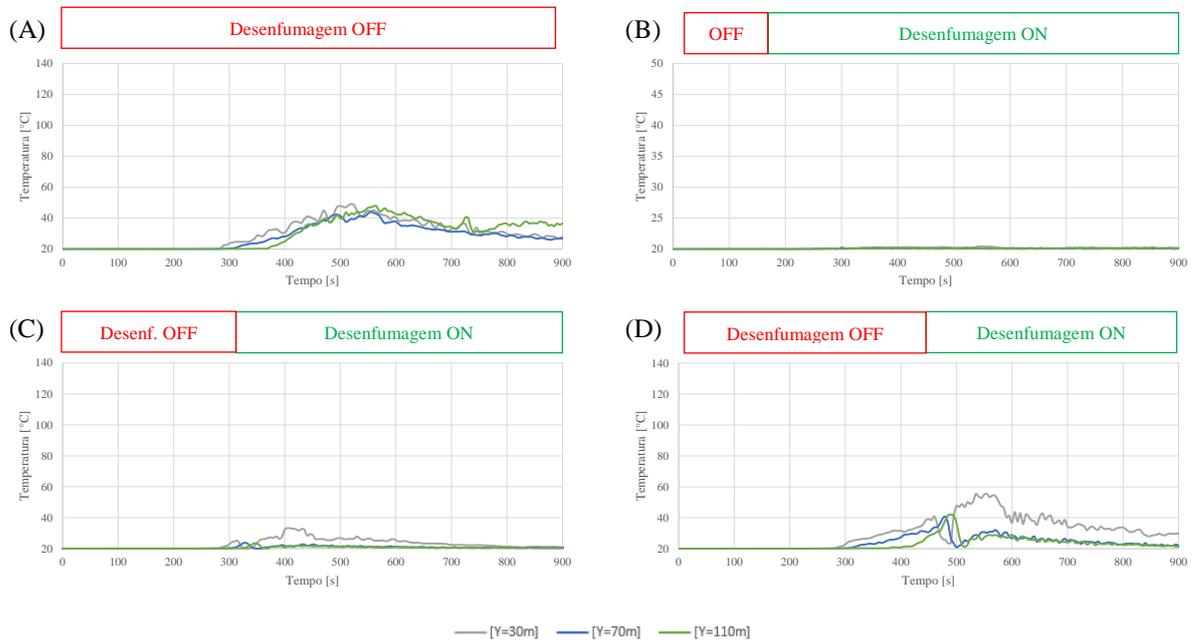


Figura 4.17 – Temperatura à cota de 2m do pavimento, ao nível dos cais da Linha Verde: (A) Cenário INC.1.0 / (B) Cenário INC.1.1 / (C) Cenário INC.1.2 / (D) Cenário INC.1.3

Quando a ativação da desenfumagem é mais tardia, aos 450 segundos após o início do incêndio, verifica-se que nos cais da Linha Azul, na zona mais próxima do incêndio, é excedido pontualmente o valor de referência para a temperatura na camada de fumo inferior, sendo progressivamente reduzida após entrada em funcionamento do sistema de controlo de fumo (Figura 4.16-D). Constata-se também que, tal como sucedeu com os resultados da densidade ótica de fumo, após a entrada em funcionamento do sistema de desenfumagem este valor é reduzido de forma considerável nas zonas central e superior dos cais da Linha Azul (Figura 4.16-D) e da Linha Verde (Figura 4.17-D), estabilizando em temperaturas inferiores a 30 °C no final do tempo de simulação, enquanto que, na zona mais afastada do incêndio ($Y=30\text{m}$), a temperatura aumenta consideravelmente. Este fenómeno estará relacionado, por um lado, com o facto de a insuflação de ar ser feita na zona central da linha, ocorrendo uma abertura deste fluxo na zona central da estação, conjugado com a passagem de fumo do nível superior para inferior, o que explica o aumento da temperatura nesta zona; observa-se também que este valor será reduzido progressivamente.

O cenário INC.1.2, em que a desenfumagem é ativada aos 300 segundos após o início do incêndio, demonstra também ser aquele que apresenta melhores resultados. A temperatura mantém-se em valores abaixo dos 60 °C em todo o período de simulação, quer nos cais da Linha Azul (Figura 4.16-C), quer da Linha Verde (Figura 4.17-C). À semelhança do referido anteriormente, após a entrada em funcionamento da desenfumagem observa-se um ligeiro aumento da temperatura na zona mais afastada do incêndio, em ambos os cais, reduzindo-se progressivamente ao longo do resto do tempo de simulação.

No que respeita ao nível superior da estação observa-se que os valores da temperatura são superiores. No cenário INC.2.0, em que o sistema de controlo de fumo não é ativado, verifica-se que no lado da Linha Azul, à cota de 2 m do pavimento, a temperatura excede o valor de 60 °C sensivelmente aos 350 segundos (Figura 4.18-A), na zona mais próxima do incêndio. Este parâmetro aumenta de forma progressiva estabilizando, após cerca de 600 segundos, em valores de cerca de 110 °C, nas extremidades do piso, e 90 °C, na zona mais central. De igual modo, também no lado da Linha Verde este valor é excedido por volta dos 490 segundos (Figura 4.19-A), aumentando de forma progressiva estabilizando em valores de cerca de 100 °C.

De igual modo, observa-se que o sistema de controlo de fumo, nos cenários em que é ativado, contribui para o controlo da temperatura ambiente. Constata-se que quando a desenfumagem é ativada precocemente, aos 150 segundos após o início do incêndio, os níveis de temperatura mantêm-se baixos, apenas ultrapassando pontualmente os 30 °C no lado da Linha Azul (Figura 4.18-B), e não chegando a ultrapassar os 25 °C no lado da Linha Verde (Figura 4.19-B).

4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES DE PROPAGAÇÃO E DESENVOLVIMENTO DO INCÊNDIO

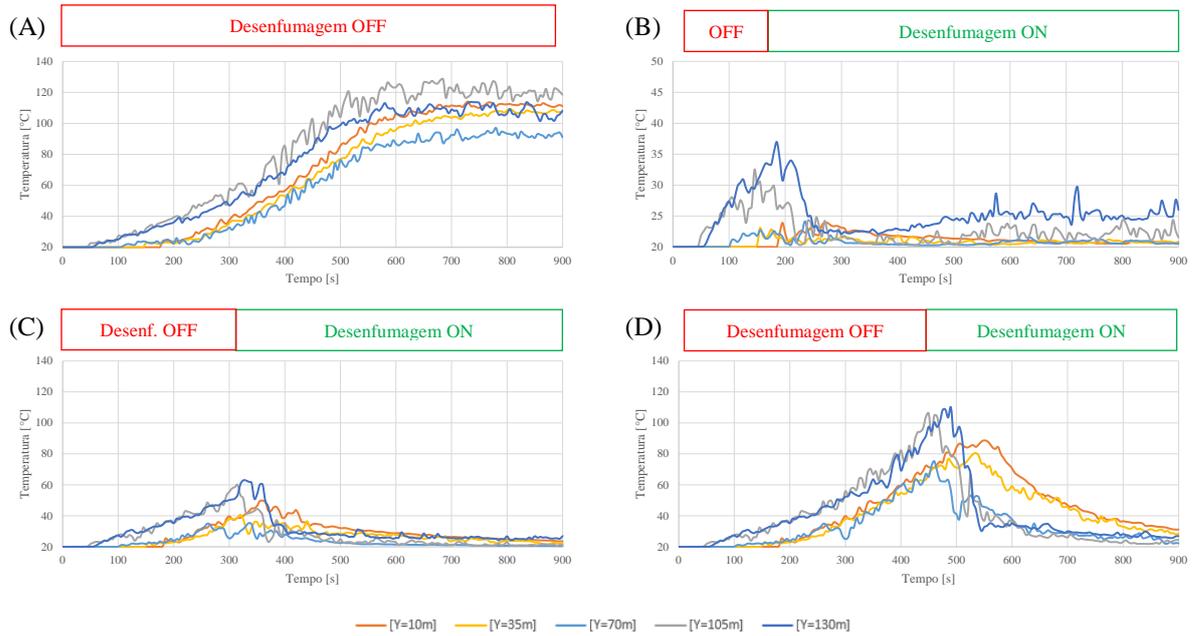


Figura 4.18 – Temperatura à cota de 2m do pavimento, no nível superior da Linha Azul: (A) Cenário INC.1.0 / (B) Cenário INC.1.1 / (C) Cenário INC.1.2 / (D) Cenário INC.1.3

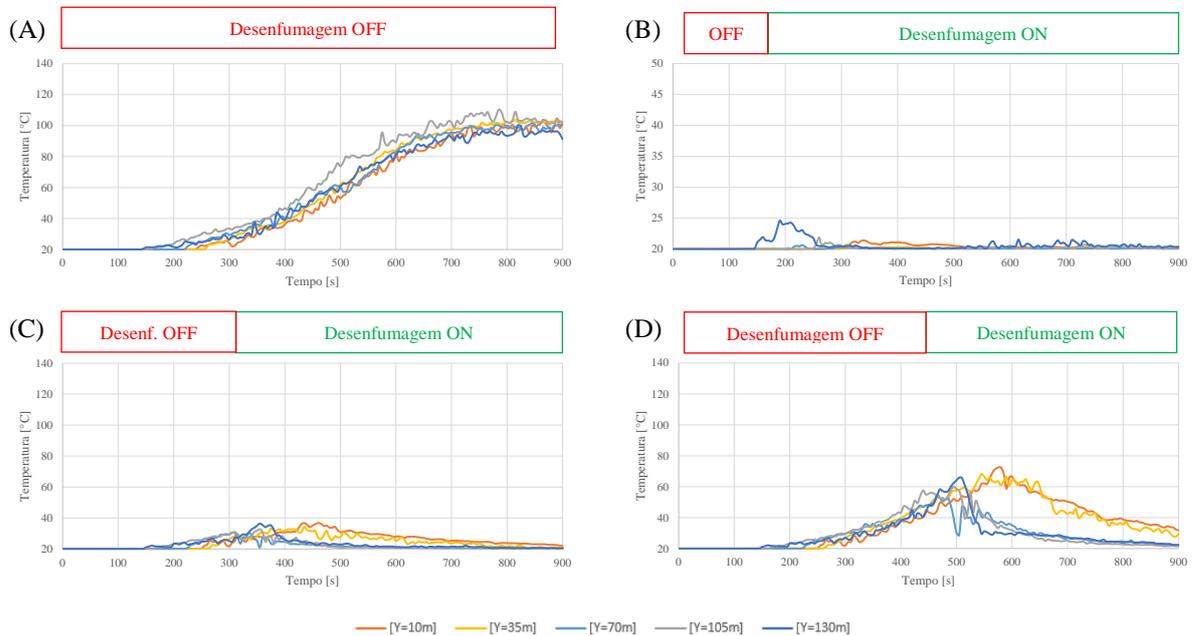


Figura 4.19 – Temperatura à cota de 2m do pavimento, no nível superior da Linha Verde: (A) Cenário INC.1.0 / (B) Cenário INC.1.1 / (C) Cenário INC.1.2 / (D) Cenário INC.1.3

De notar que, quando a ativação da desenfumagem é mais tardia, aos 450 segundos após o início do incêndio, o valor de referência para temperatura é largamente excedido no lado da Linha Azul no nível superior, e pontualmente excedido no lado da Linha Verde. No momento de entrada em funcionamento do sistema de controlo de fumo este parâmetro é de cerca de 100 °C no lado da Linha Azul (Figura 4.18-D) e de cerca de 60 °C no lado da Linha Verde (Figura 4.19-D). Estes valores são progressivamente reduzidos, em particular nas zonas mais próximas dos pontos de extração de fumo, e mais lentamente nas zonas mais afastadas.

No cenário INC.2.2, em que a desenfumagem é ativada aos 300 segundos após o início do incêndio, verifica-se que a densidade ótica de fumo atinge valores de cerca de 60 °C no lado da Linha Azul, e não ultrapassa os 40 °C no lado da Linha Verde, sendo ambos os casos consideravelmente reduzida após ativação do sistema de controlo de fumo (Figura 4.18-C e Figura 4.19-C). À semelhança do referido anteriormente, após a entrada em funcionamento da desenfumagem observa-se um ligeiro aumento da temperatura na zona mais afastada do incêndio, em particular no lado da Linha Verde, reduzindo-se progressivamente ao longo do resto do tempo de simulação.

Relativamente às galerias de acesso, que interligam o nível superior da estação com o exterior, observa-se que no cenário INC.2.0, em que o sistema de controlo de fumo não é ativado, a temperatura, à cota de 2 m do pavimento da galeria de acesso à Rua do Crucifixo, excede o valor de 60 °C sensivelmente aos 500 segundos na zona mais próxima da estação e aos 650 segundos na zona superior (Figura 4.20-A). Este parâmetro aumenta de forma progressiva estabilizando em valores de cerca de 80 °C.

No caso da galeria de acesso ao Largo do Chiado este limiar é excedido sensivelmente aos 500 segundos na zona mais próxima da estação e aos 550 segundos na zona superior (Figura 4.21-A). Este parâmetro aumenta de forma progressiva estabilizando em valores de cerca de 100 °C.

No cenário em que a ativação da desenfumagem é mais tardia, aos 450 segundos após o início do incêndio, o valor de referência para a temperatura é pontualmente excedido no início da galeria de acesso à Rua do Crucifixo (Figura 4.20-D). Nas mesmas condições, e no caso da galeria de acesso ao Largo do Chiado, o valor de 60 °C nunca é ultrapassado (Figura 4.21-D). Em ambos os casos, verifica-se que estes valores irão progressivamente ser reduzidos após a ativação da desenfumagem.

Nos cenários INC.2.1 e INC.2.2 o aumento dos valores da temperatura nas galerias de acesso é desprezável (Figura 4.20-B,C e Figura 4.21-B,C), demonstrando a eficácia do sistema, quando atuado de forma célere.

4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES DE PROPAGAÇÃO E DESENVOLVIMENTO DO INCÊNDIO

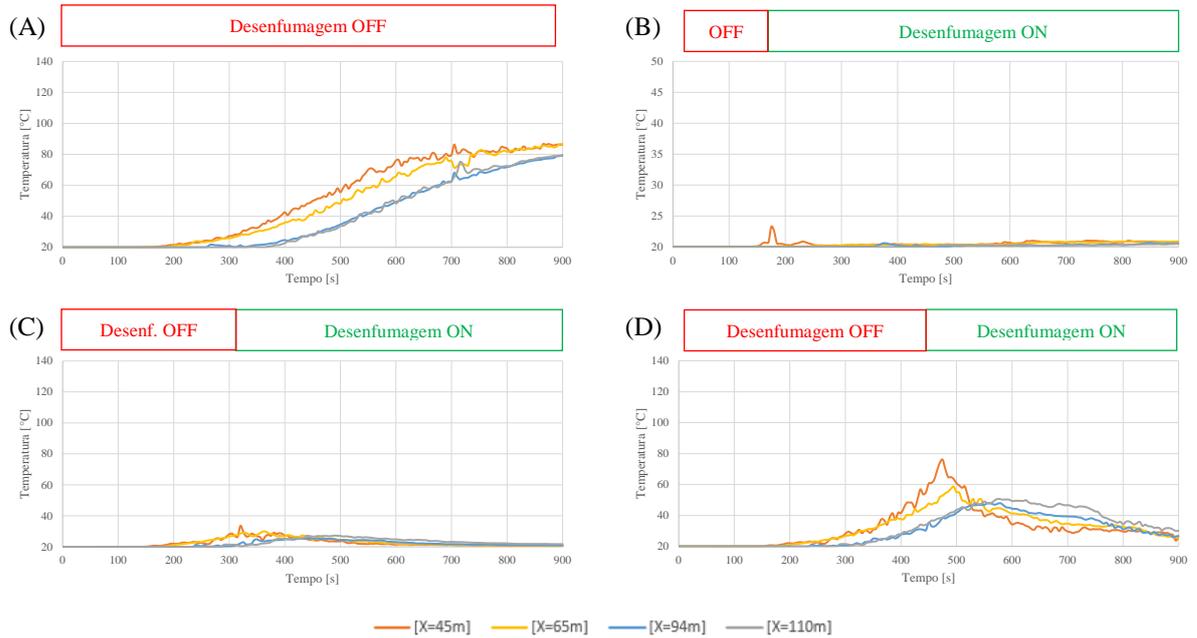


Figura 4.20 – Temperatura à cota de 2m do pavimento, no acesso da Rua do Crucifixo: (A) Cenário INC.1.0 / (B) Cenário INC.1.1 / (C) Cenário INC.1.2 / (D) Cenário INC.1.3

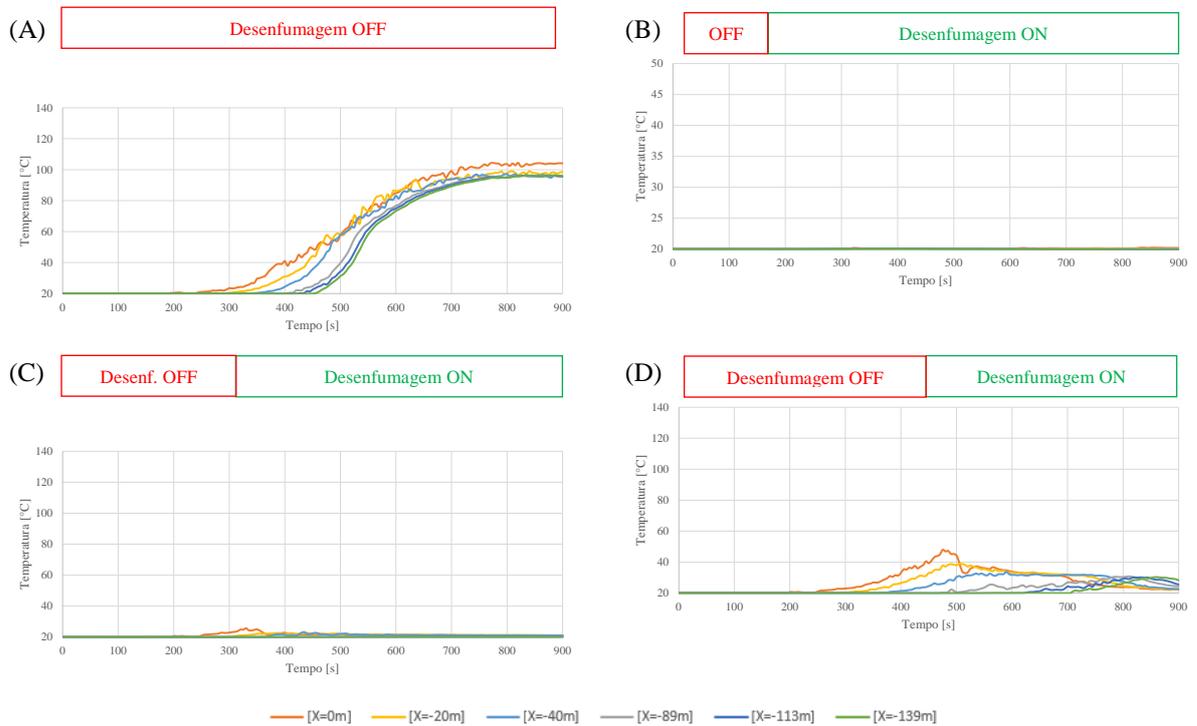


Figura 4.21 – Temperatura à cota de 2m do pavimento, no acesso do Largo do Chiado: (A) Cenário INC.1.0 / (B) Cenário INC.1.1 / (C) Cenário INC.1.2 / (D) Cenário INC.1.3

Procedendo à análise dos resultados obtidos para o cenário INC.2.0, que considera a ocorrência de um incêndio com uma taxa de libertação de calor máxima de 20 MW, e que o sistema de controlo de fumo não é ativado, verifica-se que no cais da Linha Azul, à cota de 2 m do pavimento, a temperatura excede o valor de 60 °C sensivelmente aos 290 segundos (Figura 4.22-A), correspondendo esta à temperatura que, em caso de exposição prolongada (> 30 min) poderá levar à incapacitação dos ocupantes. Este parâmetro aumenta de forma progressiva estabilizando em valores de cerca de 160 °C, na zona mais próxima do incêndio.

Nas restantes zonas do cais da Linha Azul este limiar é excedido em torno dos 700 segundos. Nos cais da Linha Verde este parâmetro mantém-se abaixo do valor de referência (Figura 4.23-A).

De forma análoga ao caso anterior, nos cenários em que o sistema de controlo de fumo é ativado, verifica-se a eficácia do mesmo na redução dos níveis da temperatura (Figura 4.22-B,C,D e Figura 4.23-B,C,D).

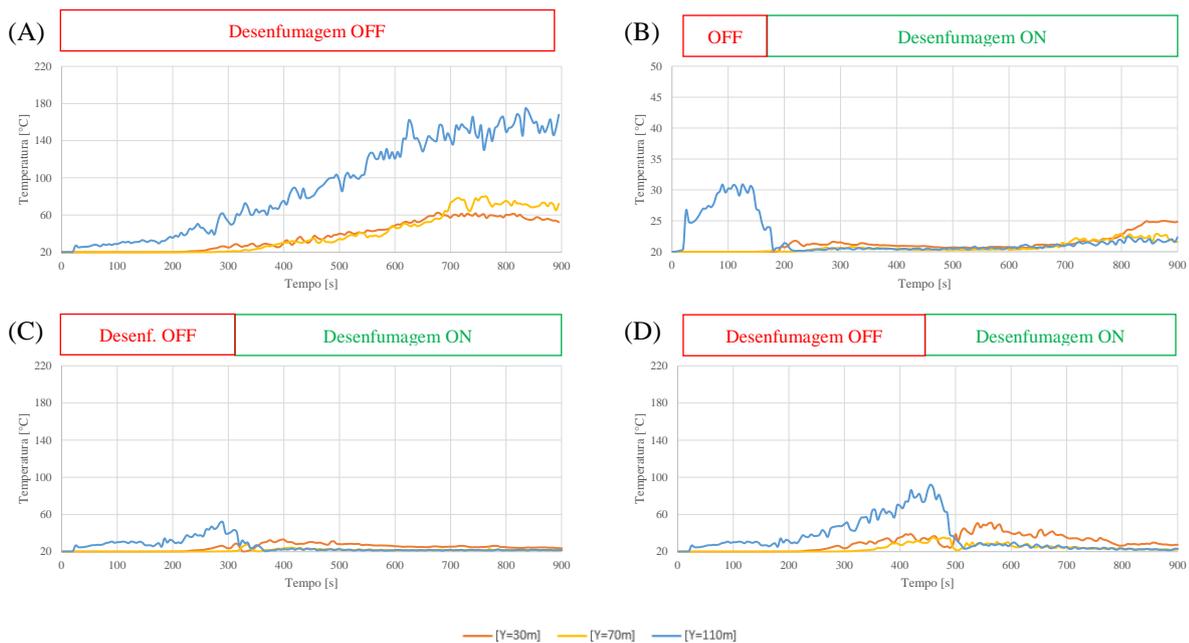


Figura 4.22 – Temperatura à cota de 2m do pavimento, ao nível dos cais da Linha Azul: (A) Cenário INC.2.0 / (B) Cenário INC.2.1 / (C) Cenário INC.2.2 / (D) Cenário INC.2.3

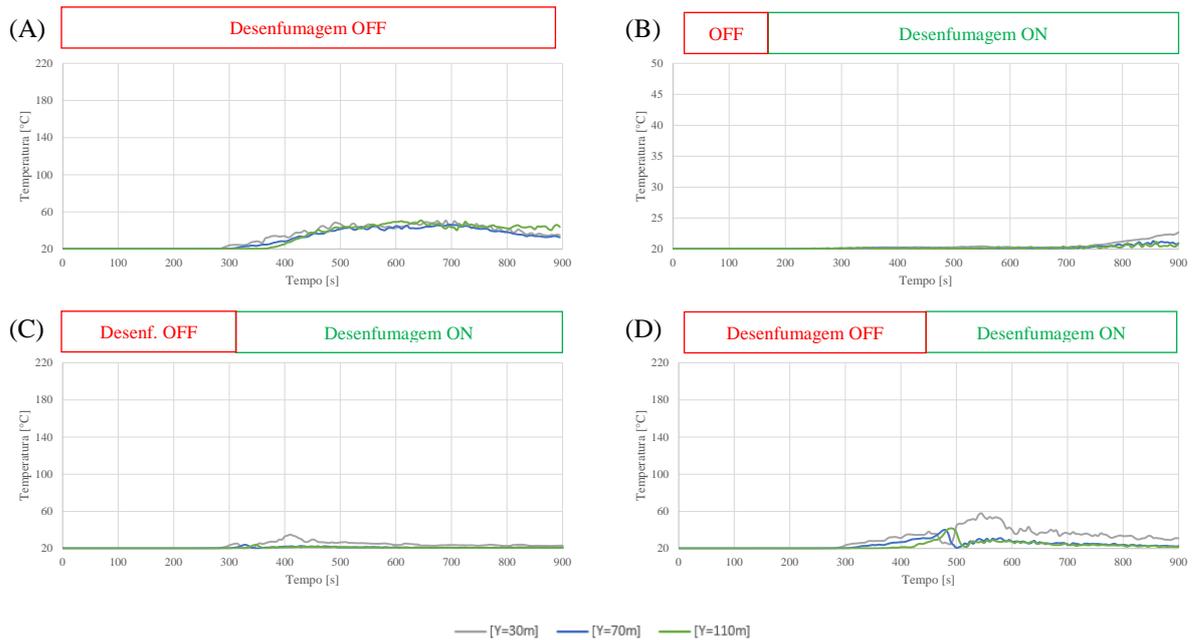


Figura 4.23 – Temperatura à cota de 2m do pavimento, ao nível dos cais da Linha Verde: (A) Cenário INC.2.0 / (B) Cenário INC.2.1 / (C) Cenário INC.2.2 / (D) Cenário INC.2.3

Em relação ao nível superior da estação observa-se que os valores da temperatura são superiores. No cenário INC.2.0, em que o sistema de controlo de fumo não é ativado, do lado da Linha Azul, à cota de 2 m do pavimento, a temperatura registada excede o valor de 60 °C sensivelmente aos 350 segundos (Figura 4.24-A), na zona mais próxima do incêndio. Este parâmetro aumenta de forma progressiva estabilizando em valores de cerca de 170 °C, nas extremidades do piso, e 140 °C, na zona mais central.

De igual modo, também no lado da Linha Verde este valor é excedido por volta dos 490 segundos (Figura 4.25-A), aumentando de forma progressiva e estabilizando em valores de cerca de 160 °C. Em ambos os casos, a temperatura estabiliza em valores muito superiores ao do cenário INC.1.0.

Também neste caso, nos cenários em que o sistema de controlo de fumo é ativado, verifica-se a eficácia do mesmo na redução dos níveis da temperatura (Figura 4.24-B,C,D e Figura 4.25-B,C,D).

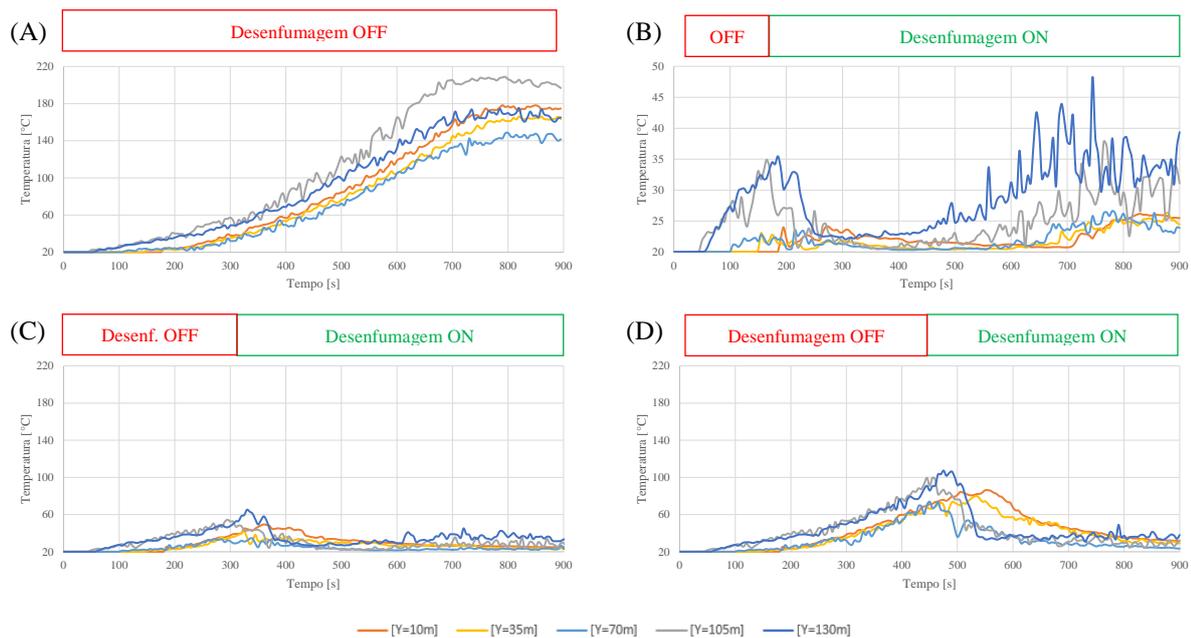


Figura 4.24 – Temperatura à cota de 2m do pavimento, no nível superior da Linha Azul: (A) Cenário INC.2.0 / (B) Cenário INC.2.1 / (C) Cenário INC.2.2 / (D) Cenário INC.2.3

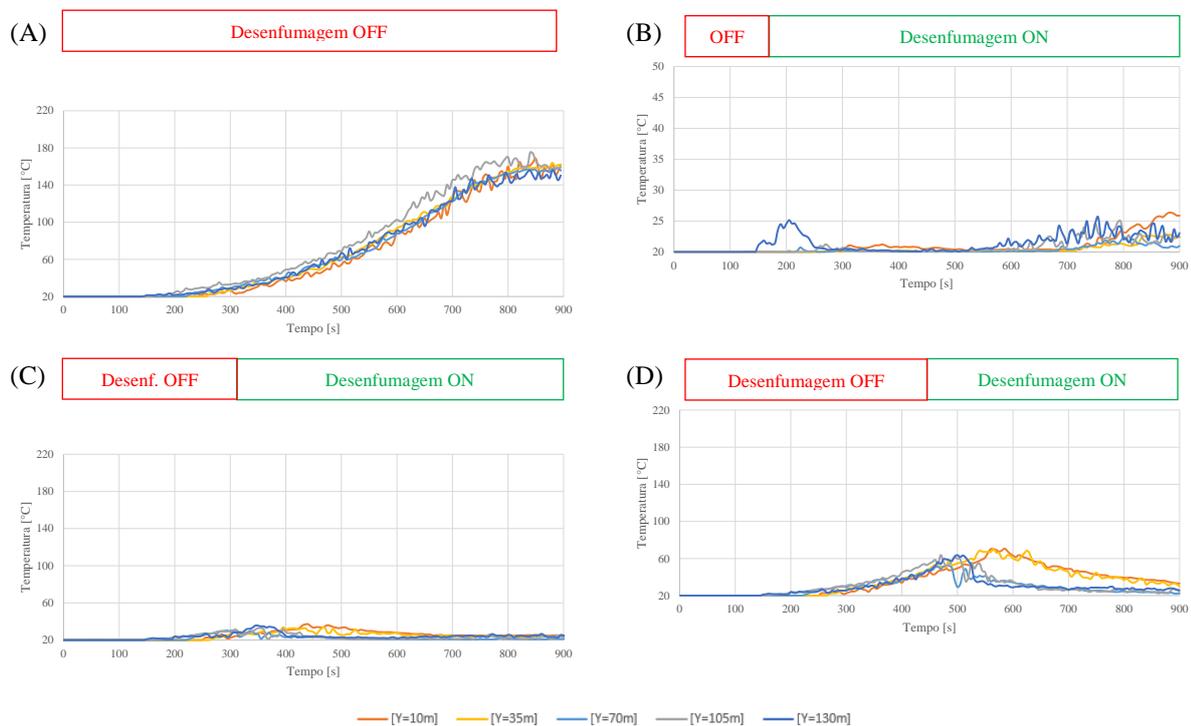


Figura 4.25 – Temperatura à cota de 2m do pavimento, no nível superior da Linha Verde: (A) Cenário INC.2.0 / (B) Cenário INC.2.1 / (C) Cenário INC.2.2 / (D) Cenário INC.2.3

Relativamente às galerias de acesso, que interligam o nível superior da estação com o exterior, observa-se que no cenário INC.2.0, em que o sistema de controlo de fumo não é ativado, a temperatura registada, à cota de 2 m do pavimento da galeria de acesso à Rua do Crucifixo, excede o valor de 60 °C sensivelmente aos 500 segundos na zona mais próxima da estação e aos 650 segundos na zona superior (Figura 4.26-A). Este parâmetro aumenta de forma progressiva estabilizando em valores de cerca de 120 °C.

No caso da galeria de acesso ao Largo do Chiado este limiar é excedido sensivelmente aos 500 segundos na zona mais próxima da estação e aos 550 segundos na zona superior (Figura 4.27-A). Este parâmetro aumenta de forma progressiva estabilizando em valores de cerca de 150 °C. Em ambos os casos, os valores em que a temperatura estabiliza são bastante superiores ao do cenário INC.1.0.

De forma análoga ao caso anterior, nos cenários em que o sistema de controlo de fumo é ativado, verifica-se a eficácia do mesmo na redução dos níveis da temperatura (Figura 4.26-B,C,D e Figura 4.27-B,C,D).

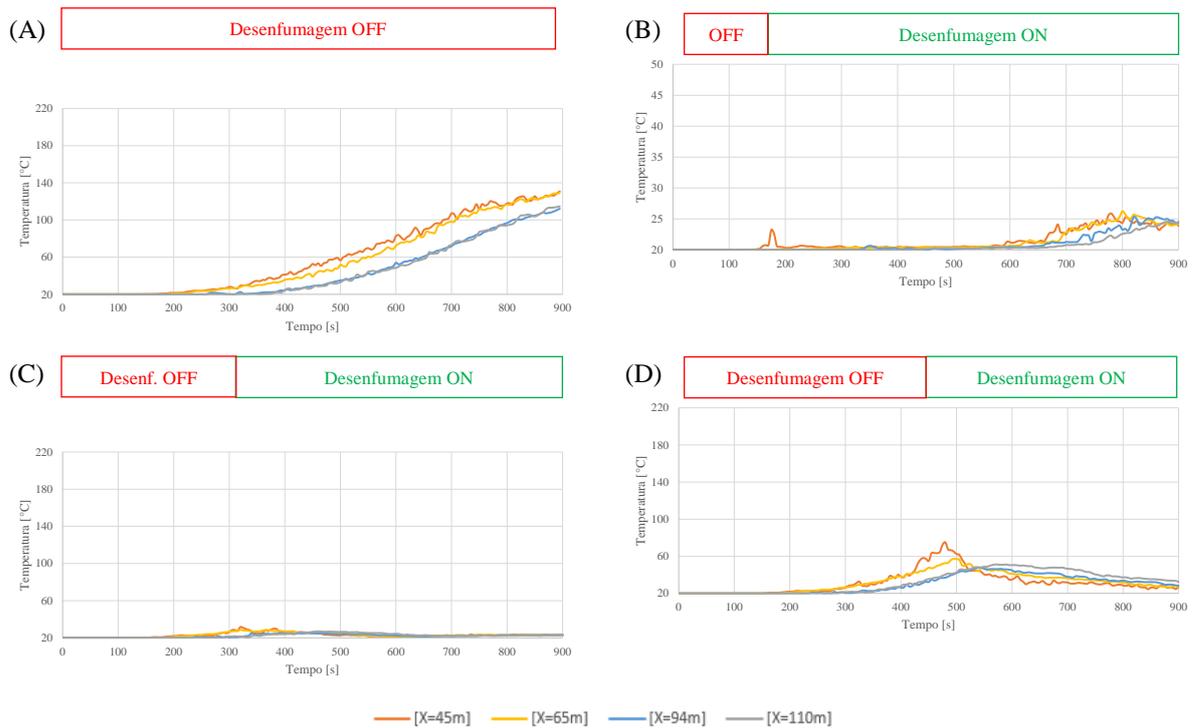


Figura 4.26 – Temperatura à cota de 2m do pavimento, no acesso da Rua do Crucifixo: (A) Cenário INC.2.0 / (B) Cenário INC.2.1 / (C) Cenário INC.2.2 / (D) Cenário INC.2.3

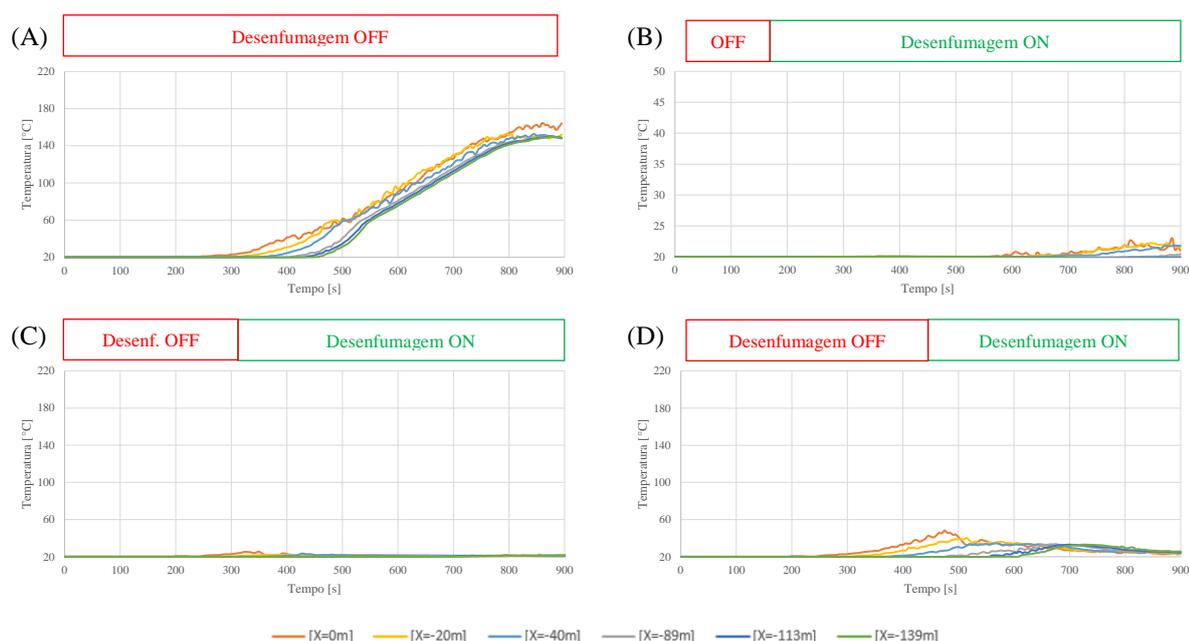


Figura 4.27 – Temperatura à cota de 2m do pavimento, no acesso do Largo do Chiado: (A) Cenário INC.2.0 / (B) Cenário INC.2.1 / (C) Cenário INC.2.2 / (D) Cenário INC.2.3

4.3 Considerações finais

Neste capítulo analisaram-se os resultados obtidos para as simulações de incêndio efetuadas, variando a taxa de libertação de calor máxima, considerando ou não o funcionamento do sistema de desenfumagem, e o momento da sua ativação, com o principal objetivo de verificar a existência de condições para uma evacuação segura, num cenário de incêndio, isto é, com um foco na análise dos valores da densidade ótica de fumo e temperatura à cota de 2 m do pavimento, nas diversas zonas da estação.

Observou-se que o aumento da taxa de libertação de calor máxima se traduz num aumento dos níveis da densidade ótica de fumo e de temperatura registados nos diversos locais da estação. Estes locais dentro da estação são afetados de forma diferente, de acordo com a proximidade ao incêndio, proximidade aos pontos de extração/insuflação de ar ou piso em que se encontram.

Constatou-se a importância da existência de um sistema de controlo de fumo, quer na redução da densidade ótica de fumo, quer na redução da temperatura. Verificou-se também a importância da sua rápida ativação em caso de incêndio, isto é, uma ativação célere do sistema permite manter os níveis da densidade ótica de fumo abaixo dos limites aceitáveis, ou seja, idealmente deverá ser ativado antes dos 300 segundos, contabilizados a partir do momento de início do incêndio, uma vez que quanto mais tardia for esta ativação mais fumo se acumulará no nível superior, logo, maior exposição ao mesmo terão os ocupantes. Por este motivo o

cenário INC.2.2, que considera um incêndio com uma taxa de libertação de calor máxima de 20 MW (situação mais gravosa), e onde a desenfumagem é ativada aos 300 segundos de simulação, foi selecionado para integração do mesmo na simulação de evacuação, nos cenários EVAC.”y”.4, conforme descrito em pormenor no capítulo 3.3.3. A escolha do momento de ativação do sistema de controlo de fumo aos 300 segundos é também coerente com outros estudos desenvolvidos na área (*e.g.* Belinsky et al., 2010).

5 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES DE EVACUAÇÃO

5.1 Avaliação dos tempos de evacuação

Seguidamente apresentam-se os resultados para cada um dos cenários de evacuação considerados, sendo feita uma avaliação dos tempos de evacuação em cada um deles.

5.1.1 Cenários EVAC.1."x"

No Quadro 5.1 é apresentado um resumo dos resultados obtidos na simulação de evacuação dos Cenários EVAC.1.0 a EVAC.1.4, correspondentes a um período de baixa ocupação da estação (500 ocupantes no total). A análise comparativa é feita sempre em relação ao cenário EVAC 1.0.

Observa-se que o tempo de evacuação é semelhante em todos os cenários (com exceção do cenário EVAC.1.2), estando este aspeto patente na Figura 5.1, que representa o número de ocupantes no interior da estação ao longo do período de simulação.

Quadro 5.1 – Resumo dos resultados da simulação de evacuação – Cenários EVAC.1.0 a EVAC.1.4

Cenário	EVAC.1.0	EVAC.1.1	EVAC.1.2	EVAC.1.3	EVAC.1.4
Tempo de pré-movimento [s]			120		
Tempo de movimento [s]	405,2	395,4	568,2	400,0	402,9
Tempo de evacuação [s]	525,2	515,4	688,2	520,0	522,9
Diferença do tempo de movimento em relação ao cenário EVAC.1.0 [s]	-	-9,8	163,0	-5,2	-2,3
Diferença do tempo de movimento em relação ao cenário EVAC.1.0 [%]	-	-2 % ▼	+40 % ▲	-1 % ▼	-1 % ▼
Tempo máximo de congestionamento [s]	116,1	122,3	77,7	118,5	130,9
Tempo médio de congestionamento [s]	23,6	20,1	7,7	24,4	23,7
Tempo máximo de congestionamento contínuo [s]	42,4	45,5	30,1	44,1	54,5
Tempo médio de congestionamento contínuo [s]	6,1	5,5	2,6	6,3	6,4

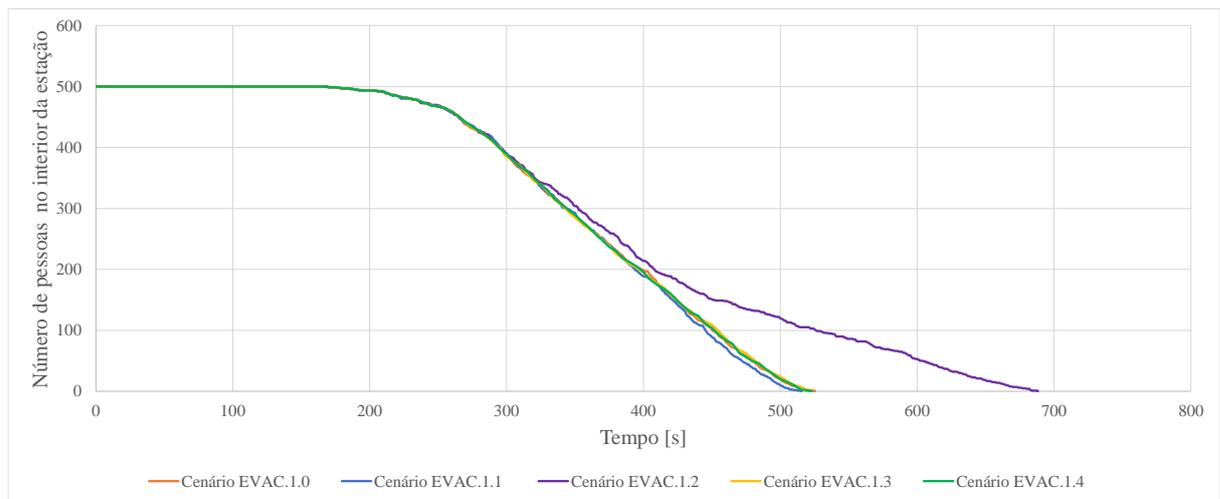


Figura 5.1 – Número de pessoas no interior da estação - Cenários EVAC.1.0 a EVAC.1.4

Esta similaridade de resultados pode ser atribuída ao reduzido efetivo presente na estação, este número de ocupantes leva a que não se verifiquem grandes congestionamentos. O tempo médio de congestionamento é de cerca de 20-25 segundos e ocorre essencialmente durante a subida das escadas de acesso à saída da Rua do Crucifixo (Figura 5.2). As cores apresentadas na Figura 5.2 correspondem ao nível de serviço [conceito desenvolvido por Fruin (1971)], e representam a probabilidade de congestionamento em cada local, correspondendo o nível A (violeta) à menor probabilidade e o nível F (vermelho) ao de maior probabilidade. De acordo com Fruin (1971), num estudo de evacuação deste tipo, para situações de movimento de emergência e de espaço limitado, no âmbito de projetos e estudos de Segurança contra Incêndios, os níveis de serviço C (verde), D (amarelo) e E (laranja) são aceitáveis.



Figura 5.2 – Nível de serviço / congestionamento no nível superior da estação e acessos – Cenário EVAC.1.0: (A) aos 200 segundos / (B) aos 400 segundos

Os resultados obtidos permitem analisar o comportamento do efetivo numa situação de emergência, observando-se que as saídas disponíveis são utilizadas de forma desigual, isto é, praticamente a totalidade dos ocupantes (98,4%) utilizou a saída da Rua do Crucifixo (Figura

5.3-A). Este facto deve-se a esta estar consideravelmente mais próxima do exterior (permitindo aos ocupantes saírem o mais cedo possível da estação, em função da distância percorrida e do congestionamento associado à via).

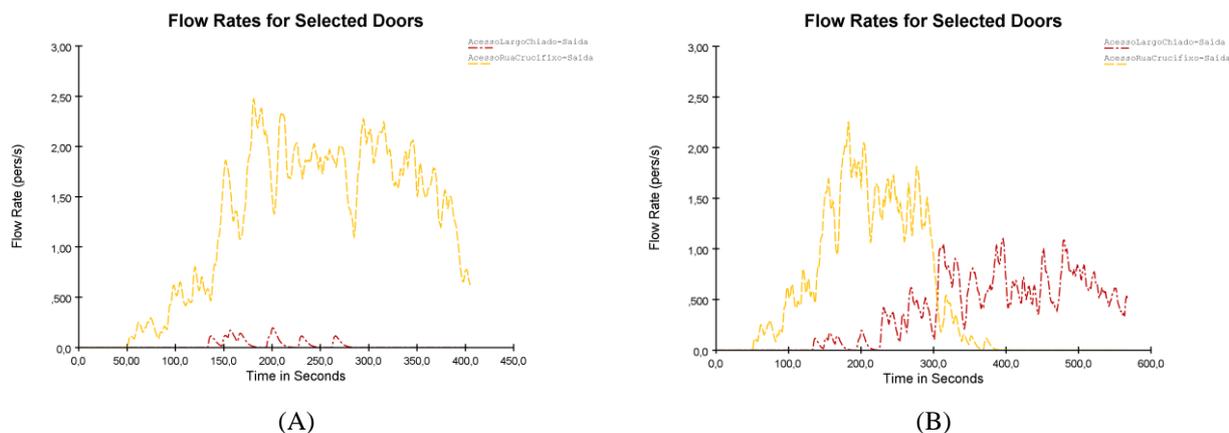


Figura 5.3 – Fluxo de pessoas para cada uma das saídas da estação:
 (A) no cenário EVAC.1.0 / (B) no cenário EVAC.1.2

Os resultados do cenário EVAC.1.1, no qual os ocupantes podem utilizar as escadas rolantes (paradas) melhoram o tempo de evacuação, ainda que de forma residual (apenas 2%). Neste cenário, 33 ocupantes optaram por utilizar as escadas rolantes, apesar do fator corretivo da velocidade de subida das mesmas. Os resultados sugerem que em períodos de baixa ocupação da estação, a utilização das escadas rolantes na evacuação não constitui uma vantagem significativa.

No cenário EVAC.1.2, no qual os ocupantes que se encontram nos cais da Linha Verde foram forçados a utilizar a saída para o Largo do Chiado (Figura 5.3-B), simulando que os ocupantes seguem as direções indicadas na sinalética de saída presente na estação; constata-se que os ocupantes demoram cerca de 40% mais tempo a sair da estação.

Nos cenários com ocorrência de incêndio não se verifica um agravamento dos tempos de evacuação. Tendo em conta que o efetivo presente na estação é reduzido, a evacuação decorre durante a fase inicial do incêndio. Os níveis da densidade ótica de fumo não são suficientes para reduzir a velocidade dos ocupantes (ver equação 3.21).

Analisando também os níveis da dose efetiva fracionária (FED) no nível superior da estação, no final do tempo de simulação de cada cenário (Quadro 5.2) constata-se que os mesmos são residuais em ambos os cenários, pelo que seria expectável que a evacuação dos ocupantes nestas condições decorresse sem incidentes.

Quadro 5.2 – Valor de FED, à cota de 2m do pavimento do nível superior no final do Tempo de Evacuação – Cenários EVAC.1.3 e EVAC.1.4

		Cenário	
		EVAC.1.3	EVAC.1.4
FED (média ± DP)	Linha Azul	0,02 ± 0,008	0,01 ± 0,008
	Linha Verde	0,01 ± 0,001	0,00 ± 0,001
FED máxima	Linha Azul	0,03	0,02
	Linha Verde	0,01	0,00

Para o cenário EVAC.1.0 o tempo médio de movimento da evacuação total é de 250,1 segundos (Quadro 5.3). A análise dos dados relativos ao género e grupo etário revelam que os indivíduos do género masculino apresentam tempos de movimento 11% inferiores à média geral, enquanto os indivíduos do género feminino demoram cerca de 9% mais que a média global. Este facto está relacionado como a velocidade média de deslocamento dos indivíduos do género masculino ser superior, independentemente do tipo de deslocamento (horizontal ou vertical).

Quadro 5.3 – Tempos de movimento por género e grupo etário para o cenário EVAC.1.0

Género	Grupo etário	Número de ocupantes presentes na estação [pessoas]	Tempo médio de movimento da evacuação [s]	Desvio padrão	Diferença em relação ao tempo médio de movimento da evacuação total [%]	Tempo médio de movimento da evacuação por género [s]	Diferença em relação ao tempo médio de movimento da evacuação total [%]
Masculino	< 30 anos	65	193,9	52,6	-22%	223,8	-11% ▼
	> 30 anos	110	221,6	75	-11%		
	< 50 anos	65	255,8	67,6	+2%		
	> 50 anos	65	217,9	68,3	-13%		
Feminino	< 30 anos	65	217,9	68,3	-13%	272,6	+9% ▲
	> 30 anos	120	272,5	75,4	+9%		
	< 50 anos	75	327,5	66,2	+31%		
	> 50 anos	75	327,5	66,2	+31%		
Geral	Geral	500	250,1	81	-	-	-

Verifica-se também que os indivíduos de idade inferior a 30 anos apresentam sempre valores inferiores à média global. Estes resultados estão de acordo com o esperado, uma vez que o tempo de movimento depende diretamente da velocidade de movimento, cujos valores considerados foram diferenciados por género e grupo etário.

5.1.2 Cenários EVAC.2."x"

No Quadro 5.4 é apresentado um resumo dos resultados obtidos na simulação de evacuação dos Cenários EVAC.2.0 a EVAC.2.4, correspondentes a um período de ocupação média da estação (1000 ocupantes no total).

Ao contrário do observado no conjunto de cenários anterior, a variação dos tempos de evacuação registados em cada cenário é maior. Esta diferença é também visível através da representação gráfica no número de ocupantes no interior da estação ao longo do período de simulação (Figura 5.4).

Quadro 5.4 – Resumo dos resultados da simulação de evacuação – Cenários EVAC.2.0 a EVAC.2.4

Cenário	EVAC.2.0	EVAC.2.1	EVAC.2.2	EVAC.2.3	EVAC.2.4
Tempo de pré-movimento [s]			120		
Tempo de movimento [s]	605,5	551,4	669,4	670,2	608,4
Tempo de evacuação [s]	725,5	671,4	789,4	790,2	728,4
Diferença do tempo de movimento em relação ao cenário EVAC.2.0 [s]	-	-54,2	63,9	64,7	2,9
Diferença do tempo de movimento em relação ao cenário EVAC.2.0 [%]	-	-9 % ▼	+11 % ▲	+11 % ▲	0 %
Tempo máximo de congestionamento [s]	295,6	243,6	168,0	383,7	295,5
Tempo médio de congestionamento [s]	92,5	72,4	33,3	100,0	94,9
Tempo máximo de congestionamento contínuo [s]	101,1	101,7	55,0	139,1	88,8
Tempo médio de congestionamento contínuo [s]	12,7	10,3	7,6	13,3	12,6

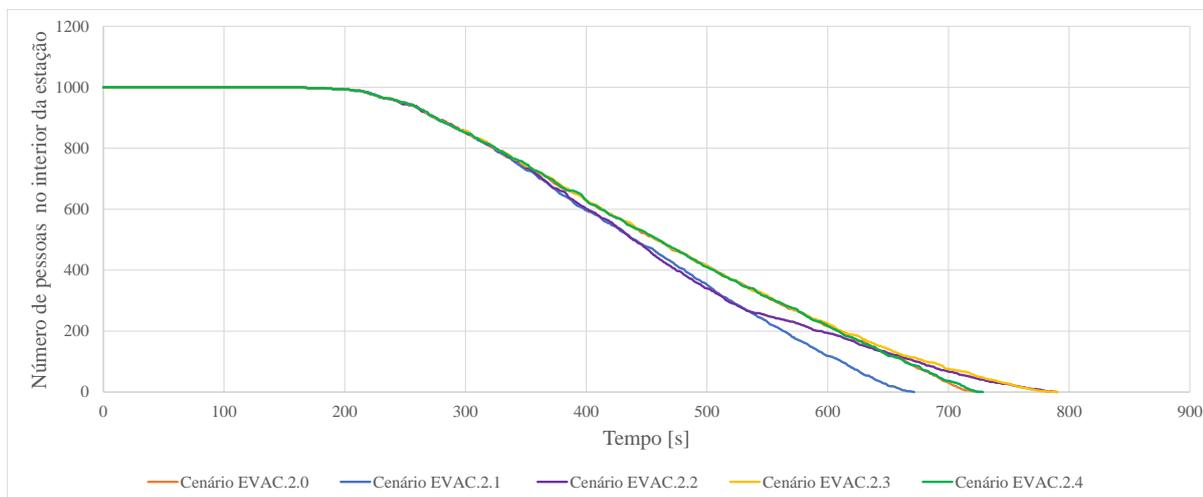


Figura 5.4 – Número de pessoas no interior da estação - Cenários EVAC.2.0 a EVAC.2.4

Os resultados mostram que, em comparação com os cenários EVAC.1.”x”, o tempo médio de congestionamento aumenta, passando este para cerca de 90-100 segundos nos cenários EVAC.2.0, EVAC.2.3 e EVAC.2.4. A Figura 5.5-B permite perceber que esse congestionamento ocorre principalmente na base da escada de acesso à Rua do Crucifixo, onde é visível uma maior concentração de pessoas, levando a níveis de congestionamento E (laranja).



Figura 5.5 – Nível de serviço / congestionamento no nível superior da estação e acessos – Cenário EVAC.2.0:
(A) aos 200 segundos / (B) aos 400 segundos

À semelhança do conjunto de cenários anterior, os resultados obtidos permitem analisar o comportamento do efetivo numa situação de emergência, observando-se que as saídas disponíveis são utilizadas de forma desigual. No cenário EVAC.2.0, a saída da Rua do Crucifixo foi a mais utilizada (Figura 5.6-A) por praticamente a totalidade do efetivo (99,4%). Apenas 0,06% dos ocupantes utilizaram a saída do Largo do Chiado (por já se encontrarem na sua galeria de acesso à mesma no início da simulação); para as condições e número de ocupantes definidos neste cenário, a saída do Largo do Chiado aparenta não ser relevante.

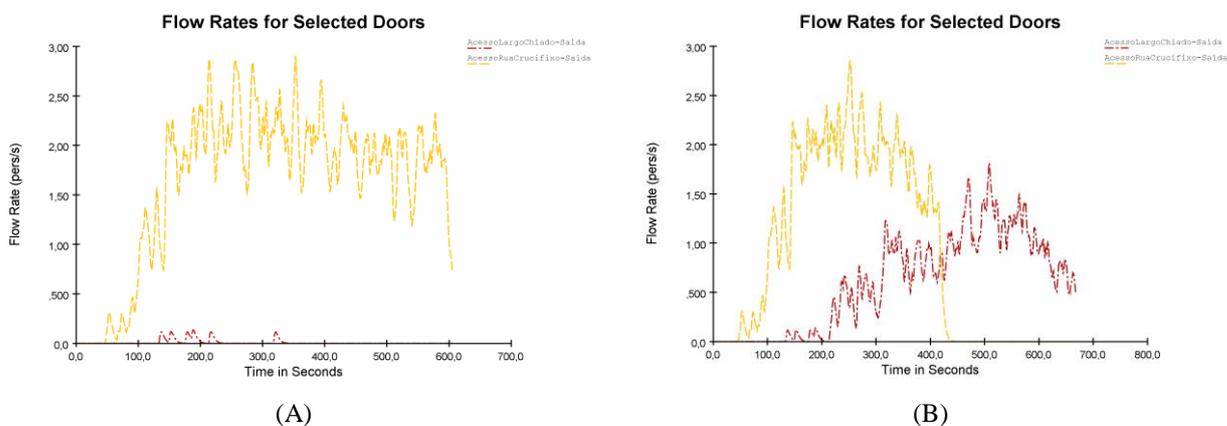


Figura 5.6 – Fluxo de pessoas para cada uma das saídas da estação:
(A) no cenário EVAC.2.0 / (B) no cenário EVAC.2.2

Os resultados do cenário EVAC.2.1, no qual os ocupantes podem utilizar as escadas rolantes (paradas) revelam uma melhoria do tempo de evacuação significativa (menos 9% de tempo), correspondendo a 158 ocupantes que optaram por utilizar as escadas rolantes, apesar do fator corretivo da velocidade de subida das mesmas. Esta melhoria no tempo de evacuação é acompanhada por uma redução do tempo médio de congestionamento em cerca de 22% (em comparação com o cenário EVAC.2.0). Os resultados indiciam que em períodos de ocupação

média da estação, a utilização das escadas rolantes na evacuação pode começar a constituir uma vantagem.

No cenário EVAC.2.2, os ocupantes que se encontram nos cais da Linha Verde foram forçados a utilizar a saída para o Largo do Chiado (Figura 5.6-B), simulando que os ocupantes irão seguir as direções indicadas na sinalética de saída presente na estação. Esta condicionante levou a um aumento de 11% no tempo de saída da estação. Esta diferença apesar de significativa é bastante inferior à verificada no cenário EVAC.1.2. Esta diferença inferior está associada ao facto de apesar de a distância a percorrer até ao exterior ser muito superior (em comparação com a utilização da saída da Rua do Crucifixo), se verificar uma redução muito significativa no tempo médio de congestionamento, que se reduz em cerca de 64% (em relação ao cenário EVAC.2.0).

No que diz respeito aos cenários com a ocorrência de incêndio não se verifica um agravamento dos tempos de evacuação no cenário EVAC.2.4 (onde é ativada a desenfumagem). No cenário EVAC.2.3 o tempo de evacuação é agravado em 11% (em relação ao cenário EVAC.2.0), resultante da presença de níveis de densidade ótica de fumo suficientes para reduzir a velocidade dos ocupantes (ver equação 3.21). Analisando também os níveis da dose efetiva fracionária (FED) no nível superior da estação, no final do tempo de simulação de cada cenário (Quadro 5.5), constata-se que os mesmos são residuais para o cenário EVAC.2.4, evidenciando a importância da existência do sistema de controlo de fumo. No caso do cenário EVAC.2.3 o valor máximo de FED mantém-se abaixo do valor de referência de 0,3 (ver Quadro 4.1) ainda que apresente já uma grandeza considerável. Segundo os valores apresentados na norma ISO 13571 (ver Quadro 2.16) seria expectável que uma pequena parte da população (<11%) pudesse ficar incapacitada durante a evacuação.

Quadro 5.5 – Valor de FED, à cota de 2m do pavimento do nível superior no final do Tempo de Evacuação – Cenários EVAC.2.3 e EVAC.2.4

		Cenário	
		EVAC.2.3	EVAC.2.4
FED (média ± DP)	Linha Azul	0,19 ± 0,046	0,03 ± 0,016
	Linha Verde	0,10 ± 0,008	0,01 ± 0,004
FED máxima	Linha Azul	0,24	0,04
	Linha Verde	0,12	0,01

Para o cenário EVAC.2.0 o tempo médio de movimento da evacuação total é de 343,5 segundos (Quadro 5.6). Foram encontradas algumas diferenças nos tempos de movimento dos indivíduos de cada género, em comparação com a média geral. Os indivíduos do género masculino demoram menos 12% do tempo a chegar à saída, enquanto os indivíduos do género feminino demoram mais 11% do tempo da média geral. A idade também se revelou um fator

diferenciador, observou-se que os indivíduos de idade inferior a 30 anos apresentam sempre valores inferiores à média, independentemente do género (ainda que esta diferença seja mais evidente para os ocupantes do género masculino). Estes resultados estão de acordo com o esperado, uma vez que o tempo de movimento depende diretamente da velocidade de movimento, cujos valores considerados foram diferenciados por género e grupo etário.

Quadro 5.6 – Tempos de movimento por género e grupo etário para o cenário EVAC.2.0

Género	Grupo etário	Número de ocupantes presentes na estação [pessoas]	Tempo médio de movimento da evacuação [s]	Desvio padrão	Diferença em relação ao tempo médio de movimento da evacuação total [%]	Tempo médio de movimento da evacuação por género [s]	Diferença em relação ao tempo médio de movimento da evacuação total [%]
Masculino	< 30 anos	130	260,1	117,3	-24%	302,6	-12% ▼
	> 30 anos	220	297,9	122,2	-13%		
	< 50 anos	130	349,9	133	2%		
	> 50 anos	130	321,8	132,8	-6%		
Feminino	< 30 anos	130	321,8	132,8	-6%	379,7	+11% ▲
	> 30 anos	240	380,8	138,2	11%		
	< 50 anos	150	436,6	130	27%		
Geral	Geral	1000	343,5	140,9	-	-	-

5.1.3 Cenários EVAC.3."x"

No Quadro 5.7 é apresentado um resumo dos resultados obtidos na simulação de evacuação dos Cenários EVAC.3.0 a EVAC.3.4, correspondentes a um período de ocupação elevada da estação (1800 ocupantes no total).

Quadro 5.7 – Resumo dos resultados da simulação de evacuação – Cenários EVAC.3.0 a EVAC.3.4

Cenário	EVAC.3.0	EVAC.3.1	EVAC.3.2	EVAC.3.3	EVAC.3.4
Tempo de pré-movimento [s]			120		
Tempo de movimento [s]	824,6	815,6	875,6	1256,6	834,6
Tempo de evacuação [s]	944,6	935,6	995,6	1376,6	954,6
Diferença do tempo de movimento em relação ao cenário EVAC.3.0 [s]	-	-9,0	51,1	432,0	10,0
Diferença do tempo de movimento em relação ao cenário EVAC.3.0 [%]	-	-1 % ▼	+6 % ▲	+52 % ▲	1 % ▲
Tempo máximo de congestionamento [s]	513,4	511,3	357,4	997,6	513,8
Tempo médio de congestionamento [s]	147,2	152,2	104,8	241,3	151,4
Tempo máximo de congestionamento contínuo [s]	227,5	224,6	118,2	847,6	229,5
Tempo médio de congestionamento contínuo [s]	17,3	16,4	12,6	70,7	17,5

O tempo de evacuação apresenta valores da mesma ordem de grandeza em todos os cenários (com exceção do cenário EVAC.3.3), o que pode ser também observado na representação do número de ocupantes no interior da estação ao longo do período de simulação (Figura 5.7).

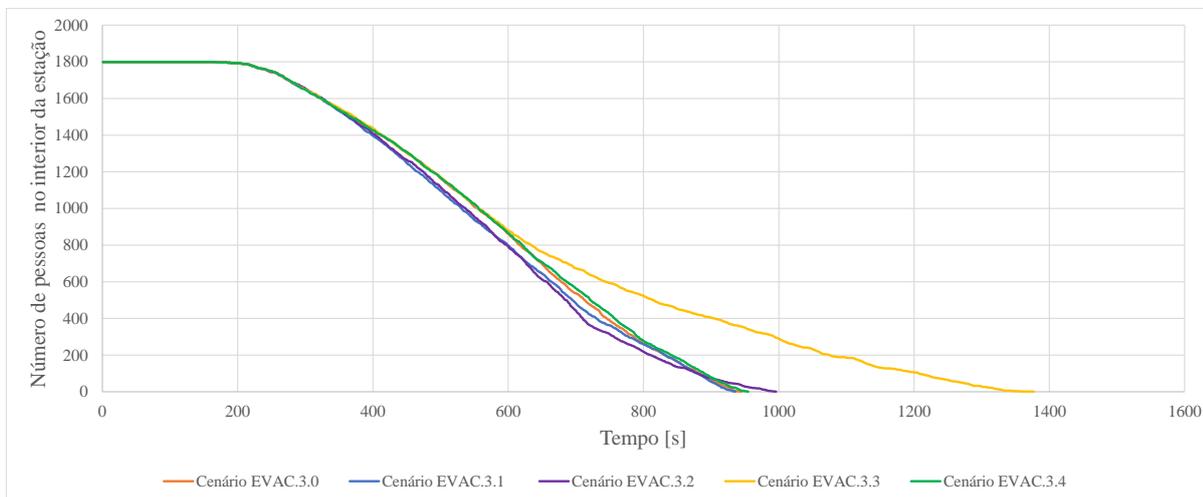


Figura 5.7 – Número de pessoas no interior da estação - Cenários EVAC.3.0 a EVAC.3.4

Observa-se um aumento do tempo médio de congestionamento (em relação aos cenários anteriores), sendo este de cerca de 150 segundos nos cenários EVAC.3.0, EVAC.3.1 e EVAC.3.4. Na Figura 5.8 observa-se uma maior concentração de pessoas nas escadas de ligação das plataformas ao nível superior, nas zonas das barreiras de controlo de acessos do lado da Linha Azul e nas bases das escadas de acesso ao exterior (principalmente na da Rua do Crucifixo) sendo visíveis níveis de congestionamento E (laranja), sendo por isto que se verifica um aumento do tempo de congestionamento.



Figura 5.8 – Nível de serviço / congestionamento no nível superior da estação e acessos – Cenário EVAC.3.0: (A) aos 200 segundos / (B) aos 400 segundos

Ao contrário dos cenários anteriores, por via do aumento do efetivo presente na estação, verifica-se uma utilização mais equilibrada das saídas no cenário EVAC.3.0, onde cerca de 20% dos ocupantes já escolhem utilizar a saída do Largo do Chiado, apesar da sua maior extensão e desnível (Figura 5.9-A).

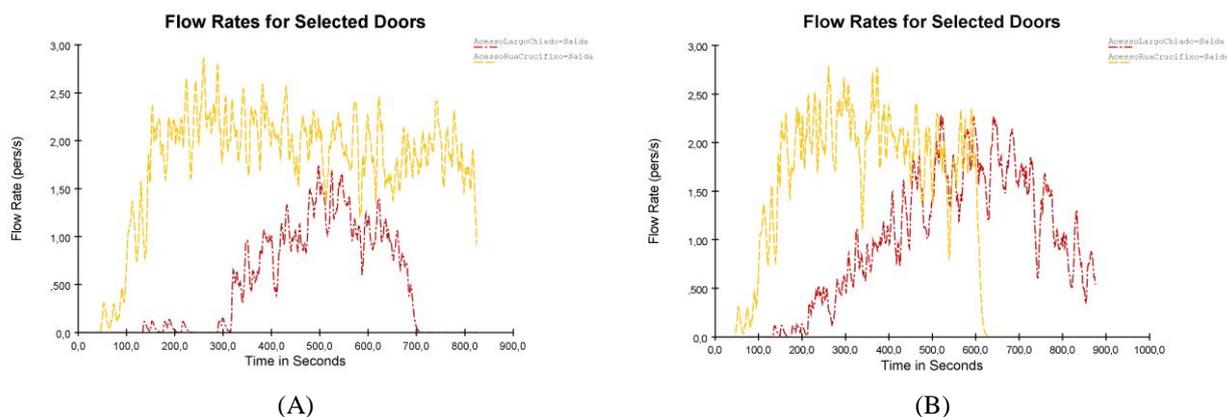


Figura 5.9 – Fluxo de pessoas em cada uma das saídas da estação:
(A) no cenário EVAC.3.0 / (B) no cenário EVAC.3.2

Os tempos de evacuação do cenário EVAC.3.1, no qual os ocupantes podem utilizar as escadas rolantes (paradas) demonstram uma melhoria do tempo de evacuação residual (apenas menos 1% de tempo), correspondendo a 194 ocupantes que optaram por utilizar as escadas rolantes, apesar do fator corretivo da velocidade de subida das mesmas. A utilização das escadas rolantes ocorreu apenas no lado da Rua do Crucifixo, onde o congestionamento foi muito superior. Deste modo, a utilização das escadas rolantes permitiu melhorar um pouco o ritmo de saída dos ocupantes, contribuindo para reduzir o tempo total de evacuação.

No cenário EVAC.3.2, os ocupantes irão seguir as direções indicadas na sinalética de saída presente na estação, isto é, os indivíduos que se encontram nos cais da Linha Verde foram forçados a utilizar a saída para o Largo do Chiado (Figura 5.9-B). Observou-se que os ocupantes demoraram cerca de 6% mais tempo a sair da estação, do que no cenário EVAC.3.0. Esta diferença apesar de relevante é bastante inferior à verificada no cenário EVAC.2.2. O aumento do número de ocupantes na estação leva a que a saída pelo Largo do Chiado comece naturalmente a ser utilizada por uma parte dos ocupantes (como referido acima). O tempo médio de congestionamento foi significativamente reduzido, em cerca de 28% (em relação ao cenário EVAC.3.0).

No que diz respeito aos cenários com a ocorrência de incêndio verifica-se um agravamento muito residual dos tempos de evacuação no cenário EVAC.3.4 (onde é ativada a desenfumagem). No cenário EVAC.3.3 denota-se um agravamento do tempo de evacuação de

52%, o que pode ser explicado pela presença de níveis de densidade ótica de fumo suficientes para reduzir a velocidade dos ocupantes (ver equação 3.21). Analisando também os níveis da dose efetiva fracionária (FED) no nível superior da estação, no final do tempo de simulação de cada cenário (Quadro 5.8), verifica-se que estes são residuais para o cenário EVAC.3.4, evidenciando a importância da existência do sistema de controlo de fumo. No caso do cenário EVAC.3.3 o valor máximo de FED excede largamente o valor de referência de 0,3 (ver Quadro 4.1), prevendo-se que uma parte considerável da população (entre 50% e 89%) pudesse ficar incapacitada durante a evacuação (ISO, 2012).

Quadro 5.8 – Valor de FED, à cota de 2m do pavimento do nível superior no final do Tempo de Evacuação – Cenários EVAC.3.3 e EVAC.3.4

		Cenário	
		EVAC.3.3	EVAC.3.4
FED (média ± DP)	Linha Azul	1,80 ± 0,249	0,06 ± 0,029
	Linha Verde	1,43 ± 0,078	0,02 ± 0,009
FED máxima	Linha Azul	2,04	0,08
	Linha Verde	1,49	0,03

Para o cenário EVAC.3.0 o tempo médio de movimento da evacuação total é de 461,3 segundos (Quadro 5.9). Os indivíduos do género masculino apresentam valores 12% inferiores e os indivíduos do género feminino 10% superiores, em relação à média geral. Verifica-se também que os indivíduos de idade inferior a 30 anos apresentam sempre valores inferiores à média, independentemente do género (esta diferença é particularmente evidente para os ocupantes do género masculino). Os tempos de movimento obtidos são coerentes com o esperado, uma vez que estes resultados dependem diretamente da velocidade de movimento, que se considerou diferenciada por género e grupo etário.

Quadro 5.9 – Tempos de movimento por género e grupo etário para o cenário EVAC.3.0

Género	Grupo etário	Número de ocupantes presentes na estação [pessoas]	Tempo médio de movimento da evacuação [s]	Desvio padrão	Diferença em relação ao tempo médio de movimento da evacuação total [%]	Tempo médio de movimento da evacuação por género [s]	Diferença em relação ao tempo médio de movimento da evacuação total [%]
Masculino	< 30 anos	234	351,8	150,8	-24%	408,2	-12% ▼
	> 30 anos	396	414,1	169,1	-10%		
	< 50 anos	234	458,7	179,7	-1%		
	> 50 anos	234	421,5	175,9	-9%		
Feminino	> 30 anos	432	505,8	188,5	10%	506,0	+10% ▲
	< 50 anos	270	590,7	174,6	28%		
	> 50 anos	270	590,7	174,6	28%		
Geral	Geral	1800	461,3	189,3	-	-	-

5.1.4 Cenários EVAC.4."x"

No Quadro 5.10 é apresentado um resumo dos resultados obtidos na simulação de evacuação dos Cenários EVAC.4.0 a EVAC.4.4, correspondentes a um período de ocupação média da estação e chegada de um comboio no cais Este da Linha Azul (2000 ocupantes no total).

O tempo de evacuação apresenta valores da mesma ordem de grandeza em todos os cenários (com exceção do cenário EVAC.4.3), sendo este facto também visível na Figura 5.10, que representa os ocupantes no interior da estação ao longo do período de simulação.

Quadro 5.10 – Resumo dos resultados da simulação de evacuação – Cenários EVAC.4.0 a EVAC.4.4

Cenário	EVAC.4.0	EVAC.4.1	EVAC.4.2	EVAC.4.3	EVAC.4.4
Tempo de pré-movimento [s]			120		
Tempo de movimento [s]	921,2	878,4	882,8	1543,8	921,4
Tempo de evacuação [s]	1041,2	998,4	1002,8	1663,8	1041,4
Diferença do tempo de movimento em relação ao cenário EVAC.4.0 [s]	-	-42,8	-38,4	622,6	0,2
Diferença do tempo de movimento em relação ao cenário EVAC.4.0 [%]	-	-5 % ▼	-4 %	+68 % ▲	0 %
Tempo máximo de congestionamento [s]	587,4	536,3	575,9	1288,1	602,0
Tempo médio de congestionamento [s]	200,1	188,9	181,6	328,4	199,0
Tempo máximo de congestionamento contínuo [s]	268,9	120,5	140,7	1054,0	225,1
Tempo médio de congestionamento contínuo [s]	16,9	15,0	12,8	93,0	17,3

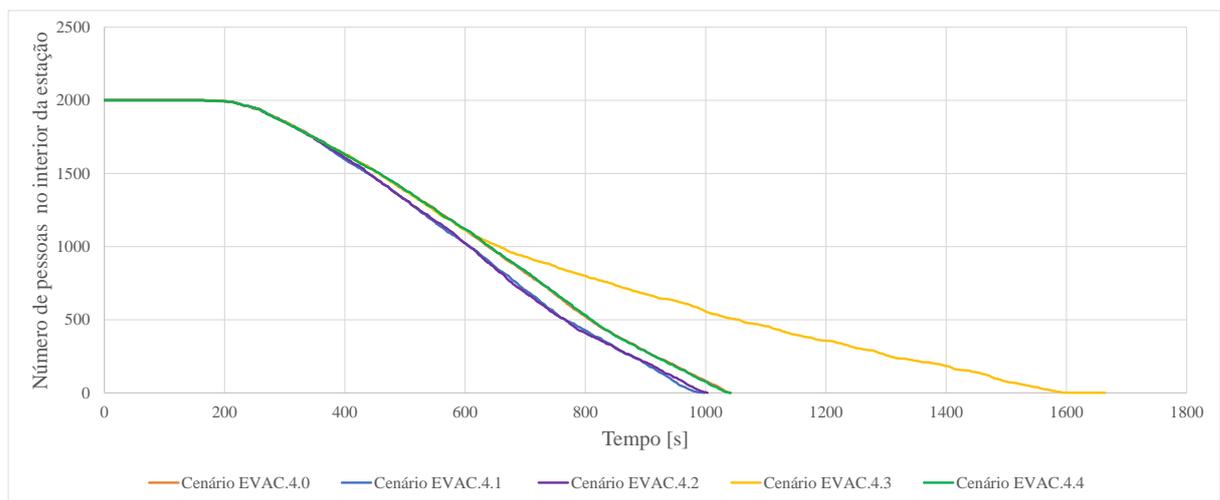


Figura 5.10 – Número de pessoas no interior da estação - Cenários EVAC.4.0 a EVAC.4.4

O tempo médio de congestionamento é ligeiramente aumentado (em relação aos cenários EVAC.3.”x”), sendo de cerca de 180-200 segundos nos cenários EVAC.4.0, EVAC.4.1, EVAC.4.2 e EVAC.4.4. Na Figura 5.11 observa-se que o principal congestionamento (maior concentração de pessoas) ocorre, nas escadas de ligação do cais Este da Linha Azul ao nível superior, nas zonas dos canais de validação de títulos do lado da Linha Azul e na base da escada de acesso à Rua do Crucifixo, sendo visíveis níveis de congestionamento E (laranja).

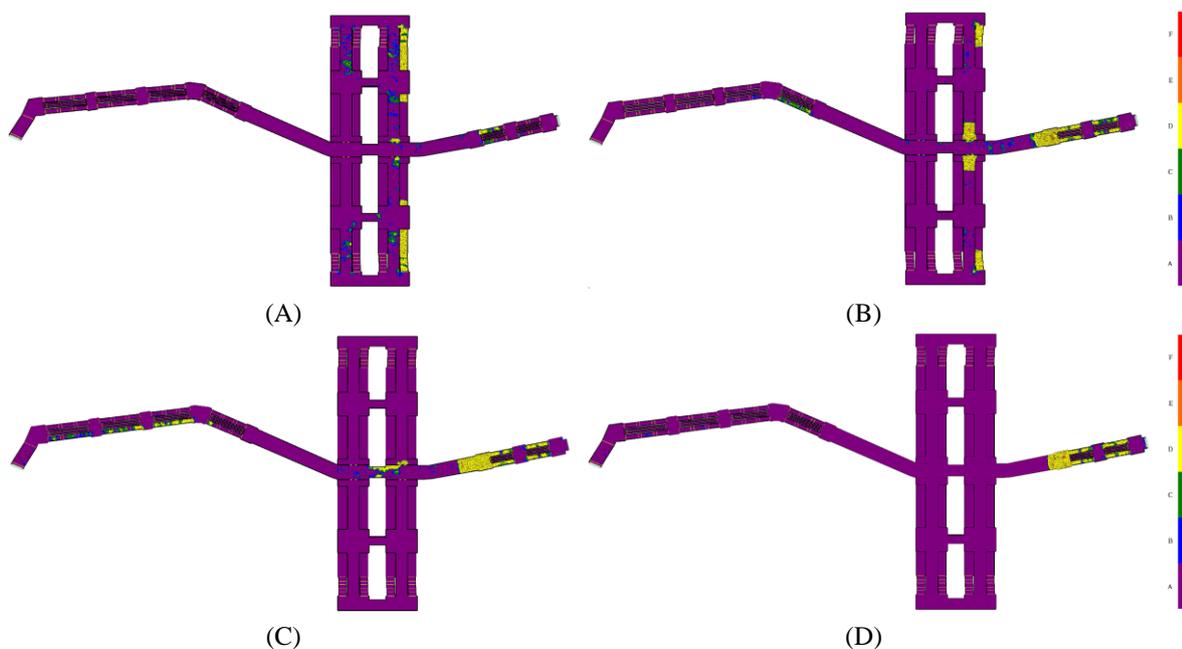


Figura 5.11 – Nível de serviço / congestionamento no nível superior da estação e acessos – Cenário EVAC.4.0:

(A) aos 200 segundos / (B) aos 400 segundos / (C) aos 600 segundos / (D) aos 800 segundos

No cenário EVAC.4.0, o aumento do efetivo presente na estação leva a uma utilização mais equilibrada das saídas (à semelhança do verificado nos cenários EVAC.3.”x”); cerca de 18% dos ocupantes utilizam a saída do Largo do Chiado, apesar da sua maior extensão e desnível (Figura 5.12-A).

Os resultados do cenário EVAC.4.1, no qual os ocupantes podem utilizar as escadas rolantes (paradas) mostram uma melhoria do tempo de evacuação (menos 5% de tempo em relação ao cenário EVAC.4.0), onde 227 ocupantes optaram por utilizar as escadas rolantes, apesar do fator corretivo da velocidade de subida das mesmas; este comportamento ocorreu apenas nas escadas rolantes do lado da Rua do Crucifixo, onde o congestionamento foi muito superior. As escadas rolantes permitiram melhorar um pouco o ritmo de saída dos ocupantes.

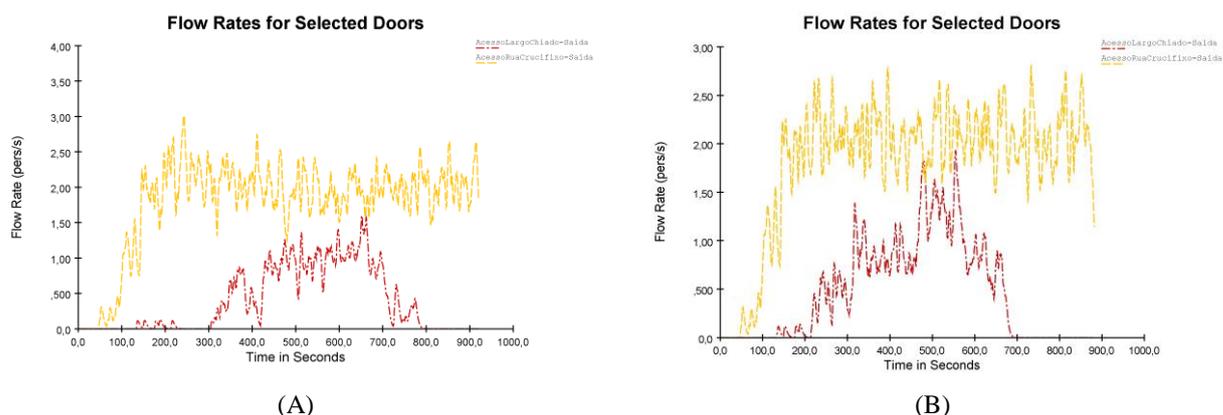


Figura 5.12 – Fluxo de pessoas em cada uma das saídas da estação:
(A) no cenário EVAC.4.0 / (B) no cenário EVAC.4.2

No cenário EVAC.4.2, os ocupantes que se encontram nos cais da Linha Verde são forçados a utilizar a saída para o Largo do Chiado (Figura 5.12-B), simulando que os ocupantes irão seguir as direções indicadas na sinalética de saída presente na estação. Constata-se que os ocupantes demoram cerca de 4% menos tempo a sair da estação (em relação ao cenário EVAC.4.0). Ao contrário dos cenários anteriores, onde a introdução desta regra comportamental agravava o tempo de evacuação, neste caso ocorre o oposto verificando-se uma melhoria do resultado. Este acontecimento pode ser explicado pelo facto de neste cenário a maior parte de o efetivo estar inicialmente no cais Este da Linha Azul, portanto o acesso à Rua do Crucifixo é o mais próximo e com menor distância e desnível até ao exterior, produzindo um processo de evacuação mais célere.

Nos cenários com a ocorrência de incêndio não se verifica um agravamento dos tempos de evacuação quando é ativada a desenfumagem (cenário EVAC.4.4). No cenário EVAC.4.3 denota-se um agravamento do tempo de evacuação de 68% (em relação ao cenário EVAC.4.0), explicado pela presença de níveis de densidade ótica de fumo suficientes para reduzir a velocidade dos ocupantes (ver capítulo 3.3.1.6).

Quadro 5.11 – Valor de FED, à cota de 2m do pavimento do nível superior no final do Tempo de Evacuação – Cenários EVAC.4.3 e EVAC.4.4

		Cenário	
		EVAC.4.3	EVAC.4.4
FED (média ± DP)	Linha Azul	3,22 ± 0,390	0,07 ± 0,035
	Linha Verde	2,67 ± 0,147	0,02 ± 0,012
FED máxima	Linha Azul	3,64	0,10
	Linha Verde	2,78	0,04

Analisando também os níveis da dose efetiva fracionária (FED) no nível superior da estação, no final do tempo de simulação de cada cenário (Quadro 5.11), constata-se que os mesmos são residuais para o cenário EVAC.4.4, evidenciando a importância da existência do sistema de controlo de fumo. No caso do cenário EVAC.4.3 o valor máximo de FED excede largamente o valor de referência de 0,3 (ISO, 2012), prevendo-se que entre 50% e 89% dos ocupantes pudessem ficar incapacitados durante a evacuação.

No cenário EVAC.4.0 o tempo médio de movimento da evacuação total é de 513,9 segundos (Quadro 5.12). O tempo utilizado pelos indivíduos do género masculino para saírem da estação é 9% inferior á média global, enquanto os indivíduos do género feminino demoraram 8% mais tempo do que a média geral. Em relação ao grupo etário, os indivíduos de idade inferior a 30 anos, independentemente do género, registam tempos de evacuação inferiores à média. Estes resultados são coerentes com o expetável, uma vez que estes resultados dependem diretamente da velocidade de movimento, que se considerou diferenciada por género e grupo etário.

Quadro 5.12 – Tempos de movimento por género e grupo etário para o cenário EVAC.4.0

Género	Grupo etário	Número de ocupantes presentes na estação [pessoas]	Tempo médio de movimento da evacuação [s]	Desvio padrão	Diferença em relação ao tempo médio de movimento da evacuação total [%]	Tempo médio de movimento da evacuação por género [s]	Diferença em relação ao tempo médio de movimento da evacuação total [%]
Masculino	< 30 anos	260	404,9	190,9	-21%	468,3	-9% ▼
	> 30 anos	440	468,6	218,3	-9%		
	< 50 anos	260	531,5	224,2	3%		
	> 50 anos	260	499,3	227,8	-3%		
Feminino	> 30 anos	480	560	218,7	9%	552,6	+8% ▲
	< 50 anos	300	598,5	189,4	16%		
	> 50 anos	300	513,9	221,4	-		
Geral	Geral	2000	513,9	221,4	-	-	-

5.1.5 Cenários EVAC.5."x"

No Quadro 5.13 é apresentado um resumo dos resultados obtidos na simulação de evacuação dos Cenários EVAC.5.0 a EVAC.5.4, correspondentes a um período de ocupação média da estação e chegada de um comboio no cais Oeste da Linha Verde (2000 ocupantes no total).

Os valores obtidos para os tempos de evacuação podem ser divididos em dois grupos de cenários, um primeiro grupo de cenários (EVAC.5.0, EVAC.5.1 e EVAC.5.4) que apresentam tempos de evacuação da mesma ordem de grandeza, outro grupo onde os tempos de evacuação são consideravelmente superiores (cenários EVAC.5.2 e EVAC.5.3). Esta ocorrência é também visível na Figura 5.13, que representa os ocupantes no interior da estação ao longo do período

de simulação. O tempo de evacuação máximo foi registado no cenário EVAC.5.3, onde se considerou a ocorrência de um incêndio, sem que fosse ativado o sistema de desenfumagem.

Quadro 5.13 – Resumo dos resultados da simulação de evacuação – Cenários EVAC.5.0 a EVAC.5.4

Cenário	EVAC.5.0	EVAC.5.1	EVAC.5.2	EVAC.5.3	EVAC.5.4
Tempo de pré-movimento [s]			120		
Tempo de movimento [s]	900,7	852,4	1131,0	1419,1	894,9
Tempo de evacuação [s]	1020,7	972,4	1251,0	1539,1	1014,9
Diferença do tempo de movimento em relação ao cenário EVAC.5.0 [s]	-	-48,3	230,4	518,4	-5,8
Diferença do tempo de movimento em relação ao cenário EVAC.5.0 [%]	-	-5 % ▼	+26 % ▲	+58 % ▲	-1 % ▼
Tempo máximo de congestionamento [s]	546,4	498,3	586,4	1166,3	566,7
Tempo médio de congestionamento [s]	182,9	176,6	183,6	304,1	182,6
Tempo máximo de congestionamento contínuo [s]	236,9	184,4	154,9	911,4	267,0
Tempo médio de congestionamento contínuo [s]	16,5	14,9	13,1	88,0	16,3

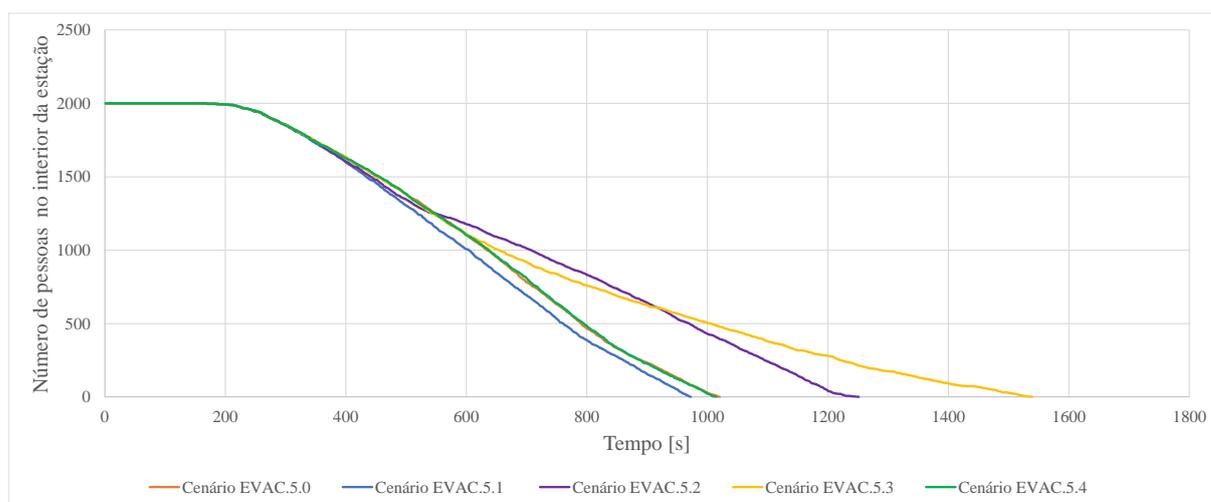


Figura 5.13 – Número de pessoas no interior da estação - Cenários EVAC.5.0 a EVAC.5.4

O tempo médio de congestionamento é semelhante ao analisado para os cenários EVAC.4.”x”, sendo este de cerca de 180 segundos (exceto no cenário EVAC.5.3). Este valor está de acordo com o esperado, uma vez que o número de pessoas presente na estação é o mesmo. Na Figura 5.14 observa-se que ocorre uma maior concentração de pessoas nas escadas de ligação do cais Oeste da Linha Verde ao nível superior, nas zonas das barreiras de controlo de acessos do lado da Linha Azul e na base da escada de acesso à Rua do Crucifixo, sendo visíveis níveis de congestionamento E (laranja).

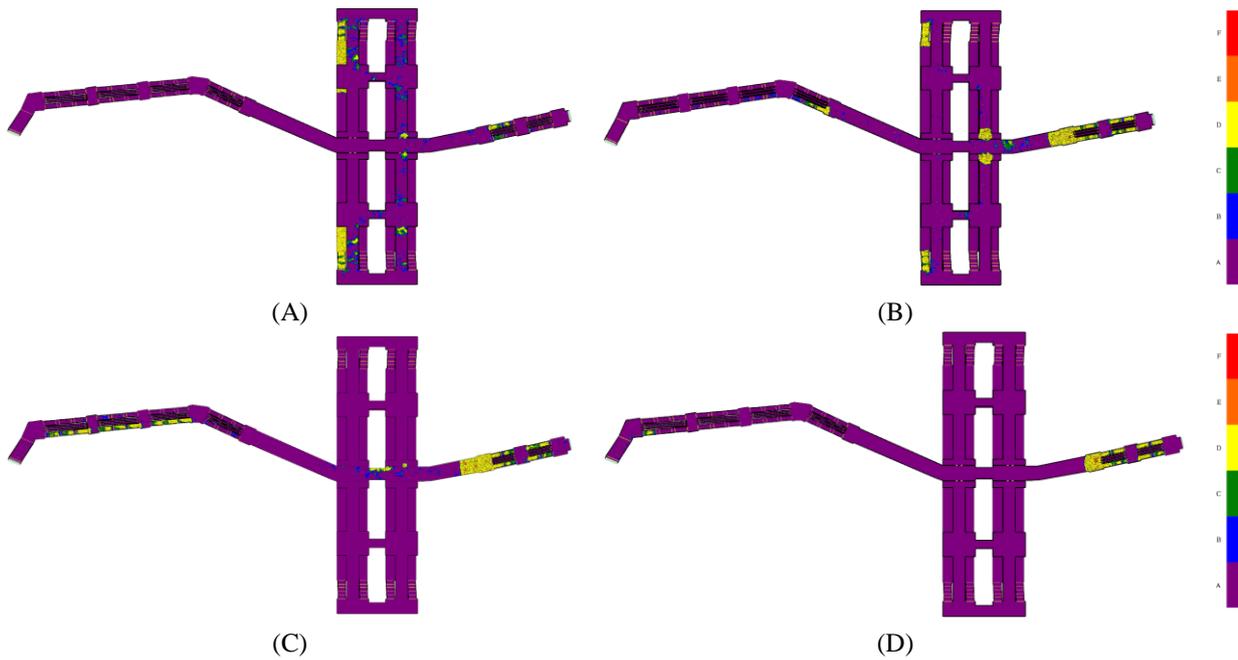


Figura 5.14 – Nível de serviço / congestionamento no nível superior da estação e acessos – Cenário EVAC.5.0: (A) aos 200 segundos / (B) aos 400 segundos / (C) aos 600 segundos / (D) aos 800 segundos

O aumento do efetivo presente na estação leva a uma utilização mais equilibrada das saídas, onde cerca de 21,5% dos ocupantes utiliza a saída do Largo do Chiado (no cenário EVAC.5.0), apesar da sua maior extensão e desnível (Figura 5.15-A). Esta utilização da saída do Largo do Chiado é ligeiramente superior ao verificado no cenário EVAC.4.0, apesar de o efetivo total ser o mesmo. O facto da maior concentração de pessoas ocorrer no cais Oeste da Linha Verde (mais próximo da saída do Largo do Chiado) explica a maior utilização desta saída. No que concerne ao tempo de evacuação das plataformas de embarque verifica-se que o mesmo é idêntico em todos os cenários.

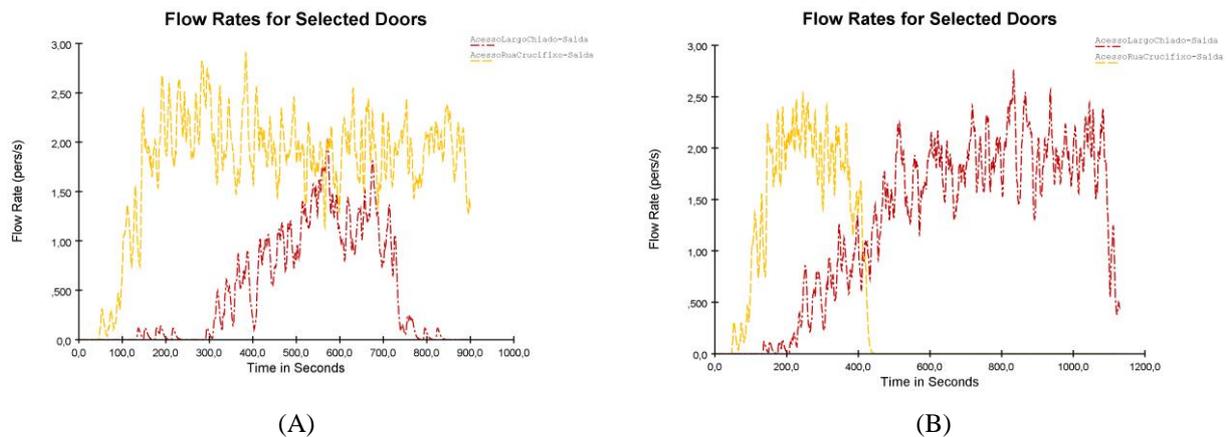


Figura 5.15 – Fluxo de pessoas em cada uma das saídas da estação: (A) no cenário EVAC.5.0 / (B) no cenário EVAC.5.2

Os tempos de evacuação do cenário EVAC.5.1, no qual os ocupantes podem utilizar as escadas rolantes (paradas) demonstram uma melhoria do tempo de evacuação (menos 5% de tempo, em comparação com o cenário EVAC.5.0). As escadas rolantes foram utilizadas por 247 ocupantes apesar de estas representarem uma redução na velocidade de progressão de subida. Apenas as escadas rolantes do lado da Rua do Crucifixo foram utilizadas, uma vez que o congestionamento neste acesso foi muito superior. Verifica-se, portanto, que as escadas rolantes permitiram melhorar a velocidade de saída dos ocupantes.

No cenário EVAC.5.2, os ocupantes que se encontram nos cais da Linha Verde foram forçados a utilizar a saída para o Largo do Chiado (Figura 5.15-B), simulando que os ocupantes irão seguir as direções indicadas na sinalética de saída presente na estação. Observou-se que os ocupantes demoram cerca de 26% mais tempo a sair da estação, quando comparados os resultados com o cenário EVAC.5.0. O tempo de evacuação é agravado neste cenário pelo facto de a maior parte do efetivo estar situado no cais Oeste da Linha Verde, sendo forçado a utilizar o acesso ao Largo do Chiado para sair (percurso mais moroso).

No cenário EVAC.5.4, com ocorrência de incêndio e com ativação do sistema de controlo de fumo, não se observou um agravamento dos tempos de evacuação. Por outro lado, no cenário EVAC.5.3 denota-se um agravamento do tempo de evacuação de 58% (em relação ao cenário EVAC.5.0), resultante da presença de níveis de densidade ótica de fumo suficientes para reduzir a velocidade dos ocupantes (ver equação 3.21).

Analisando também os níveis da dose efetiva fracionária (FED) no nível superior da estação, no final do tempo de simulação de cada cenário (Quadro 5.14) constata-se que os mesmos são residuais para o cenário EVAC.5.4, evidenciando a importância da existência do sistema de controlo de fumo. No caso do cenário EVAC.5.3 o valor máximo de FED excede largamente o valor de referência de 0,3 estabelecido pela norma ISO 13571 (ver Quadro 2.16). Deste modo prevê-se que entre 50% e 89% da população pudesse ficar incapacitada durante a evacuação.

Quadro 5.14 – Valor de FED, à cota de 2m do pavimento do nível superior no final do Tempo de Evacuação – Cenários EVAC.5.3 e EVAC.5.4

		Cenário	
		EVAC.5.3	EVAC.5.4
FED (média ± DP)	Linha Azul	2,57 ± 0,328	0,06 ± 0,033
	Linha Verde	2,10 ± 0,115	0,02 ± 0,011
FED máxima	Linha Azul	2,91	0,09
	Linha Verde	2,18	0,04

No cenário EVAC.5.0, o tempo médio de movimento da evacuação total foi de 504,3 segundos (Quadro 5.15). O tempo de evacuação dos indivíduos do género masculino foi 9% inferior ao da média geral, e para os indivíduos do género feminino foi 8% superior à média geral.

Em termos etários, os indivíduos de idade inferior a 30 anos apresentam sempre valores inferiores à média, para ambos os géneros. Estes resultados correspondem ao esperado, uma vez que os tempos de evacuação dependem diretamente da velocidade de movimento, que se considerou diferenciada por género e grupo etário.

Quadro 5.15 – Tempos de movimento por género e grupo etário para o cenário EVAC.5.0

Género	Grupo etário	Número de ocupantes presentes na estação [pessoas]	Tempo médio de movimento da evacuação [s]	Desvio padrão	Diferença em relação ao tempo médio de movimento da evacuação total [%]	Tempo médio de movimento da evacuação por género [s]	Diferença em relação ao tempo médio de movimento da evacuação total [%]
Masculino	< 30 anos	260	404,6	192,6	-20%	459,0	-9% ▼
	> 30 anos	440	450,8	200,1	-11%		
	< 50 anos						
	> 50 anos	260	521,7	218,1	3%		
Feminino	< 30 anos	260	489,1	210,1	-3%	544,3	+8% ▲
	> 30 anos	480	550,8	209,9	9%		
	< 50 anos						
	> 50 anos	300	592,9	186,4	18%		
Geral	Geral	2000	504,3	212,2	-	-	-

5.1.6 Cenários EVAC.6.”x”

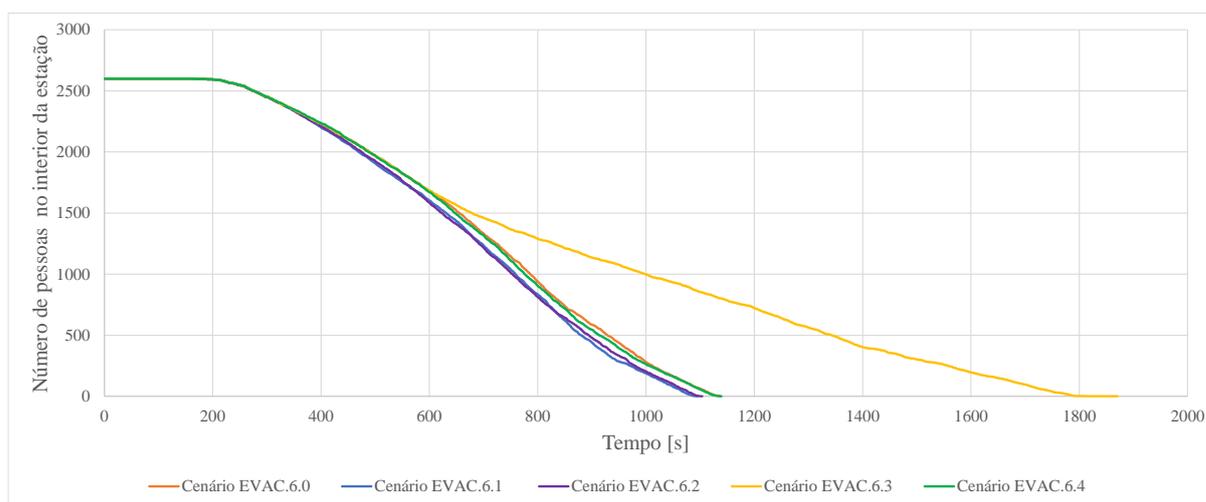
No Quadro 5.16 é apresentado um resumo dos resultados obtidos na simulação de evacuação dos Cenários EVAC.6.0 a EVAC.6.4, correspondentes a um período de ocupação elevada da estação e chegada de um comboio no cais Este da Linha Azul (2600 ocupantes no total).

Os tempos de evacuação obtidos nestas simulações apresentam valores da mesma ordem de grandeza em todos os cenários (com exceção do cenário EVAC.6.3).

Na Figura 5.16 pode observar-se a variação do número de ocupantes no interior da estação ao longo do período de simulação, destacando-se o cenário EVAC.6.3, que apresenta um tempo total de evacuação muito superior.

Quadro 5.16 – Resumo dos resultados da simulação de evacuação – Cenários EVAC.6.0 a EVAC.6.4

Cenário	EVAC.6.0	EVAC.6.1	EVAC.6.2	EVAC.6.3	EVAC.6.4
Tempo de pré-movimento [s]			120		
Tempo de movimento [s]	1016,5	975,3	983,6	1750,1	1019,2
Tempo de evacuação [s]	1136,5	1095,3	1103,6	1870,1	1139,2
Diferença do tempo de movimento em relação ao cenário EVAC.6.0 [s]	-	-41,2	-32,9	733,6	2,7
Diferença do tempo de movimento em relação ao cenário EVAC.6.0 [%]	-	-4 % ▼	-3 % ▼	+72 % ▲	0 %
Tempo máximo de congestionamento [s]	693,5	663,5	675,5	1506,8	693,8
Tempo médio de congestionamento [s]	217,2	209,5	214,9	426,8	212,8
Tempo máximo de congestionamento contínuo [s]	275,7	196,5	134,8	1240,2	252,5
Tempo médio de congestionamento contínuo [s]	19,5	18,8	15,5	126,0	19,9

**Figura 5.16** – Número de pessoas no interior da estação - Cenários EVAC.6.0 a EVAC.6.4

Em comparação com os cenários anteriores, nomeadamente com o cenário EVAC.4.”x” (que constituem um conjunto de cenários idênticos, mas correspondendo a um período de média ocupação da estação), os resultados evidenciam um aumento do tempo médio de congestionamento, sendo este de cerca de 210-215 segundos (exceto no cenário EVAC.6.3).

Na Figura 5.17 verifica-se que a maior concentração de pessoas ocorre nas escadas de ligação das várias plataformas ao nível superior, nas zonas dos canais de validação de títulos quer do lado da Linha Azul quer do lado da Linha Verde, e na base da escada de acesso à Rua do Crucifixo. São atingidos níveis de congestionamento E (laranja).

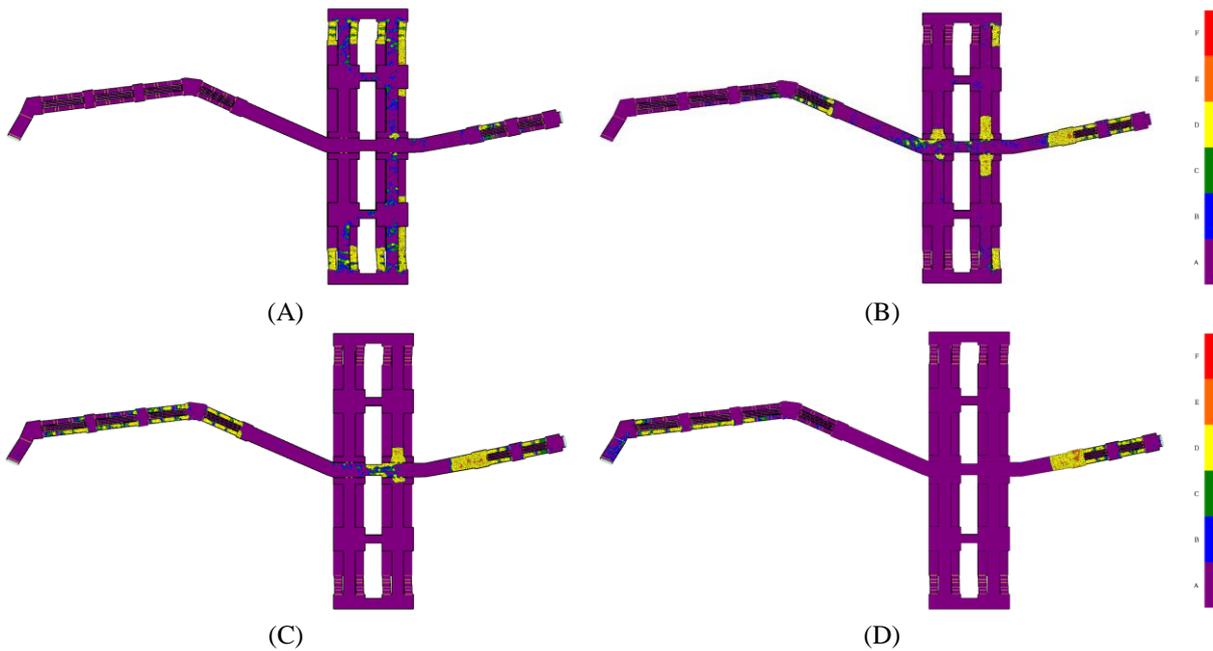


Figura 5.17 – Nível de serviço / congestionamento no nível superior da estação e acessos – Cenário EVAC.6.0: (A) aos 200 segundos / (B) aos 400 segundos / (C) aos 600 segundos / (D) aos 800 segundos

Tal como nos dois cenários anteriores, no cenário EVAC.6.0, verifica-se uma utilização mais equilibrada das saídas. Neste cenário o número de pessoas que utilizam a saída do Largo do Chiado aumenta, verificando-se que 30% do efetivo utiliza esta saída, apesar da sua maior extensão e desnível (Figura 5.18-A).

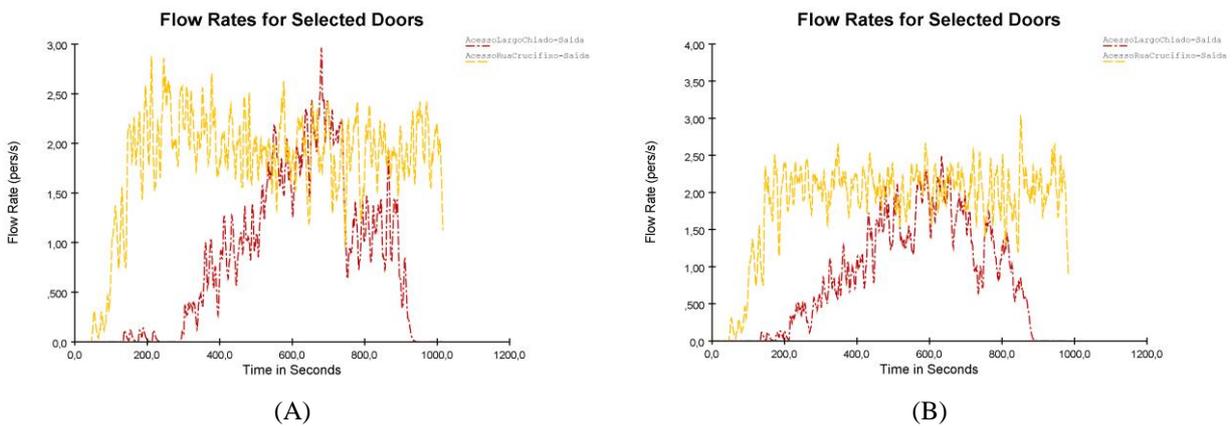


Figura 5.18 – Fluxo de pessoas em cada uma das saídas da estação: (A) no cenário EVAC.6.0 / (B) no cenário EVAC.6.2

Os resultados do cenário EVAC.6.1, no qual os ocupantes podem utilizar as escadas rolantes (paradas) demonstram uma redução do tempo de evacuação (menos 4% de tempo), correspondendo a 201 ocupantes que optaram por utilizar as escadas rolantes, na saída do lado da Rua do Crucifixo; verifica-se também que 15 ocupantes utilizaram as escadas rolantes do lado do Largo do Chiado. Os resultados indiciam que em períodos de maior ocupação da estação, a utilização das escadas rolantes pode constituir uma opção para evacuação, contribuindo para a redução do tempo total de evacuação.

No cenário EVAC.6.2, onde os ocupantes que se encontram nos cais da Linha Verde foram forçados a utilizar a saída para o Largo do Chiado (Figura 5.18-B), simulando que os ocupantes irão seguir as direções indicadas na sinalética de saída presente na estação. Observa-se uma redução de cerca de 3% no tempo necessário para os ocupantes saírem da estação (em relação ao cenário EVAC.6.0). De forma equivalente aos cenários EVAC.4.”x” verifica-se uma melhoria do tempo de evacuação. Este aspeto pode ser explicado pelo facto de, também neste cenário, a maior parte de o efetivo estar situado no cais Este da Linha Azul, portanto sairá forçosamente pelo acesso à Rua do Crucifixo (de forma mais célere).

Nos cenários com a ocorrência de incêndio, nomeadamente no cenário onde é ativada a desenfumagem (cenário EVAC.6.4) não se verifica um agravamento dos tempos de evacuação. No entanto, no cenário EVAC.6.3 observa-se um agravamento do tempo de evacuação de 72% (em relação ao cenário EVAC.6.0), resultante da presença de níveis de densidade ótica de fumo suficientes para reduzir a velocidade dos ocupantes (ver equação 3.21).

Analisando também os níveis da dose efetiva fracionária (FED) no nível superior da estação, no final do tempo de simulação de cada cenário (Quadro 5.17) constata-se que os mesmos são residuais para o cenário EVAC.6.4, evidenciando a importância da existência do sistema de controlo de fumo. No caso do cenário EVAC.6.3 o valor máximo de FED excede largamente o valor de referência de 0,3 (ISO, 2012), sendo previsível que a esmagadora maioria da população (mais de 89%) pudesse ficar incapacitada durante a evacuação.

Quadro 5.17 – Valor de FED, à cota de 2m do pavimento do nível superior no final do Tempo de Evacuação – Cenários EVAC.6.3 e EVAC.6.4

		Cenário	
		EVAC.6.3	EVAC.6.4
FED (média ± DP)	Linha Azul	4,53 ± 0,507	0,08 ± 0,042
	Linha Verde	3,83 ± 0,215	0,03 ± 0,015
FED máxima	Linha Azul	5,13	0,12
	Linha Verde	4,02	0,05

No cenário EVAC.6.0 o tempo médio de movimento da evacuação total foi de 573,5 segundos (Quadro 5.18). Os indivíduos do género masculino apresentam tempos de movimento 9% inferiores à média geral, enquanto no caso dos indivíduos do género feminino este valor é 8% superior ao tempo médio geral.

A nível etário, os indivíduos de idade inferior a 30 anos apresentam, em ambos os géneros, tempos de movimento inferiores à média. Estes resultados estão de acordo com o esperado, uma vez que estes resultados dependem diretamente da velocidade de movimento, que se considerou diferenciada por género e grupo etário.

Quadro 5.18 – Tempos de movimento por género e grupo etário para o cenário EVAC.6.0

Género	Grupo etário	Número de ocupantes presentes na estação [pessoas]	Tempo médio de movimento da evacuação [s]	Desvio padrão	Diferença em relação ao tempo médio de movimento da evacuação total [%]	Tempo médio de movimento da evacuação por género [s]	Diferença em relação ao tempo médio de movimento da evacuação total [%]
Masculino	< 30 anos	338	467	222,4	-19%	520,7	-9% ▼
	> 30 anos	572	528,1	224,8	-8%		
	< 50 anos	338	567,1	228,2	-1%		
	> 50 anos	338	549,7	242,5	-4%		
Feminino	< 30 anos	338	549,7	242,5	-4%	617,2	+8% ▲
	> 30 anos	624	623,5	236,7	9%		
	< 50 anos	390	678,3	212,2	18%		
Geral	Geral	2600	573,5	237,5	-	-	-

5.1.7 Cenários EVAC.7.”x”

No Quadro 5.19 é apresentado um resumo dos resultados obtidos na simulação de evacuação dos Cenários EVAC.7.0 a EVAC.7.4, correspondentes a um período de ocupação média da estação e chegada de dois comboios, um no cais Este da Linha Azul e outro no cais Oeste da Linha Verde (3000 ocupantes no total).

Constata-se que o tempo de evacuação apresenta valores da mesma ordem de grandeza em todos os cenários, em torno de 1150-1250 segundos, com exceção do cenário EVAC.7.3 onde este tempo é de cerca de 2000 segundos. Na Figura 5.19 é visível que a saída do número de ocupantes é muito mais demorada no cenário EVAC.7.3.

Quadro 5.19 – Resumo dos resultados da simulação de evacuação – Cenários EVAC.7.0 a EVAC.7.4

Cenário	EVAC.7.0	EVAC.7.1	EVAC.7.2	EVAC.7.3	EVAC.7.4
Tempo de pré-movimento [s]			120		
Tempo de movimento [s]	1049,0	1018,6	1129,4	1888,9	1045,9
Tempo de evacuação [s]	1169,0	1138,6	1249,4	2008,9	1165,9
Diferença do tempo de movimento em relação ao cenário EVAC.7.0 [s]	-	-30,4	80,4	839,9	-3,1
Diferença do tempo de movimento em relação ao cenário EVAC.7.0 [%]	-	-3 % ▼	+8 % ▲	+80 % ▲	0 %
Tempo máximo de congestionamento [s]	733,8	701,7	594,1	1671,0	736,4
Tempo médio de congestionamento [s]	248,5	237,1	232,8	555,4	249,7
Tempo máximo de congestionamento contínuo [s]	328,5	269,5	114,2	1371,2	282,9
Tempo médio de congestionamento contínuo [s]	19,5	18,4	15,0	176,7	19,7

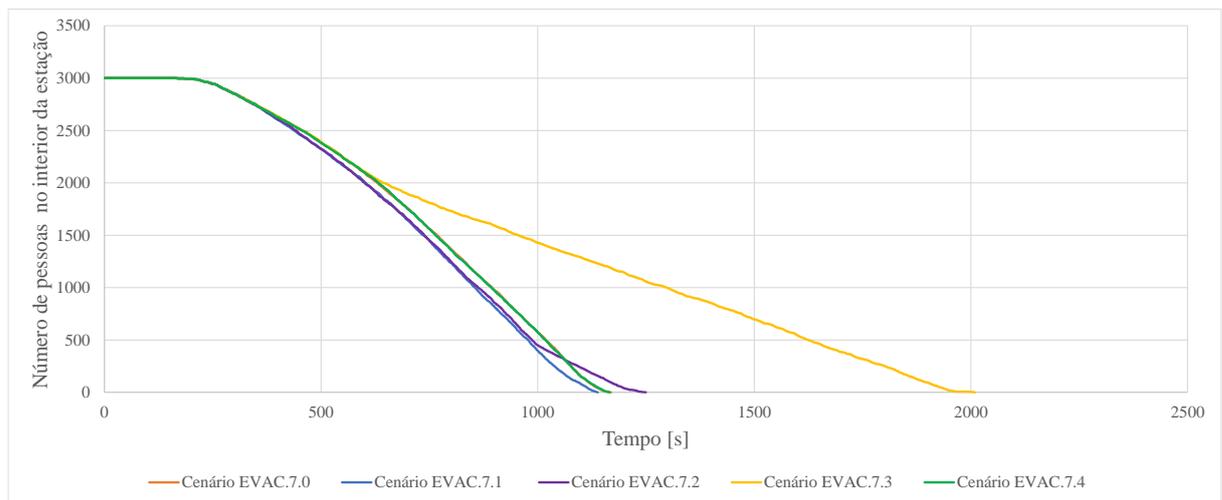


Figura 5.19 – Número de pessoas no interior da estação - Cenários EVAC.7.0 a EVAC.7.4

O tempo médio de congestionamento foi de cerca de 230-250 segundos em todos os cenários (exceto no cenário EVAC.7.3, que foi de 555 segundos). Este valor constitui um aumento em comparação com os cenários anteriores, que está associado ao aumento do número de ocupantes presentes na estação. Este aumento do tempo médio de congestionamento ocorre devido a uma maior concentração de pessoas nas escadas de ligação das várias plataformas ao nível superior, nas zonas das barreiras de controlo de acessos e de ambos os lados da estação e na base da escada de acesso à Rua do Crucifixo (Figura 5.20), sendo atingidos níveis de congestionamento E (laranja).

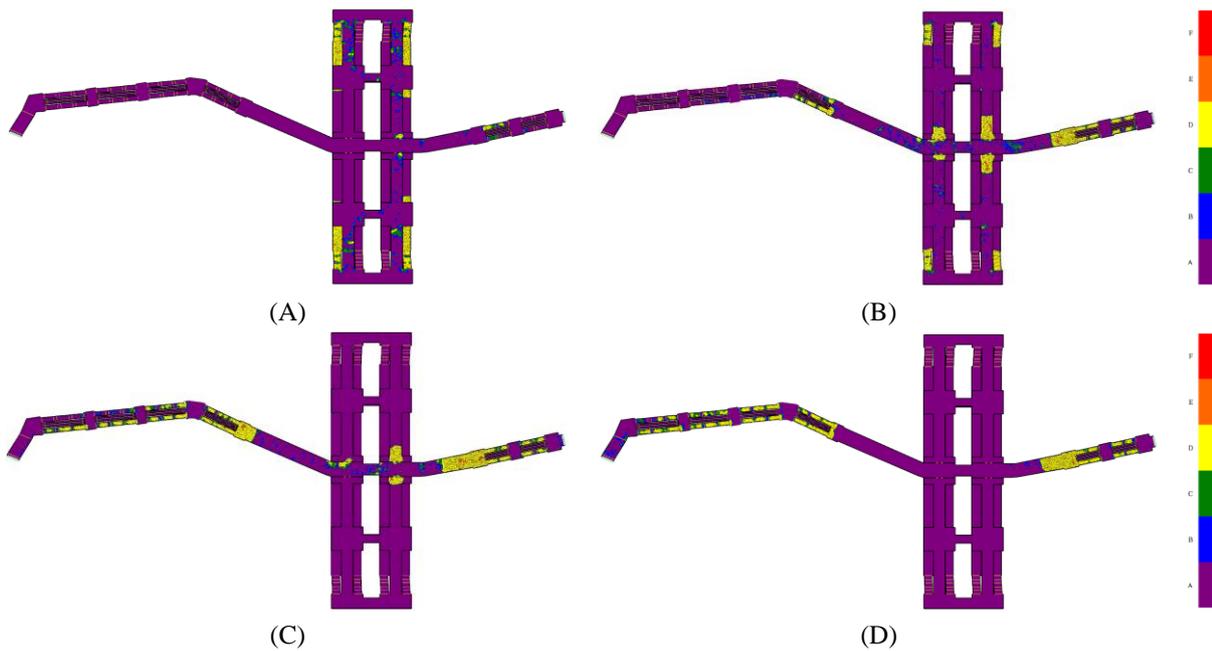


Figura 5.20 – Nível de serviço / congestionamento no nível superior da estação e acessos – Cenário EVAC.7.0: (A) aos 200 segundos / (B) aos 400 segundos / (C) aos 600 segundos / (D) aos 800 segundos

Acompanhando o aumento progressivo da utilização da saída Largo do Chiado (verificado nos cenários anteriores), no cenário EVAC.7.0 observa-se uma utilização relativamente equilibrada das saídas disponíveis. Cerca de 38% dos ocupantes utilizaram a saída do Largo do Chiado, apesar da sua maior extensão e desnível (Figura 5.21-A). Este facto representa um ligeiro aumento em relação aos cenários anteriores, estando relacionado com o aumento do efetivo da estação.

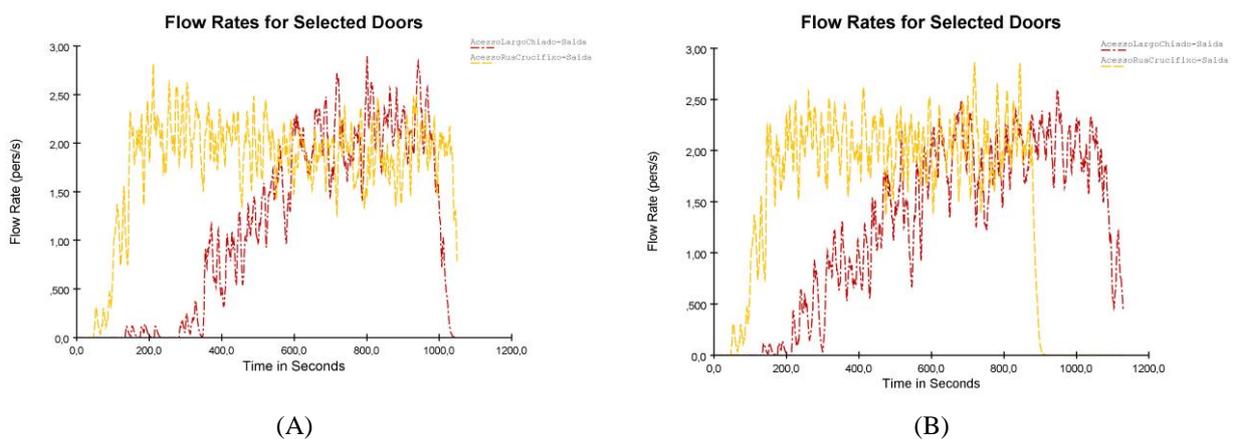


Figura 5.21 – Fluxo de pessoas em cada uma das saídas da estação: (A) no cenário EVAC.7.0 / (B) no cenário EVAC.7.2

Os resultados do cenário EVAC.7.1, no qual os ocupantes podem utilizar as escadas rolantes (paradas) demonstram uma melhoria do tempo de evacuação (menos 3% de tempo). Este acontecimento corresponde a 219 ocupantes que optaram por utilizar as escadas rolantes, na saída do lado da Rua do Crucifixo e a 21 ocupantes que utilizaram as escadas rolantes do lado do Largo do Chiado. Deste modo, quando a ocupação da estação é maior, a utilização das escadas rolantes na evacuação pode reduzir ligeiramente o tempo de progressão individual, e pode reduzir o tempo total de evacuação, embora a diferença não seja muito marcante.

No cenário EVAC.7.2, os ocupantes que se encontram nos cais da Linha Verde foram forçados a utilizar a saída para o Largo do Chiado (Figura 5.21-B), simulando que os ocupantes irão seguir as direções indicadas na sinalética de saída presente na estação. Observa-se que o tempo total para abandonar a estação aumenta cerca de 8%, quando comparados os resultados com o cenário EVAC.7.0. Neste cenário, as plataformas com maior número de pessoas estão situadas no cais Oeste da Linha Verde, portanto um maior número de pessoas sairá forçosamente pelo acesso ao Largo do Chiado. Este facto é evidenciado na Figura 5.21-B, onde é visível que a saída do Largo do Chiado continua a ser utilizada depois da evacuação terminar no lado da Rua do Crucifixo, traduzindo-se assim numa evacuação mais demorada.

No que diz respeito aos cenários com a ocorrência de incêndio, o tempo de evacuação no cenário EVAC.7.4 (onde é ativada a desenfumagem) é idêntico ao do cenário EVAC.7.0. No cenário EVAC.7.3 denota-se um agravamento de cerca de 80%, em relação ao tempo de movimento do cenário EVAC.7.0, resultante da presença de níveis de densidade ótica de fumo elevados. Estes são suficientes para reduzir a velocidade dos ocupantes (ver capítulo 3.3.1.6).

Os níveis da dose efetiva fracionária (FED) no nível superior da estação, no final do tempo de simulação de cada cenário (Quadro 5.20) são residuais para o cenário EVAC.7.4 (mesmo o valor máximo, correspondente à zona mais próxima do incêndio, permanece abaixo do valor de referência). No cenário EVAC.7.3 o valor máximo de FED excede largamente o valor de referência de 0,3. Segundo os valores apresentados no Quadro 2.16, seria previsível que mais de 89% dos ocupantes pudesse ficar incapacitados durante a evacuação.

Quadro 5.20 – Valor de FED, à cota de 2m do pavimento do nível superior no final do Tempo de Evacuação – Cenários EVAC.7.3 e EVAC.7.4

		Cenário	
		EVAC.7.3	EVAC.7.4
FED (média ± DP)	Linha Azul	5,49 ± 0,589	0,08 ± 0,044
	Linha Verde	4,69 ± 0,266	0,03 ± 0,016
FED máxima	Linha Azul	6,21	0,12
	Linha Verde	4,93	0,05

No cenário EVAC.7.0 o tempo médio de movimento da evacuação total foi de 622,8 segundos (Quadro 5.21). Os indivíduos do género masculino apresentam tempos 6% inferiores à média geral e os indivíduos do género feminino 5% superiores à média geral. Os valores mostram que com o aumento do número de ocupantes da estação, e consequentemente aumento dos tempos de congestionamento, a diferença dos tempos médios de movimento, entre géneros, reduz consideravelmente.

Observa-se também que os indivíduos de idade inferior a 30 anos apresentam tempos de movimento inferiores à média em ambos os géneros. Estes resultados estão de acordo com o esperado, uma vez que se considerou uma velocidade de movimento diferenciada por género e grupo etário. No entanto, sugerem também que o número total de ocupantes é o principal fator a influenciar o tempo de movimento, uma vez que à medida que aumenta o efetivo as diferenças etárias e de género são esbatidas.

Quadro 5.21 – Tempos de movimento por género e grupo etário para o cenário EVAC.7.0

Género	Grupo etário	Número de ocupantes presentes na estação [pessoas]	Tempo médio de movimento da evacuação [s]	Desvio padrão	Diferença em relação ao tempo médio de movimento da evacuação total [%]	Tempo médio de movimento da evacuação por género [s]	Diferença em relação ao tempo médio de movimento da evacuação total [%]
Masculino	< 30 anos	390	534,1	252,9	-14%	587,6	-6% ▼
	> 30 anos	660	583,8	253,1	-6%		
	< 50 anos	390	645	252,3	4%		
	> 50 anos	390	602,2	256,9	-3%		
Feminino	< 30 anos	720	653	244,9	5%	654,1	+5% ▲
	> 30 anos	450	707	216,3	14%		
	< 50 anos						
	> 50 anos						
Geral	Geral	3000	622,8	251,9	-	-	-

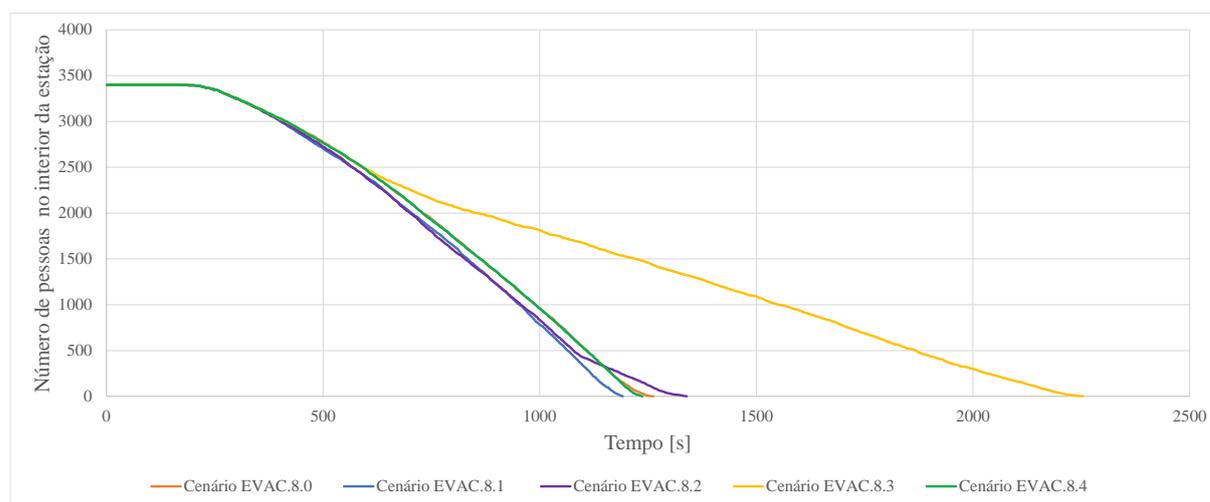
5.1.8 Cenários EVAC.8."x"

No Quadro 5.22 é apresentado um resumo dos resultados obtidos na simulação de evacuação dos Cenários EVAC.8.0 a EVAC.8.4, correspondentes a um período de ocupação elevada da estação e chegada de dois comboios, um no cais Este da Linha Azul e outro no cais Oeste da Linha Verde (3400 ocupantes no total).

O tempo de evacuação apresenta valores da mesma ordem de grandeza em todos os cenários analisados, em torno de 1200-1300 segundos. Exceção feita no caso do cenário EVAC.8.3, em que o tempo de evacuação ascende para cerca de 2250 segundos. Na Figura 5.22 verifica-se que a taxa de saída dos ocupantes, ao longo do período de simulação, é muito menor no cenário EVAC.8.3.

Quadro 5.22 – Resumo dos resultados da simulação de evacuação – Cenários EVAC.8.0 a EVAC.8.4

Cenário	EVAC.8.0	EVAC.8.1	EVAC.8.2	EVAC.8.3	EVAC.8.4
Tempo de pré-movimento [s]			120		
Tempo de movimento [s]	1142,4	1071,6	1219,4	2133,7	1116,5
Tempo de evacuação [s]	1262,4	1191,6	1339,4	2253,7	1236,5
Diferença do tempo de movimento em relação ao cenário EVAC.8.0 [s]	-	-70,8	77,1	991,4	-25,8
Diferença do tempo de movimento em relação ao cenário EVAC.8.0 [%]	-	-6 % ▼	+7 % ▲	+87 % ▲	-2 % ▼
Tempo máximo de congestionamento [s]	838,7	737,6	679,4	1961,3	836,5
Tempo médio de congestionamento [s]	275,7	262,7	270,9	649,0	273,4
Tempo máximo de congestionamento contínuo [s]	350,9	227,1	166,6	1703,9	238,6
Tempo médio de congestionamento contínuo [s]	21,9	20,0	15,7	223,1	20,8

**Figura 5.22** – Número de pessoas no interior da estação - Cenários EVAC.8.0 a EVAC.8.4

O tempo médio de congestionamento é de cerca de 260-275 segundos (exceto no cenário EVAC.8.3, que é de cerca de 650 segundos). Isto representa um aumento em comparação com os cenários anteriores, nomeadamente em relação aos cenários EVAC.7.”x”, idênticos a estes, mas com uma ocupação média da estação (em vez de elevada).

Na Figura 5.23 verifica-se uma maior concentração de pessoas, e conseqüentemente um maior congestionamento, nas escadas de ligação das várias plataformas ao nível superior, nas zonas dos canais de validação de títulos e de ambos os lados da estação e na base da escada de acesso à Rua do Crucifixo, atingindo níveis de congestionamento E (laranja).

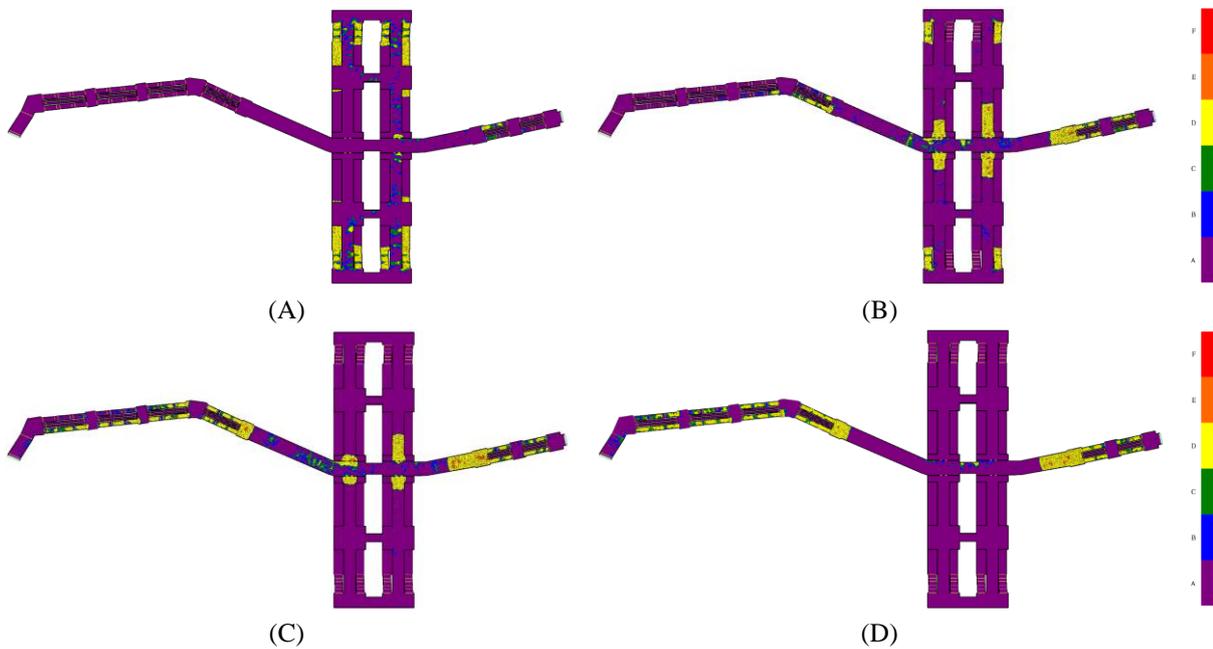


Figura 5.23 – Nível de serviço / congestionamento no nível superior da estação e acessos – Cenário EVAC.8.0: (A) aos 200 segundos / (B) aos 400 segundos / (C) aos 600 segundos / (D) aos 800 segundos

Tal como nos cenários anteriores, no cenário EVAC.8.0, verifica-se uma utilização mais equilibrada das saídas, ocorrendo inclusivamente um ligeiro aumento do número de ocupantes (cerca de 40%) que utilizam a saída do Largo do Chiado, apesar da sua maior extensão e desnível (Figura 5.24-A).

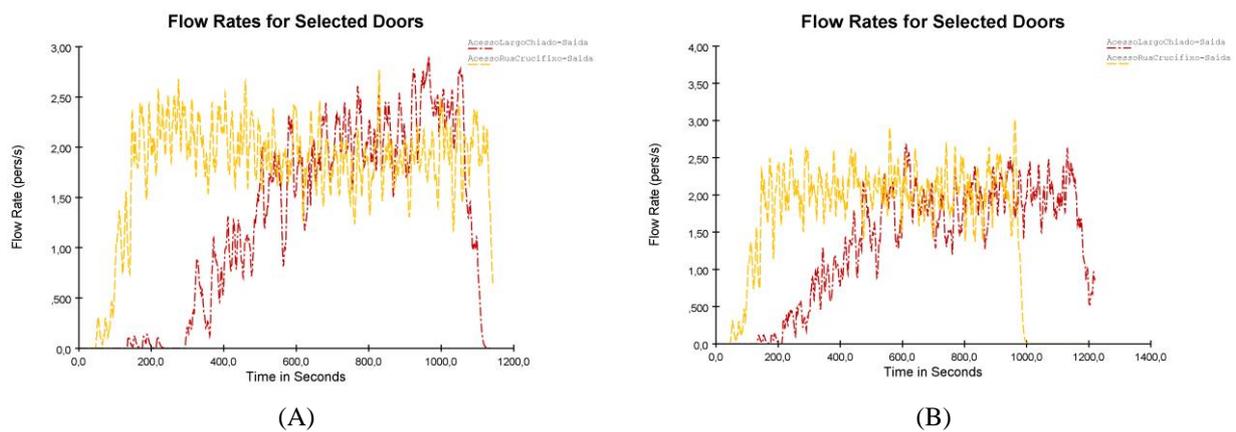


Figura 5.24 – Fluxo de pessoas em cada uma das saídas da estação: (A) no cenário EVAC.8.0 / (B) no cenário EVAC.8.2

Os resultados do cenário EVAC.8.1, no qual os ocupantes podem utilizar as escadas rolantes (paradas) mostram uma melhoria do tempo de evacuação, sendo este 6% ao observado no cenário EVAC.8.0. Esta redução está associada à utilização, por 249 indivíduos, das escadas rolantes na saída do lado da Rua do Crucifixo, e por 27 ocupantes, das escadas rolantes do lado do Largo do Chiado. Os resultados indicam que em situações de maior ocupação da estação, em que se verificam elevados congestionamentos na base das escadas que dão acesso ao exterior, a utilização das escadas rolantes por parte dos ocupantes pode levar a uma redução relevante do tempo de evacuação.

No cenário EVAC.8.2, os ocupantes irão seguir as direções indicadas na sinalética de saída presente na estação, isto é, os indivíduos que se encontram nos cais da Linha Verde foram forçados a utilizar a saída para o Largo do Chiado (Figura 5.24-B). Esta condicionante levou a que o tempo necessário para os ocupantes saírem da estação fosse cerca de 7% superior (em relação ao cenário EVAC.8.0). Este agravamento pode ser explicado pelo facto de uma das plataformas com maior ocupação de pessoas estar situada no cais Oeste da Linha Verde, portanto sairá forçosamente pelo acesso ao Largo do Chiado (de forma mais demorada), tendo em conta o comportamento definido neste cenário.

No cenário EVAC.8.4, onde é considerada a ocorrência de um incêndio, seguida da ativação da desenfumagem, não se verifica um agravamento do tempo de evacuação (em relação ao cenário base, EVAC.8.0). Por outro lado, no cenário EVAC.8.3 denota-se um agravamento do tempo de evacuação de 87%, resultante da presença de níveis de densidade ótica de fumo suficientes para reduzir a velocidade dos ocupantes (descrito em pormenor no capítulo 3.3.1.6). Os níveis da dose efetiva fracionária (FED) no nível superior da estação, no final do tempo de simulação de cada cenário (Quadro 5.23) são residuais para o cenário EVAC.8.4 (mesmo o valor máximo, correspondente à zona mais próxima do incêndio, permanece abaixo do valor máximo de referência). Por outro lado, o valor de referência de 0,3 (ISO, 2012) é largamente excedido no cenário EVAC.8.3. Prevê-se que mais de 89% dos ocupantes pudesse ficar incapacitada durante a evacuação.

Quadro 5.23 – Valor de FED, à cota de 2m do pavimento do nível superior no final do Tempo de Evacuação – Cenários EVAC.8.3 e EVAC.8.4

		Cenário	
		EVAC.8.3	EVAC.8.4
FED (média ± DP)	Linha Azul	7,49 ± 0,753	0,09 ± 0,050
	Linha Verde	6,47 ± 0,374	0,04 ± 0,018
FED máxima	Linha Azul	8,45	0,14
	Linha Verde	6,84	0,06

O tempo médio de movimento da evacuação total foi de 669,9 segundos no cenário EVAC.8.0 (Quadro 5.24). Observou-se que, em relação ao tempo médio geral, os indivíduos do género masculino apresentam valores 5% inferiores, enquanto os indivíduos do género feminino registaram um tempo médio 5% superior à média geral. Os resultados mostram que o aumento do número de ocupantes da estação, e consequente aumento dos tempos de congestionamento, leva a que a diferença dos tempos médios de movimento, entre géneros, reduza consideravelmente.

A nível etário, observou-se que os indivíduos de idade inferior a 30 anos apresentam tempos de movimento inferiores à média global, em ambos os géneros. Estes resultados estão de acordo com o esperado, uma vez que o tempo de movimento depende diretamente da velocidade de movimento, parâmetro que considerou no modelo de evacuação de forma diferenciada por género e grupo etário.

Quadro 5.24 – Tempos de movimento por género e grupo etário para o cenário EVAC.8.0

Género	Grupo etário	Número de ocupantes presentes na estação [pessoas]	Tempo médio de movimento da evacuação [s]	Desvio padrão	Diferença em relação ao tempo médio de movimento da evacuação total [%]	Tempo médio de movimento da evacuação por género [s]	Diferença em relação ao tempo médio de movimento da evacuação total [%]
Masculino	< 30 anos	442	591,7	286,7	-12%	634,1	-5% ▼
	> 30 anos	748	627,9	276,5	-6%		
	< 50 anos	442	682,6	276,6	2%		
	> 50 anos	442	644	283,5	-4%		
Feminino	> 30 anos	816	702,4	269,2	5%	701,6	+5% ▲
	< 50 anos	510	758,5	233,7	13%		
	> 50 anos	510	758,5	233,7	13%		
Geral	Geral	3400	669,9	276,1	-	-	-

5.1.9 Cenários EVAC.9.”x”

No Quadro 5.25 é apresentado um resumo dos resultados obtidos na simulação de evacuação dos Cenários EVAC.9.0 a EVAC.9.4, correspondentes a um período de ocupação média da estação e chegada de quatro comboios (5000 ocupantes no total).

Os tempos de evacuação registados apresentam valores da mesma ordem de grandeza em todos os cenários, em torno dos 1600-1700 segundos (com exceção do cenário EVAC.9.3, que foi de cerca de 3350 segundos). No que se refere à taxa de saída dos ocupantes é visível, na Figura 5.25, o ritmo mais lento verificado no cenário EVAC.9.3.

Quadro 5.25 – Resumo dos resultados da simulação de evacuação – Cenários EVAC.9.0 a EVAC.9.4

Cenário	EVAC.9.0	EVAC.9.1	EVAC.9.2	EVAC.9.3	EVAC.9.4
Tempo de pré-movimento [s]			120		
Tempo de movimento [s]	1523,6	1474,8	1591,1	3236,5	1509,2
Tempo de evacuação [s]	1643,6	1594,8	1711,1	3356,5 (*)	1629,2
Diferença do tempo de movimento em relação ao cenário EVAC.9.0 [s]	-	-48,8	67,5	1712,9	-14,4
Diferença do tempo de movimento em relação ao cenário EVAC.9.0 [%]	-	-3 % ▼	+4 % ▲	+112% ▲	-1 % ▼
Tempo máximo de congestionamento [s]	1190,8	1109,2	1066,2	3065,7	1233,5
Tempo médio de congestionamento [s]	436,6	412,8	439,6	1128,1	435,8
Tempo máximo de congestionamento contínuo [s]	307,9	321,9	213,0	2814,9	305,1
Tempo médio de congestionamento contínuo [s]	24,2	22,3	18,3	422,2	23,8

Nota: (*) Devido ao elevado tempo de processamento da simulação de incêndio, só foi possível integrar na simulação de evacuação 2850 segundos da simulação de incêndio.

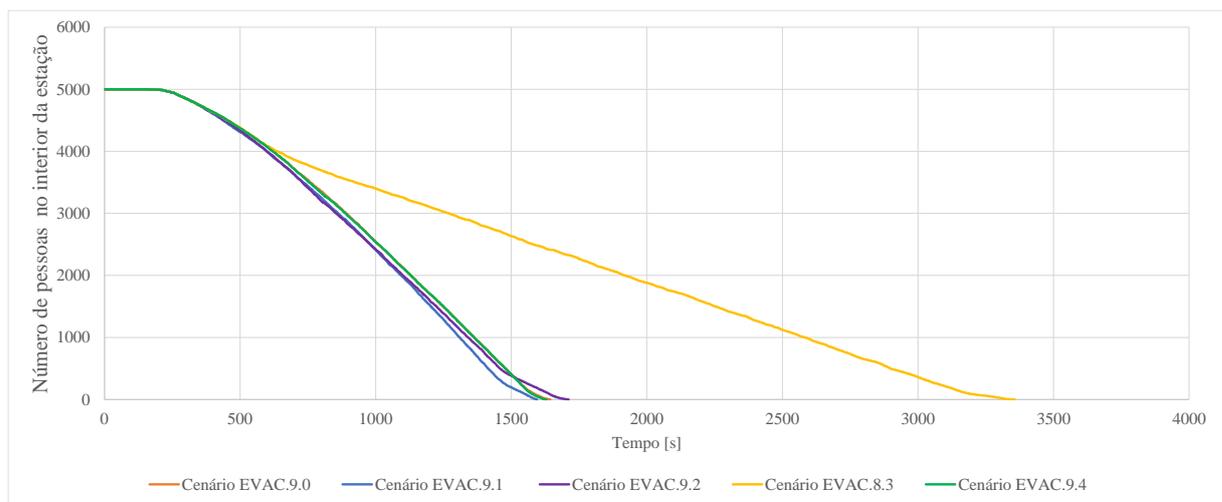


Figura 5.25 – Número de pessoas no interior da estação - Cenários EVAC.9.0 a EVAC.9.4

O tempo médio de congestionamento registado para os cenários EVAC.9.”x” foi de cerca de 410-435 segundos, exceto no cenário EVAC.9.3, em que foi muito maior, sendo superior a 1100 segundos. A máxima concentração de pessoas ocorre nas escadas de ligação das várias plataformas ao nível superior, nas zonas das barreiras de controlo de acessos, de ambos os lados da estação e na base da escada de acesso à Rua do Crucifixo, atingindo-se níveis de congestionamento E (laranja) (Figura 5.26).

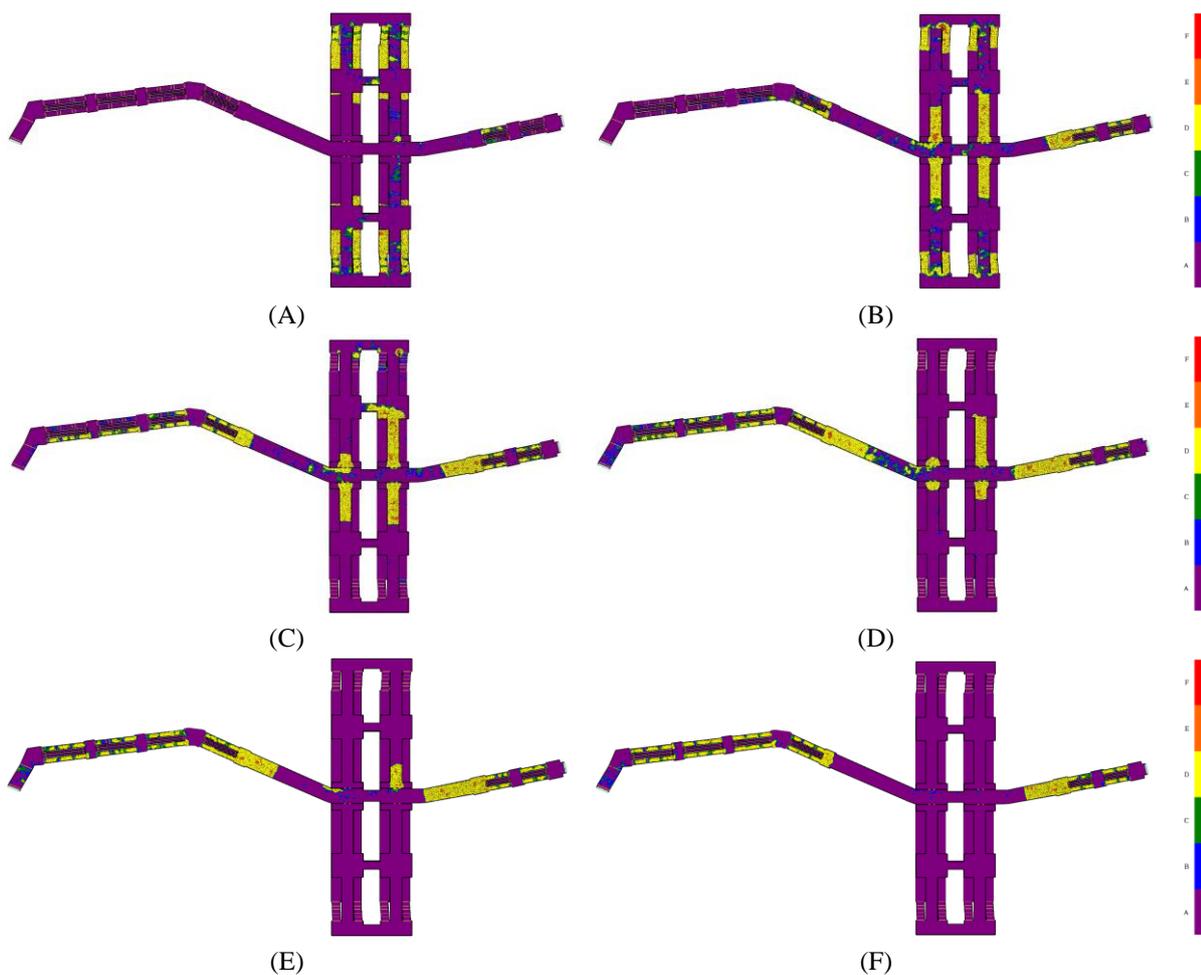


Figura 5.26 – Nível de serviço / congestionamento no nível superior da estação e acessos – Cenário EVAC.9.0: (A) aos 200 segundos / (B) aos 400 segundos / (C) aos 600 segundos / (D) aos 800 segundos / (E) aos 1000 segundos / (F) aos 1200 segundos

No cenário EVAC.9.0, tal como nos cenários anteriores, associado ao aumento do efetivo, verificou-se um aumento da utilização da saída do Largo do Chiado. Cerca de 44% dos ocupantes utilizaram a saída do Largo do Chiado, apesar da sua maior extensão e desnível (Figura 5.27-A).

No cenário EVAC.9.1, os ocupantes podem utilizar as escadas rolantes (paradas) o que resulta numa redução de 3% do tempo de evacuação (em comparação com o cenário EVAC.9.0). Esta redução é resultado dos 322 ocupantes que optaram por utilizar as escadas rolantes, na saída do lado da Rua do Crucifixo, e dos 41 ocupantes que utilizaram as escadas rolantes do lado do Largo do Chiado. Os resultados sugerem que a utilização das escadas rolantes pode contribuir para reduzir ligeiramente o tempo de evacuação, embora neste caso de forma não muito significativa.

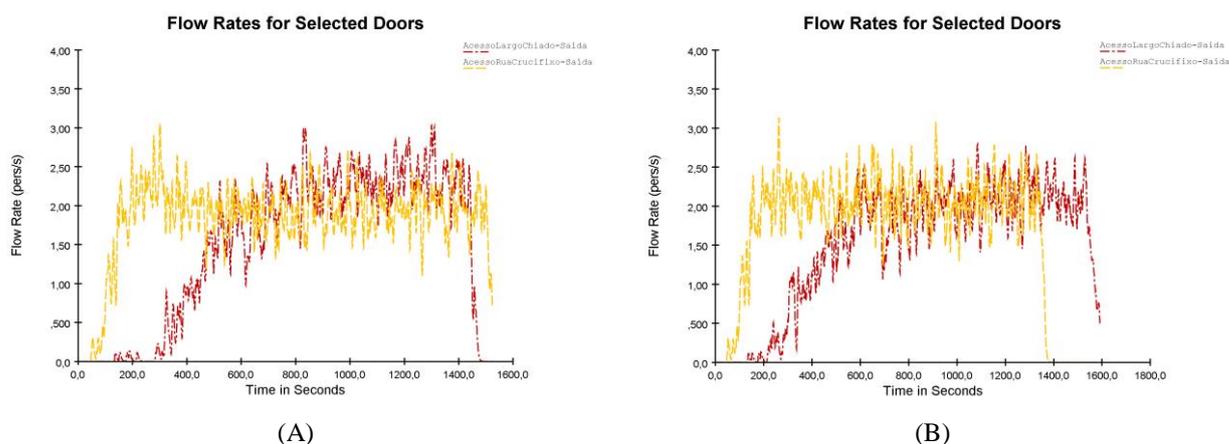


Figura 5.27 – Fluxo de pessoas em cada uma das saídas da estação:
(A) no cenário EVAC.9.0 / (B) no cenário EVAC.9.2

No cenário EVAC.9.2, os ocupantes irão seguir as direções indicadas na sinalética de saída presente na estação, isto é, os indivíduos que se encontram nos cais da Linha Verde foram forçados a utilizar a saída para o Largo do Chiado (Figura 5.27-B). O tempo de saída da estação é 4% superior (em comparação com o cenário EVAC.9.0). Seguindo a tendência verificada nos cenários anteriores, com o aumento do número de ocupantes da estação, esta diferença tem sido reduzida, uma vez que o número de pessoas é muito elevado em todas as plataformas (correspondendo ao maior efetivo analisado neste trabalho).

No que diz respeito aos cenários com a ocorrência de incêndio não se verifica um agravamento dos tempos de evacuação no cenário EVAC.9.4 (onde é ativada a desenfumagem), mas no cenário EVAC.9.3 denota-se um agravamento do tempo de evacuação de 112% (em relação ao cenário EVAC.9.0), resultante da presença de níveis de densidade ótica de fumo suficientes para reduzir a velocidade dos ocupantes (ver capítulo 3.3.1.6). Estima-se que a diferença viesse a ser consideravelmente superior, no entanto, devido a limitações relacionadas com o tempo de processamento da simulação de incêndio, não foi possível integrar na simulação de evacuação um tempo superior a 2850 segundos da simulação de incêndio.

Analisando os níveis da dose efetiva fracionária (FED) no nível superior da estação, no final do tempo de simulação de cada cenário (Quadro 5.26), constata-se que os mesmos são residuais (em termos médios) para o cenário EVAC.9.4 (o valor máximo, correspondente à zona mais próxima do incêndio, é já próximo do valor máximo de referência). No cenário EVAC.9.3 o valor máximo de FED excede largamente o valor de referência de 0,3 (ISO, 2012). Segundo o indicado na norma ISO 13571 (Quadro 2.16) estima-se que a esmagadora maioria da população (mais de 89%) pudesse ficar incapacitada durante a evacuação.

Quadro 5.26 – Valor de FED, à cota de 2m do pavimento do nível superior no final do Tempo de Evacuação – Cenários EVAC.9.3 e EVAC.9.4

		Cenário	
		EVAC.9.3 (*)	EVAC.9.4
FED (média ± DP)	Linha Azul	13,74 ± 1,254	0,16 ± 0,088
	Linha Verde	12,11 ± 0,727	0,06 ± 0,035
FED máxima	Linha Azul	15,46	0,24
	Linha Verde	12,90	0,10

Nota: (*) Devido ao elevado tempo de processamento da simulação de incêndio os valores de FED apresentados correspondem aos verificados aos 2850 segundos (final da simulação de incêndio).

No cenário EVAC.9.0, o tempo médio de movimento da evacuação total é de 868,3 segundos (Quadro 5.27). Observa-se que, em relação ao tempo médio geral, os indivíduos do género masculino apresentam valores 2% inferiores, enquanto os indivíduos do género feminino registam valores 2% superiores.

Os resultados mostram que com o aumento do número de ocupantes da estação, e consequentemente dos tempos de congestionamento, a diferença dos tempos médios de movimento, entre géneros, reduz, tornando-se quase residual neste cenário. Verifica-se também que os indivíduos de idade inferior a 30 anos, de ambos os sexos, apresentam tempos de movimento inferiores à média geral. Estes resultados correspondem ao esperado uma vez que estes resultados dependem diretamente da velocidade de movimento, que se considerou diferenciada por género e grupo etário.

Quadro 5.27 – Tempos de movimento por género e grupo etário para o cenário EVAC.9.0

Género	Grupo etário	Número de ocupantes presentes na estação [pessoas]	Tempo médio de movimento da evacuação [s]	Desvio padrão	Diferença em relação ao tempo médio de movimento da evacuação total [%]	Tempo médio de movimento da evacuação por género [s]	Diferença em relação ao tempo médio de movimento da evacuação total [%]
Masculino	< 30 anos	650	811,3	399,2	-7%	850,0	-2% ▼
	> 30 anos	1100	838,4	382,8	-3%		
	< 50 anos	650	900,4	375,9	4%		
	> 50 anos	650	842,5	381,8	-3%		
Feminino	> 30 anos	1200	884,2	357,1	2%	885,7	+2% ▲
	< 50 anos	750	930,5	333,9	7%		
	> 50 anos	750	930,5	333,9	7%		
Geral	Geral	5000	868,3	372,9	-	-	-

5.2 Influência do número de ocupantes na estação

No Quadro 5.28 é apresentado um resumo dos resultados da simulação para os cenários EVAC.”y”.0 (onde o “y” diz respeito a cada um dos conjuntos de cenários referidos no Quadro 3.10), correspondendo à variação do número de ocupantes da estação e também da sua localização. Em todos estes cenários considerou-se apenas a evacuação numa situação de emergência, sem ocorrência de incêndio, e onde os ocupantes podem escolher a saída que for mais vantajosa (de acordo com os procedimentos especificados no capítulo 3.3.1), e não podem utilizar as escadas rolantes.

Os resultados mostram que o aumento do número de ocupantes da estação leva ao aumento do tempo de movimento (e conseqüentemente também do tempo de evacuação). No entanto, o maior aumento verifica-se ao nível dos tempos de congestionamento (máximo e médio), isto é, o tempo correspondente ao período em que os ocupantes se movem a uma velocidade inferior à velocidade de congestionamento definida no programa de simulação (neste caso, foi utilizado o valor de referência de 0,25 m/s).

Quadro 5.28 – Resumo dos tempos de evacuação – Cenários EVAC.”y”.0

	Cenários				
	EVAC.1.0	EVAC.2.0	EVAC.3.0	EVAC.4.0	EVAC.5.0
Número de ocupantes da estação	500	1000	1800	2000	2000
Tempo de pré-movimento [s]			120		
Tempo de movimento [s]	405,2	605,5	824,6	921,2	900,7
Tempo de evacuação [s]	525,2	725,5	944,6	1041,2	1020,7
Tempo máximo de congestionamento [s]	116,1	295,6	513,4	587,4	546,4
Relação do tempo de máximo de congestionamento em relação ao tempo de movimento [%]	29%	49%	62%	64%	61%
Tempo médio de congestionamento [s]	23,6	92,5	147,2	200,1	182,9
Relação do tempo de médio de congestionamento em relação ao tempo de movimento [%]	6%	15%	18%	22%	20%
	Cenários				
	EVAC.6.0	EVAC.7.0	EVAC.8.0	EVAC.9.0	-
Número de ocupantes da estação	2600	3000	3400	5000	-
Tempo de pré-movimento [s]			120		-
Tempo de movimento [s]	1016,5	1049,0	1142,4	1523,6	-
Tempo de evacuação [s]	1136,5	1169,0	1262,4	1643,6	-
Tempo máximo de congestionamento [s]	693,5	733,8	838,7	1190,8	-
Relação do tempo de máximo de congestionamento em relação ao tempo de movimento [%]	68%	70%	73%	78%	-
Tempo médio de congestionamento [s]	217,2	248,5	275,7	436,6	-
Relação do tempo de médio de congestionamento em relação ao tempo de movimento [%]	21%	24%	24%	29%	-

No cenário EVAC.1.0 (com 500 ocupantes), o tempo máximo de congestionamento é de 116,1 segundos, correspondendo a 29% do tempo de movimento dos ocupantes. No cenário EVAC.2.0 (com 1000 ocupantes – o dobro do cenário anterior) o tempo máximo de congestionamento é de 295,6 segundos (2,5 vezes superior ao cenário EVAC.1.0), correspondendo a 49% do tempo de movimento da evacuação. Por sua vez, no EVAC.4.0 (com 2000 ocupantes – quatro vezes superior ao cenário EVAC.1.0), o tempo máximo de congestionamento é de 587,4 segundos (5 vezes superior ao cenário EVAC.1.0), correspondendo a 62% do tempo de movimento da evacuação. Finalmente, no cenário EVAC.9.0 (com 5000 ocupantes – dez vezes superior ao cenário EVAC.1.0) o tempo máximo de congestionamento é de 1190,8 segundos (10 vezes superior ao cenário EVAC.1.0), correspondendo a 78% do tempo de movimento da evacuação. Nos restantes cenários verifica-se o mesmo tipo de comportamento, isto é, o tempo máximo de congestionamento aumenta à medida que o número de ocupantes da estação aumenta, numa proporção também ela crescente.

Relativamente ao tempo médio de congestionamento, verifica-se que no cenário EVAC.1.0 (com 500 ocupantes) este é de 23,6 segundos, correspondendo a 6% do tempo de movimento dos ocupantes, enquanto no cenário EVAC.2.0 (com 1000 ocupantes – o dobro do cenário anterior) o tempo médio de congestionamento é de 92,5 segundos (≈ 4 vezes superior ao cenário EVAC.1.0), correspondendo a 15% do tempo de movimento da evacuação. Por sua vez, no cenário EVAC.4.0 (com 2000 ocupantes – quatro vezes superior ao cenário EVAC.1.0) o tempo médio de congestionamento é de 200,1 segundos (mais de 8 vezes superior ao cenário EVAC.1.0), correspondendo a 22% do tempo de movimento da evacuação. Por fim, no cenário EVAC.9.0 (com 5000 ocupantes – dez vezes superior ao cenário EVAC.1.0) o tempo médio de congestionamento é de 436,6 segundos (mais de 18 vezes superior ao cenário EVAC.1.0), correspondendo a 29% do tempo de movimento da evacuação. Nos restantes cenários observa-se um comportamento semelhante, isto é, o tempo médio de congestionamento aumenta à medida que o número de ocupantes da estação aumenta, numa proporção também ela crescente.

5.3 Influência da utilização das escadas rolantes

No Quadro 5.29 é apresentado um resumo dos resultados da simulação para os cenários EVAC.”y”.1 (onde o “y” corresponde a cada um dos conjuntos de cenários referidos no Quadro 3.10), onde se considerou uma variação do número de ocupantes presentes na estação e também da sua localização. Em todos estes cenários considerou-se apenas a evacuação numa situação de emergência, sem ocorrência de incêndio, e onde os ocupantes podem escolher a saída que for mais vantajosa (de acordo com os procedimentos pormenorizados no capítulo 3.3.1), e podem utilizar as escadas rolantes (paradas).

De modo a investigar as vantagens na utilização das escadas rolantes, os resultados obtidos foram comparados com os cenários EVAC."y".0, em tudo equivalentes, mas onde os ocupantes não podem utilizar as escadas rolantes.

Quadro 5.29 – Resumo dos resultados da simulação de evacuação – Cenários EVAC."y".1

	Cenários				
	EVAC.1.1	EVAC.2.1	EVAC.3.1	EVAC.4.1	EVAC.5.1
Número de ocupantes da estação	500	1000	1800	2000	2000
Tempo de pré-movimento [s]			120		
Tempo de movimento [s]	395,4	551,4	815,6	878,4	852,4
Tempo de evacuação [s]	515,4	671,4	935,6	998,4	972,4
Diferença do tempo de movimento em relação ao cenário EVAC."y".0 [s]	-9,8	-54,2	-9,0	-42,8	-48,3
Diferença do tempo de movimento em relação ao cenário EVAC."y".0 [%]	-2% ▼	-9% ▼	-1% ▼	-5% ▼	-5% ▼
	Cenários				
	EVAC.6.1	EVAC.7.1	EVAC.8.1	EVAC.9.1	-
Número de ocupantes da estação	2600	3000	3400	5000	-
Tempo de pré-movimento [s]			120		-
Tempo de movimento [s]	975,3	1018,6	1071,6	1474,8	-
Tempo de evacuação [s]	1095,3	1138,6	1191,6	1594,8	-
Diferença do tempo de movimento em relação ao cenário EVAC."y".0 [s]	-41,2	-30,4	-70,8	-48,8	-
Diferença do tempo de movimento em relação ao cenário EVAC."y".0 [%]	-4% ▼	-3% ▼	-6% ▼	-3% ▼	-

O cenário EVAC.2.1, correspondente a um período de ocupação médio da estação (com um total de 1000 ocupantes), apresenta o menor tempo de evacuação, menos 9% que o cenário base (EVAC.2.0). Neste caso quase todos os ocupantes opta por sair pela saída da Rua do Crucifixo, tirando 6 ocupantes que optaram por sair pela saída do Largo do Chiado por já se encontrarem na galeria de acesso à mesma. A saída pela Rua do Crucifixo corresponde ao caminho mais curto e também mais rápido. O número de ocupantes não é suficiente para originar um congestionamento muito demorado que leve os ocupantes a selecionar a saída do Largo do Chiado.

Numa análise global, os resultados sugerem que a utilização das escadas rolantes como um caminho de fuga pode melhorar o tempo de evacuação, em média em cerca de 4-5%, dependendo do número de ocupantes da estação. O que aparenta não ser uma melhoria muito significativa, tendo em conta o incremento considerável da largura de passagem disponível, que passa a ser de 6 m em cada conjunto de escadas de acesso ao exterior (largura 40% superior em relação aos cenários em que as escadas rolantes não são utilizadas). De referir, no entanto, que a largura de cada escada rolante apenas permita a subida de uma pessoa de cada vez, e foi considerada uma redução na velocidade de locomoção dos ocupantes.

5.4 Influência da escolha da saída

No Quadro 5.30 é apresentado um resumo dos tempos de evacuação obtidos para os cenários EVAC."y".2 (correspondendo o "y" a cada um dos conjuntos de cenários referidos no Quadro 3.10), onde ocorre uma variação do número de ocupantes da estação e também da sua localização. Em todos estes cenários considerou-se apenas a evacuação numa situação de emergência, sem ocorrência de incêndio, e onde os ocupantes não podem utilizar as escadas rolantes e devem seguir a sinalização de saída presente na estação, isto é, a evacuação dos cais da Linha Verde é feita para o lado do Largo do Chiado e a evacuação dos cais da Linha Azul faz-se para o lado da Rua do Crucifixo. No piso superior da estação a evacuação faz-se por qualquer saída. Considera-se razoável assumir que um número significativo de ocupantes não conhece a estação, e, portanto, sem situação de emergência iria seguir a sinalização de saída. Este facto é também coerente com a localização da estação, na baixa de Lisboa, sendo esta muito frequentada por turistas.

Quadro 5.30 – Resumo dos tempos de evacuação – Cenários EVAC."y".2

	Cenários				
	EVAC.1.2	EVAC.2.2	EVAC.3.2	EVAC.4.2	EVAC.5.2
Número de ocupantes da estação	500	1000	1800	2000	2000
Tempo de pré-movimento [s]	120				
Tempo de movimento [s]	568,2	669,4	875,6	882,8	1131,0
Tempo de evacuação [s]	688,2	789,4	995,6	1002,8	1251,0
Diferença do tempo de movimento em relação ao cenário EVAC."y".0 [s]	163,0	63,9	51,1	-38,4	230,4
Diferença do tempo de movimento em relação ao cenário EVAC."y".0 [%]	40% ▲	11% ▲	6% ▲	-4% ▼	26% ▲
	Cenários				
	EVAC.6.2	EVAC.7.2	EVAC.8.2	EVAC.9.2	-
Número de ocupantes da estação	2600	3000	3400	5000	-
Tempo de pré-movimento [s]	120				
Tempo de movimento [s]	983,6	1129,4	1219,4	1591,1	-
Tempo de evacuação [s]	1103,6	1249,4	1339,4	1711,1	-
Diferença do tempo de movimento em relação ao cenário EVAC."y".0 [s]	-32,9	80,4	77,1	67,5	-
Diferença do tempo de movimento em relação ao cenário EVAC."y".0 [%]	-3% ▼	8% ▲	7% ▲	4% ▲	-

Para analisar a influência de ocupantes seguirem a sinalização existente na estação, independentemente da distância a percorrer ou do desnível a vencer, os resultados obtidos foram comparados com os cenários EVAC."y".0, em tudo equivalentes, mas onde os ocupantes podem escolher a saída que for mais vantajosa (de acordo com os procedimentos detalhados no capítulo 3.3.1).

Os resultados mostram que num período de baixa ocupação da estação (cenário EVAC.1.2) é particularmente penalizador para os ocupantes dos cais da Linha Verde utilizarem a saída do

Largo do Chiado. Neste cenário registou-se um incremento de 40% no tempo de movimento da evacuação, quando comparado com o cenário base (EVAC.1.0), em que os ocupantes optam por sair pela Rua do Crucifixo.

A utilização da saída do Largo do Chiado pelos ocupantes dos cais da Linha Verde revelou-se vantajosa nos cenários EVAC.4.2 e EVAC.6.2, correspondendo, respetivamente a períodos de ocupação média e elevada da estação, conjugados com a chegada de um comboio no cais Este da Linha Azul. Em ambos os casos, a utilização forçada da saída do Largo do Chiado contribuiu para uma utilização mais equilibrada de cada uma das duas saídas. A saída da Rua do Crucifixo continua a ser a mais utilizada (uma vez que a maioria do efetivo está na Linha Azul, sendo “forçada” a utilizar esta saída); no entanto, o tempo de congestionamento é menor. No cenário EVAC.5.2, em tudo semelhante ao EVAC.4.2, mas com a chegada do comboio no cais Oeste da Linha Verde, e, portanto, forçando a maioria dos ocupantes a utilizar a saída do Largo do Chiado, ocorrendo um agravamento do tempo de movimento em 26%, em comparação com o cenário base (EVAC.5.0).

Numa análise global dos resultados, estes sugerem que se os ocupantes seguirem a sinalização existente na estação, isto é, se os ocupantes dos cais da Linha Verde utilizarem forçosamente a saída do Largo do Chiado, ocorrerá um aumento do tempo de evacuação. Este facto será particularmente penalizador em situações de baixa e média ocupação, e em situações onde a maioria do efetivo esteja concentrado na Linha Verde. Os resultados sugerem também que em situações particulares, nomeadamente em momentos de maior concentração de pessoas no lado da Linha Azul, a utilização da saída do Largo do Chiado poderá ter um efeito positivo na redução do tempo de evacuação.

5.5 Influência da ocorrência de incêndio

No Quadro 5.31 é apresentado um resumo dos resultados da simulação para os cenários EVAC.”y”.3, onde o “y” corresponde a cada um dos conjuntos de cenários referidos no Quadro 3.10, onde ocorre uma variação do número de ocupantes da estação e também da sua localização. Em todos estes cenários considerou-se a evacuação numa situação de emergência, com a ocorrência de um incêndio, sem ativação do sistema de desenfumagem, e onde os ocupantes podem escolher a saída que for mais vantajosa (de acordo com os procedimentos detalhados no capítulo 3.3.1), e não podem utilizar as escadas rolantes.

De forma a analisar o impacto da ocorrência de um incêndio, os resultados obtidos foram comparados com os cenários EVAC.”y”.0, em tudo equivalentes, mas nos quais não ocorre um incêndio.

Os dados obtidos mostram que o incêndio só não é um fator penalizador do tempo de evacuação no cenário EVAC.1.3, correspondendo a um período de baixa ocupação da estação (500 ocupantes). Em todos os outros o tempo de evacuação é aumentado pela ocorrência de um incêndio (em comparação com os cenários base, EVAC."y".0). Analisando os níveis da dose efetiva fracionária (FED) no nível superior da estação, no final do tempo de simulação deste cenário, verifica-se que os mesmos são residuais, pelo que seria expectável que a evacuação dos ocupantes nestas condições decorresse sem incidentes.

Quadro 5.31 – Resumo dos resultados da simulação de evacuação – Cenários EVAC."y".3

		Cenário				
		EVAC.1.3	EVAC.2.3	EVAC.3.3	EVAC.4.3	EVAC.5.3
Número de ocupantes da estação		500	1000	1800	2000	2000
Tempo de pré-movimento [s]		120				
Tempo de movimento [s]		400,0	670,2	1256,6	1543,8	1419,1
Tempo de evacuação [s]		520,0	790,2	1376,6	1663,8	1539,1
Diferença do tempo de movimento em relação ao cenário EVAC."y".0 [s]		-5,2	64,7	432,0	622,6	518,4
Diferença do tempo de movimento em relação ao cenário EVAC."y".0 [%]		-1% ▼	11% ▲	52% ▲	68% ▲	58% ▲
FED (média ± DP) no nível superior no final do tempo de evacuação	Linha Azul	0,02 ± 0,008	0,19 ± 0,046	1,80 ± 0,249	3,22 ± 0,390	2,57 ± 0,328
	Linha Verde	0,01 ± 0,001	0,10 ± 0,008	1,43 ± 0,078	2,67 ± 0,147	2,10 ± 0,115
FED máxima no nível superior no final do tempo de evacuação	Linha Azul	0,03	0,24	2,04	3,64	2,91
	Linha Verde	0,01	0,12	1,49	2,78	2,18
		Cenário				
		EVAC.6.3	EVAC.7.3	EVAC.8.3	EVAC.9.3 (*)	
Número de ocupantes da estação		2600	3000	3400	5000	
Tempo de pré-movimento [s]		120				
Tempo de movimento [s]		1750,1	1888,9	2133,7	3236,5	
Tempo de evacuação [s]		1870,1	2008,9	2253,7	3356,5	
Diferença do tempo de movimento em relação ao cenário EVAC."y".0 [s]		733,6	839,9	991,4	1712,9	
Diferença do tempo de movimento em relação ao cenário EVAC."y".0 [%]		72% ▲	80% ▲	87% ▲	112% ▲	
FED (média ± DP) no nível superior no final do tempo de evacuação	Linha Azul	4,53 ± 0,507	5,49 ± 0,589	7,49 ± 0,753	13,74 ± 1,254	
	Linha Verde	3,83 ± 0,215	4,69 ± 0,266	6,47 ± 0,374	12,11 ± 0,727	
FED máxima no nível superior no final do tempo de evacuação	Linha Azul	5,13	6,21	8,45	15,46	
	Linha Verde	4,02	4,93	6,84	12,90	

Nota: (*) Devido ao elevado tempo de processamento da simulação de incêndio só foi possível integrar na simulação de evacuação 2850 segundos da simulação de incêndio.

No cenário EVAC.2.3, idêntico ao anterior, mas correspondendo a um período de média ocupação da estação (1000 ocupantes) ocorre um agravamento de 11% no tempo de movimento (em comparação com o cenário EVAC.2.0). Os níveis da dose efetiva fracionária (FED) no nível superior da estação, no final do tempo de simulação deste cenário, mostram que o valor

máximo de FED mantém-se abaixo do valor de referência de 0,3 (ISO, 2012) ainda que apresentem já uma grandeza considerável (0,24, no lado da Linha Azul). Nesta situação estima-se que uma pequena parte da população (<11%) pudesse ficar incapacitada durante a evacuação.

Relativamente ao cenário EVAC.3.3, idêntico aos anteriores, mas correspondendo a um período de ocupação elevada da estação (1800 ocupantes) ocorre um agravamento de 52% no tempo de movimento (em comparação com o cenário EVAC.3.0). Este aspeto pode ser explicado pelos níveis de densidade ótica de fumo que são suficientes para reduzir a velocidade dos ocupantes (ver capítulo 3.3.1.6).

Também os níveis da dose efetiva fracionária (FED) no nível superior da estação, no final do tempo de simulação deste cenário, mostram que o valor máximo de FED excede largamente o valor de referência de 0,3 (ISO, 2012), pelo que se prevê que uma parte considerável da população (entre 50% e 89%) pudesse ficar incapacitada durante a evacuação.

O tempo de movimento registado no cenário EVAC.3.3 (onde ocorre um agravamento muito significativo, em relação ao cenário anterior), e o aumento progressivo registado nos cenários seguintes, bem como do elevado nível da dose efetiva fracionária (FED) registado no nível superior da estação, sugerem que o cenário EVAC.2.3 corresponde às condições limite para uma evacuação segura, para um incêndio com as características preconizadas. Mesmo assim seria expectável que uma pequena parte da população ficasse incapacitada durante a evacuação.

No Quadro 5.32 é apresentado um resumo dos resultados da simulação para os cenários EVAC.”y”.4, onde o “y” corresponde a cada um dos conjuntos de cenários referidos no Quadro 3.10, onde ocorre uma variação do número de ocupantes da estação e também da sua localização. Em todos estes cenários considerou-se a evacuação numa situação de emergência, com ocorrência de um incêndio, com a ativação do sistema de desenfumagem aos 300 segundos da simulação, e onde os ocupantes podem escolher a saída que for mais vantajosa, e não podem utilizar as escadas rolantes.

De um modo geral, não se verifica um aumento dos tempos de evacuação quando é ativada a desenfumagem (em comparação com os cenários base EVAC.”y”.0). Analisando os níveis da dose efetiva fracionária (FED) no nível superior da estação, no final do tempo de simulação de cada cenário, considera-se que estes são residuais (em termos médios) para todos os cenários. Esta análise mostra a importância da existência de um sistema de controlo de fumo, assim como da sua ativação atempada, num intervalo de tempo que garanta as condições necessárias para uma evacuação segura.

Quadro 5.32 – Resumo dos resultados da simulação de evacuação – Cenários EVAC."y".4

		Cenários				
		EVAC.1.4	EVAC.2.4	EVAC.3.4	EVAC.4.4	EVAC.5.4
Número de ocupantes da estação		500	1000	1800	2000	2000
Tempo de pré-movimento [s]		120				
Tempo de movimento [s]		402,9	608,4	834,6	921,4	894,9
Tempo de evacuação [s]		522,9	728,4	954,6	1041,4	1014,9
Diferença do tempo de movimento em relação ao cenário EVAC."y".0 [s]		-2,3	2,9	10,0	0,2	-5,8
Diferença do tempo de movimento em relação ao cenário EVAC."y".0 [%]		-1% ▼	0%	1% ▲	0%	-1% ▼
FED (média ± DP) no nível superior no final do tempo de evacuação	Linha Azul	0,01 ± 0,008	0,03 ± 0,016	0,06 ± 0,029	0,07 ± 0,035	0,06 ± 0,033
	Linha Verde	0,00 ± 0,001	0,01 ± 0,004	0,02 ± 0,009	0,02 ± 0,012	0,02 ± 0,011
FED máxima no nível superior no final do tempo de evacuação	Linha Azul	0,02	0,04	0,08	0,10	0,09
	Linha Verde	0,00	0,01	0,03	0,04	0,04
		Cenários				
		EVAC.6.4	EVAC.7.4	EVAC.8.4	EVAC.9.4	
Número de ocupantes da estação		2600	3000	3400	5000	
Tempo de pré-movimento [s]		120				
Tempo de movimento [s]		1019,2	1045,9	1116,5	1509,2	
Tempo de evacuação [s]		1139,2	1165,9	1236,5	1629,2	
Diferença do tempo de movimento em relação ao cenário EVAC."y".0 [s]		2,7	-3,1	-25,8	-14,4	
Diferença do tempo de movimento em relação ao cenário EVAC."y".0 [%]		0%	0%	-2% ▼	-1% ▼	
FED (média ± DP) no nível superior no final do tempo de evacuação	Linha Azul	0,08 ± 0,042	0,08 ± 0,044	0,09 ± 0,050	0,16 ± 0,088	
	Linha Verde	0,03 ± 0,015	0,03 ± 0,016	0,04 ± 0,018	0,06 ± 0,035	
FED máxima no nível superior no final do tempo de evacuação	Linha Azul	0,12	0,12	0,14	0,24	
	Linha Verde	0,05	0,05	0,06	0,10	

5.6 Influência das características dos ocupantes

No Quadro 5.33 é apresentado um resumo dos resultados da simulação, em particular os tempos de movimento por género e grupo etário para os cenários EVAC."y".0, onde o "y" corresponde a cada um dos conjuntos de cenários referidos no Quadro 3.10, onde ocorre uma variação do número de ocupantes da estação e também da sua localização. Em todos estes cenários considerou-se apenas a evacuação numa situação de emergência, sem ocorrência de incêndio, e onde os ocupantes podem escolher a saída que for mais vantajosa, e não podem utilizar as escadas rolantes.

5 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES DE EVACUAÇÃO

Quadro 5.33 – Resumo dos tempos de movimento por género e grupo etário para os cenários EVAC.1.0 a EVAC.9.0

		Cenários								
		EVAC.1.0	EVAC.2.0	EVAC.3.0	EVAC.4.0	EVAC.5.0	EVAC.6.0	EVAC.7.0	EVAC.8.0	EVAC.9.0
Número de ocupantes da estação		500	1000	1800	2000	2000	2600	3000	3400	5000
Tempo médio de movimento da evacuação [s]		250,1	343,5	461,3	513,9	504,3	573,5	622,8	669,9	868,3
Tempo médio de movimento da evacuação por género e grupo etário [s]										
Masculino	< 30 anos	193,9	260,1	351,8	404,9	404,6	467,0	534,1	591,7	811,3
	> 30 anos	221,6	297,9	414,1	468,6	450,8	528,1	583,8	627,9	838,4
	< 50 anos	255,8	349,9	458,7	531,5	521,7	567,1	645,0	682,6	900,4
	> 50 anos	217,9	321,8	421,5	499,3	489,1	549,7	602,2	644,0	842,5
Feminino	< 30 anos	272,5	380,8	505,8	560,0	550,8	623,5	653,0	702,4	884,2
	> 30 anos	327,5	436,6	590,7	598,5	592,9	678,3	707,0	758,5	930,5
	< 50 anos									
	> 50 anos									
Diferença em relação ao tempo médio de movimento da evacuação total por género e por grupo etário [%]										
Masculino	< 30 anos	-22%	-24%	-24%	-21%	-20%	-19%	-14%	-12%	-7%
	> 30 anos	-11%	-13%	-10%	-9%	-11%	-8%	-6%	-6%	-3%
	< 50 anos	+2%	+2%	-1%	+3%	+3%	-1%	+4%	+2%	+4%
	> 50 anos	-13%	-6%	-9%	-3%	-3%	-4%	-3%	-4%	-3%
Feminino	< 30 anos	+9%	+11%	+10%	+9%	+9%	+9%	+5%	+5%	+2%
	> 30 anos	+31%	+27%	+28%	+16%	+18%	+18%	+14%	+13%	+7%
	< 50 anos									
	> 50 anos									
Diferença em relação ao tempo médio de movimento da evacuação total por género [%]	Masculino	-11%	-12%	-12%	-9%	-9%	-9%	-6%	-5%	-2%
	Feminino	+9%	+11%	+10%	+8%	+8%	+8%	+5%	+5%	+2%

Os resultados mostram diferenças no tempo de movimento dos ocupantes em função do género, sendo estes resultados coerentes com o esperado, uma vez que os tempos de movimento dependem diretamente da velocidade de movimento, que se considerou diferenciada por género e grupo etário.

Na série de cenários entre o EVAC.1.0 e EVAC.6.0, a diferença em relação ao tempo médio de movimento da evacuação total por género apresenta valores semelhantes, verificando-se que os indivíduos do género masculino apresentam valores para o tempo de movimento cerca de 9-11% inferiores à média geral e os indivíduos do género feminino 8-9% superior à média geral. Nos cenários seguintes, em que o número de ocupantes é progressivamente superior, esta diferença entre géneros é progressivamente menor. No cenário EVAC.9.0 os indivíduos do género masculino apresentam tempos de movimento 2% inferiores ao tempo médio geral, enquanto que os indivíduos do género feminino registam tempos 2% superiores à média geral.

Analisando os resultados por grupo etário verifica-se que os indivíduos de idade inferior a 30 anos apresentam sempre valores inferiores à média, independentemente do género. No grupo etário com idade superior a 50 anos os indivíduos apresentam, para ambos os géneros, valores superiores à média geral. No entanto, no caso dos indivíduos do género masculino é apenas ligeiramente superior (cerca de 2-4%), enquanto para os indivíduos do género feminino esta diferença é bastante mais significativa (em torno de 20-30%).

De forma semelhante ao verificado acima, a diferença por grupos etários vai sendo progressivamente menor à medida que o número de ocupantes da estação aumenta. Os resultados sugerem que este facto estará relacionado com o aumento do congestionamento (devido ao elevado número de pessoas), e consequente redução forçada da velocidade de movimento dos ocupantes. Proporcionalmente, o aumento do efetivo aumenta também o número de pessoas com dificuldades de locomoção e velocidades de movimento mais lentas.

5.7 Comparação de resultados com método de cálculo analítico da NFPA130

De forma a obter uma referência de comparação dos resultados obtidos através do programa de simulação *Pathfinder*, efetuou-se uma análise comparativa seguindo os critérios de cálculo analítico presentes na norma “NFPA130 – *Standard for Fixed Guideway Transit and Passenger Rail Systems*” (NFPA, 2020), que em conjugação com as respetivas legislações nacionais, é utilizada como referência no projeto de estações de metro em muitos países, incluindo em Portugal.

Esta norma define que devem ser garantidos dois tempos de evacuação chave: o tempo de evacuação da plataforma que deve ser inferior a 4 minutos, e o tempo de evacuação da estação

que deve ser inferior a 6 minutos. Estes tempos são calculados em função do tipo de deslocamento e fluxos de pessoas (ver Quadro 2.17).

Este método foi aplicado apenas para análise comparativa de resultados em relação ao cenário mais gravoso simulado. Tendo em conta que o método NFPA 130 considera as escadas rolantes paradas (descontando uma do total de escadas existentes), esta comparação foi feita em relação ao cenário equivalente simulado, isto é, o cenário EVAC.9.1. Em termos de ocupação corresponde ao efetivo previsto na legislação nacional (ver capítulo 3.1.2). O cálculo do tempo de evacuação de acordo com a NFPA130 é o apresentado nos quadros 5.34 a 5.36.

Quadro 5.34 – Cálculo do tempo de evacuação segundo a NFPA130 – Fluxos de pessoas

Meio de saída	Nº de elementos	Largura [mm]	Largura Total [mm]	Fluxo de pessoas [P/mm-min]	Fluxo de pessoas [P/min]
Escadas fixas de ligação dos cais ao nível superior	2	3900	7800	0,0555	432,9
Fluxo de pessoas nas escadas de interligação de cada cais ao nível superior					432,9
Canais de validação de títulos	24	-	-	-	1200
Portas de emergência	9	700	6300	0,0893	562,6
Fluxo de pessoas na passagem nos canais de validação de títulos/saídas de emergência					1762,6
Escadas fixas de ligação do nível superior ao exterior	4	2100	8400	0,0555	466,2
Escadas rolantes paradas	3 (*)	900	2700	0,0555	149,85
Fluxo de pessoas nas escadas de interligação do nível superior ao exterior					616,05

(*) Nota: considerou-se o total de escadas rolantes existentes, menos uma.

Quadro 5.35 – Cálculo do tempo de evacuação segundo a NFPA130 – Tempos de movimento

Tempos de movimento	[minutos]
Na plataforma T1 (considerando 52,5m) [T1 = 52,5/37,8]	1,39
Entre a plataforma e o nível superior T2 (considerando 4 m de elevação) [T2 = 4/14,63]	0,27
No nível superior até aos canais de validação de títulos T3 (considerando 60m) [T3 = 60/37,8]	1,59
Entre os canais de validação de títulos e as escadas de ligação ao exterior T4 (considerando um valor médio 50m) [T4 = 50/37,8]	1,32
Entre o nível superior e o exterior T5 (considerando um valor médio de 27 m de elevação) [T5 = 27/14,63]	1,85
Nos patamares intermédios das escadas de ligação ao exterior T6 (considerando 30m) [T6 = 30/37,8]	0,79
Tempo total de movimento (T_{movimento})	6,42

Quadro 5.36 – Cálculo do tempo de evacuação segundo a NFPA130 – Tempos de evacuação

Tempos de evacuação	[minutos]
Tempo de evacuação de cada plataforma (considerando 1200 ocupantes) [$F_p = 1200/432,9$]	2,77 [$F_p < 4\text{min}$]
Tempo de espera na plataforma [$W_p = F_p - T1$]	1,38
Tempo de passagem nos canais de validação de títulos (considerando 5000 ocupantes) [$F_{fb} = 1762,6/5000$]	2,84
Tempo de espera nos canais de validação de títulos [$W_{fb} = F_{fb} - F_p$]	0,06
Tempo de evacuação do nível superior (considerando 5000 ocupantes) [$F_{ns} = 5000/616,05$]	8,12
Tempo de espera no nível superior [$W_{ns} = F_{ns} - \text{máximo}(F_p \text{ ou } F_{fb})$]	5,28
	13,15 minutos
Tempo total de evacuação [$T_{\text{evacuação}} = T_{\text{movimento}} + W_p + W_{fb} + W_{ns}$]	(788,15 segundos) [$T_{\text{evac}} \gg 6 \text{ min}$]

Observa-se que o tempo de evacuação de cada plataforma (2,77 minutos) ficou abaixo do referencial de 4 minutos, mesmo considerando uma densidade de ocupação bastante elevada (1200 pessoas em cada cais). Apesar das simplificações efetuadas no cálculo, nomeadamente o facto de se ter considerado um valor médio para o comprimento e desnível do conjunto das duas saídas de ligação ao exterior, verifica-se que o tempo total de evacuação (13,15 minutos) excede largamente o referencial de 6 minutos. Este facto está essencialmente associado à elevada profundidade da estação e à existência de apenas duas saídas de ligação ao exterior, acessíveis a partir de um ponto comum (zona central do nível superior) o que potencia um aumento muito grande nas distâncias a percorrer.

Para analisar com maior pormenor os tempos de evacuação obtidos na simulação computacional e no cálculo analítico, refez-se a simulação do cenário EVAC.9.1, no *Pathfinder*, mas utilizando o cálculo de movimento pelo Modo SFPE (para comparar com os resultados utilizando o cálculo de movimento pelo modo de comportamento direcional – analisados em pormenor no capítulo 5.1.9). O Quadro 5.37 resume os resultados da simulação do cenário EVAC.9.1, nos modos de comportamento direcional e SFPE e do cálculo analítico pelo método da NFPA130.

Esta comparação permite perceber que o método de cálculo analítico segundo a NFPA130 produz tempos de evacuação inferiores, que podem ser explicados pela forma de cálculo. Isto porque se trata de um cálculo expedito (e que recorreu a algumas simplificações), pelo que é natural serem inferiores. Adicionalmente, os valores de fluxos de passagem do método SFPE são inferiores aos do método NFPA 130, o que contribuiu para a redução do tempo de evacuação calculado. Assim, os tempos de movimento obtidos através simulação efetuada com o *Pathfinder* resultam de um modelo mais realista dos ocupantes numa situação de evacuação, permitindo a modelação de cenários mais complexos, por exemplo, permitindo a definição de

características diferenciadas para os ocupantes, nomeadamente considerar velocidades diferentes em função da idade e género do ocupante. Em particular quando utilizado o modo de comportamento direcional é contemplado um nível adicional de realismo, pelo que é expectável que o resultado final seja superior. Esta diferença entre resultados do cálculo analítico do método da NFPA 130 (modelo mais simples), e os resultados da simulação computacional da evacuação (modelo mais complexo) está de acordo com o descrito por outros autores de estudos de evacuação de gares subterrâneas de transporte (e.g. Kallianiotis, Papakonstantinou, Arvelaki, et al., 2018).

Quadro 5.37 – Resumo de resultados da simulação do cenário EVAC.9.0 e do cálculo analítico

	Cenário da simulação de evacuação		Cálculo
	EVAC.9.1 (Steering Mode)	EVAC.9.1 (SFPE Mode)	analítico NFPA130
Tempo total de movimento de evacuação [s]	1474,8	1243,3	788,15
Diferença do Tempo total de movimento de Evacuação em relação ao cenário EVAC.9.1 (Steering Mode) [s]	-	-231,5	-686,65
Diferença do Tempo total de movimento de Evacuação em relação ao cenário EVAC.9.1 (Steering Mode) [%]	-	-15,7 %	-46,6 %
Tempo de evacuação das plataformas de embarque [s]	672	480	166,2
Diferença do Tempo de Evacuação das plataformas de embarque em relação ao cenário EVAC.9.1 (Steering Mode) [s]	-	-192	-522,8
Diferença do Tempo de Evacuação das plataformas de embarque em relação ao cenário EVAC.9.1 (Steering Mode) [%]	-	-28,6 %	-75,8 %

5.8 Considerações finais

Neste capítulo analisaram-se os resultados obtidos para as simulações de evacuação efetuadas, tendo-se variado o número de ocupantes e a sua localização na estação, a possibilidade de os mesmos utilizarem as escadas rolantes durante a fuga ou de escolherem a saída a utilizar. Foi ainda analisada a evacuação em situações de incêndio, variando o efetivo, e a ativação ou não do sistema de controlo de fumo. Os resultados apresentados permitiram determinar a influência do número de ocupantes da estação num processo de evacuação da mesma. Verificou-se que o tempo médio de congestionamento aumenta à medida que o efetivo presente na estação aumenta e por consequência o tempo total da evacuação.

A análise da influência da utilização das escadas rolantes na evacuação, sugere que esta utilização pode melhorar o tempo de evacuação, em média em cerca de 4-5%, dependendo do número de ocupantes da estação. Este resultado ficou aquém do esperado, uma vez que se verificou um incremento considerável da largura de passagem disponível (ainda que a largura de cada escada rolante apenas permita a subida de uma pessoa de cada vez). Este tema carece de uma análise mais detalhada em estudos futuros, uma vez que no presente estudo só se considerou o decréscimo da velocidade de subida (conforme pormenorizado no capítulo 3.3.2), e não foi tida em conta a dificuldade adicional de subida devido à maior altura dos degraus, nem o “fenómeno da escada rolante avariada”, que corresponde à sensação de desequilíbrio e de dificuldade de locomoção que é verificada quando se caminha numa passadeira ou escada rolante parada (Reynolds & Bronstein, 2003). Outra particularidade que carece de uma análise mais detalhada é a utilização de escadas rolantes em funcionamento para evacuação de pessoas; alguns estudos na área sugerem que o efeito de paragem das escadas rolantes, numa situação de emergência, e posterior re-arranque das mesmas, pode originar acidentes que podem ter um efeito contrário ao desejado (Okamoto et al., 2011).

Na análise do efeito dos ocupantes seguirem a sinalização existente na estação, isto é, se os ocupantes dos cais da Linha Verde utilizarem forçosamente a saída do Largo do Chiado, e os ocupantes dos cais da Linha Azul saírem pela Rua do Crucifixo, verificou-se que ocorrerá um aumento do tempo de evacuação (que pode ser bastante elevado). Os resultados mostram também que em situações particulares, nomeadamente em momentos de maior concentração de pessoas no lado da Linha Azul, a utilização da saída do Largo do Chiado poderá contribuir para a redução do tempo de evacuação, uma vez que permite equilibrar o uso de ambas as saídas.

A existência de um sistema de controlo de fumo contribui para a garantia de condições para uma evacuação segura, bem como beneficia a sua ativação de modo célere. A não ativação da desenfumagem, em situações de incêndio, resultou num aumento muito significativo do tempo de movimento dos ocupantes, mais notório à medida que o número de ocupantes aumentou. Verificou-se também um elevado nível da dose efetiva fracionária (FED) no nível superior da estação, na generalidade dos cenários considerados. Os resultados sugerem que, para um incêndio com as características preconizadas, o cenário EVAC.2.3 (com 1000 ocupantes) corresponde às condições limite para uma evacuação segura em situação de incêndio, sem que seja ativado o sistema de controlo de fumo (e mesmo assim seria expectável que uma pequena parte da população pudesse ficar incapacitada durante a evacuação).

O género e grupo etário dos ocupantes mostraram ser fatores de relevo na determinação do tempo de movimento da evacuação. Verificou-se que na generalidade dos cenários, os indivíduos do género masculino apresentam valores para o tempo de movimento cerca de 9-11% inferiores à média geral e os indivíduos do género feminino 8-9% superiores à média

geral. Também ao nível do grupo etário se verificou que os indivíduos de idade inferior a 30 anos apresentam sempre valores inferiores à média, independentemente do género, mas, de forma semelhante, a diferença por grupo etário vai sendo progressivamente menor à medida que o número de ocupantes da estação aumenta. Os resultados sugerem que este facto estará relacionado com o aumento do congestionamento (devido ao elevado número de pessoas), e consequente redução forçada da velocidade de movimento dos ocupantes. O conhecimento das características da população utilizadora da estação é, portanto, um fator determinante para a sua eficiente evacuação. Uma vez que a presença de um número considerável de pessoas mais envelhecidas pode levar a um aumento do tempo de evacuação, e torna-se mais provável a existência de condicionalismos na mobilidade.

O modelo apresentado pressupõe que o utilizador conhece a estação, e o melhor acesso ao exterior. No entanto, na realidade o utilizador de uma estação de metro pode desconhecer a mesma por completo, até porque a cidade de Lisboa, e em particular a zona da Baixa-Chiado, é muito frequentada por turistas e visitantes ocasionais o que poderá originar uma dificuldade adicional na evacuação.

6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Com o desenvolvimento deste trabalho foi possível analisar as condições de evacuação da Estação de Metro Baixa-Chiado e avaliar a existência de condições para que, em situação de emergência, os ocupantes da estação consigam alcançar um ponto no exterior, pelos seus próprios meios, de modo fácil, rápido e seguro. Numa gare de transportes subterrânea, a existência destas condições é crucial, por um lado, pelo elevado número de ocupantes, por outro devido à sua localização abaixo do solo, fazendo-se a evacuação sempre no sentido ascendente.

Foi feito um levantamento do estado da arte neste tema, tendo sido analisados os principais fatores que têm impacto na evacuação de um edifício, designadamente os aspetos que influenciam diretamente a velocidade de movimento, como sejam as características dos ocupantes, do edifício, ou das condições ambientais (*e.g.* a existência de condições de sustentabilidade das vias para uma evacuação segura), bem como, os aspetos relacionados com o comportamento humano em situação de emergência.

O conjunto de simulações desenvolvidas permitiram definir cenários, aplicados ao objeto de estudo (isto é, à Estação de Metro Baixa-Chiado), contemplando situações progressivamente mais gravosas, através da variação do efetivo presente no edifício, da sua localização na estação, e da ocorrência de situações de incêndio.

A importância da existência de um sistema de controlo de fumo e da sua rápida ativação em caso de incêndio, foi evidenciada pelos resultados obtidos. Verificou-se que idealmente o sistema de desenfumagem deverá ser ativado antes dos 300 segundos, contabilizados a partir do momento de início do incêndio. Quanto mais tardia for esta ativação mais fumo se acumulará no nível superior da estação, logo, maior exposição ao mesmo terão os ocupantes. Assim, nas situações em que a evacuação decorreu em simultâneo com a ocorrência de um incêndio, sem ativação da desenfumagem, observou-se um agravamento significativo no tempo de movimento dos ocupantes, e progressivo aumento à medida que o número de ocupantes aumenta. Os níveis da dose efetiva fracionária (FED) no nível superior da estação, na generalidade dos cenários considerados sugerem que a condição limite para uma evacuação segura em situação de incêndio, sem que seja ativado o sistema de controlo de fumo, é que o número de pessoas não seja superior a 1000 ocupantes.

As condicionantes arquitetónicas da estação revelaram-se um fator crucial neste estudo. A existência de apenas duas saídas revelou-se insuficiente em períodos de grande ocupação, levando a tempos de congestionamento bastante elevados. O desnível muito superior que se verifica numa delas faz com que a evacuação por essa via seja mais demorada, podendo não ser uma opção viável para alguns ocupantes, com pior forma física ou com algum tipo de condicionamento na mobilidade. O facto de a estação constituir um único volume, associado às galerias de ligação ao exterior partirem de um ponto comum (zona central do nível superior da estação), faz com que estas não constituam verdadeiramente saídas alternativas. Em caso de ocorrência de um incêndio será inevitável a exposição dos ocupantes à ação do incêndio, podendo esta ser minimizada com a ativação atempada do sistema de desenfumagem.

As simulações de evacuação demonstraram a influência do número de ocupantes da estação numa situação de evacuação, através do aumento do tempo de congestionamento à medida que o efetivo presente na estação aumenta. A análise da influência da utilização das escadas rolantes na evacuação permitiu concluir que a sua utilização pode melhorar o tempo de evacuação, em cerca de 4-5%, dependendo do número de ocupantes da estação.

A análise da eficácia da sinalização de saída existente na estação, ou seja, se os ocupantes dos cais da Linha Verde utilizarem forçosamente a saída do Largo do Chiado, e os ocupantes dos cais da Linha Azul utilizarem a saída da Rua do Crucifixo, permitiu perceber que, tendo em conta o desnível a vencer numa das saídas, respeitar a sinalética pode levar a um incremento do tempo de evacuação (que pode ser muito elevado).

As características da população em estudo, em particular género e grupo etário podem condicionar o tempo de evacuação. Verificou-se que tendencialmente os indivíduos do género masculino apresentam valores para o tempo de movimento menores que os indivíduos do género feminino. Em termos etários, o grupo de ocupantes com idade inferior a 30 anos registou tempos de evacuação inferiores à média, enquanto os ocupantes com mais de 50 anos apresentaram valores superiores à média. Com o envelhecimento verificado nas sociedades atuais, a idade dos ocupantes assumirá cada vez relevância neste tipo de estudo. As diferenças entre géneros e grupos etários, verificadas no tempo de evacuação, são progressivamente reduzidas à medida que o número de ocupantes da estação aumenta.

Em resumo, os principais fatores condicionantes da evacuação da estação Baixa-Chiado são a existência de apenas duas saídas, tendo uma delas um desnível muito mais acentuado, o que torna a escolha do caminho de fuga como um fator crucial para uma evacuação o mais célere possível. Em caso de incêndio, o sistema de controlo de fumo mostrou ser de grande importância, sendo eficaz na manutenção das condições para uma evacuação segura, sendo fulcral que o mesmo apresente garantias de funcionamento em situações de emergência. A idade

dos utilizadores de metro, e a eventual existência de condicionalismos na mobilidade, será cada vez mais um tema importante a ter em conta na definição das condições de evacuação de gares subterrâneas de transporte.

6.1 Propostas de melhoria

O presente estudo permitiu identificar alguns aspetos que podem ser alterados de modo a agilizar o processo de evacuação, pelo que são apresentadas algumas propostas de melhoria, com diferentes níveis de intervenção:

1. Intervenção de nível 1 – Substituição da iluminação/sinalização de emergência por luminárias com função de “*increased affordance*” do tipo sinalética dinâmica/adaptativa;
2. Intervenção de nível 2 – Instalação de um sistema de cantonamento de fumo, através de soluções constituídas por elementos fixos ou ocultos (sendo, neste caso, ativado em caso de emergência automaticamente por ordem do SADI);
3. Intervenção de nível 3 – Construção de um núcleo de elevadores e escadas enclausuradas que garantam a comunicação entre o exterior e todos os níveis da estação.

A proposta de intervenção de nível 1, não requer alterações a nível arquitetónico, e diz respeito à substituição da iluminação/sinalização de emergência por luminárias com função de “*increased affordance*” do tipo sinalética dinâmica/adaptativa, esta consiste na utilização de luminárias que em caso de incêndio, e por ordem do SADI, entrarão em modo de emergência, com funcionamento intermitente. Este “movimento” da imagem, facilitará a sua identificação por parte dos ocupantes.

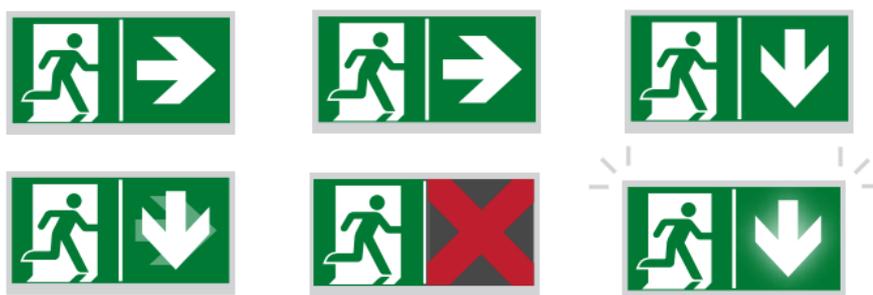


Figura 6.1 – Exemplo de luminárias de emergência do tipo sinalética dinâmica/adaptativa com função “*increased affordance*”

Por outro lado, a função de sinalética dinâmica/adaptativa permite que o pictograma apresentado seja alterado, automaticamente por ordem do SADI ou manualmente por um operador, em função da localização do incêndio ou das condições de evacuação existentes, podendo ser adaptada caso estas se alterem. Este tipo de sistema permite alterar o sentido da

fuga indicado, ou até mesmo indicar os caminhos perigosos com um sinal “X” vermelho (ver exemplos na Figura 6.1).

A intervenção de nível 2, requer algumas alterações a nível arquitetónico, de complexidade moderada, e consiste na instalação de um conjunto de painéis de cantonamento de fumo. Estes podem ser fixos ou ocultos, sendo ativados em caso de emergência automaticamente por ordem do SADI. Este sistema permitiria circunscrever o fumo a uma determinada zona, evitando a propagação do mesmo para as galerias de acesso ao exterior, ou até mesmo evitar a passagem de fumo de uma galeria principal para outra. Esta solução poderia também ser conjugada com a proposta anterior (de sinalética dinâmica/adaptativa), podendo cada galeria principal funcionar como um espaço seguro para a evacuação da galeria adjacente. Assim, em caso de incêndio na Linha Azul, a evacuação poder-se-ia fazer primeiramente para a galeria da Linha Verde, e seguidamente desta para o exterior. Teria como vantagem a manutenção das condições de segurança para a evacuação durante um período de tempo superior.

Relativamente à proposta de intervenção de nível 3, a mesma requer grandes alterações a nível arquitetónico, de complexidade elevada, e passaria pela execução de um núcleo de elevadores e escadas enclausuradas. Este núcleo foi previsto no projeto inicial da estação, mas até ao momento não foi executado. Esta proposta visa, dar cumprimento ao definido no Artigo 261º, do RT-SCIE (2008), que diz respeito às condições de acessibilidade dos meios de socorro, uma vez que se verificou que nos cenários com um grande número de ocupantes, a evacuação é demorada. A entrada dos meios de socorro teria de ser feita em contra-fluxo pelas mesmas escadas utilizadas para evacuação dos passageiros da estação, o que dificulta quer a evacuação quer a atuação dos meios de socorro. A existência de elevadores de ligação ao exterior, desde que estes garantissem as condições de segurança equivalentes aos elevadores prioritários de bombeiros, conforme previsto no RT-SCIE (2008), permitiria também o acesso dos meios de socorro e ainda a evacuação de alguns ocupantes com restrições ao nível da mobilidade, por serem quem teria maior dificuldade em utilizar as escadas para evacuação. Para o funcionamento adequado deste sistema, a evacuação necessitaria do apoio da equipa de segurança da estação, ou dos bombeiros após a sua chegada.

6.2 Desenvolvimento de trabalhos futuros

Este trabalho demonstrou a importância da existência de condições para uma evacuação segura. Para atingir este objetivo é importante que as equipas de segurança efetuem exercícios de treino, para que quando ocorrer um incidente atuem de forma rápida e eficaz. Em termos de atuação dos meios de socorro, o Metropolitano de Lisboa e o Regimento de Sapadores Bombeiros de Lisboa realizam regularmente exercícios de treino, em várias estações da rede, e com diversos tipos de ocorrência.

Seria interessante que em trabalhos futuros pudessem ser realizados exercícios de evacuação com condições de ocupação equivalentes às analisadas por simulação computacional, por forma a que os resultados pudessem ser comparados e analisados. Teria também o seu interesse utilizar mais do que um programa de simulação para comparar resultados de situações equivalentes, e ser possível tecer considerações sobre as vantagens na utilização de cada um deles. Um tema que seria interessante explorar, em particular na evacuação de gares subterrâneas de transporte, seria a evacuação de pessoas com mobilidade reduzida, por exemplo, estudar as melhores formas de introduzir a utilização de elevadores na evacuação destes espaços. A utilização de escadas rolantes na evacuação foi analisada no presente estudo, mas sendo um tema de complexidade elevada necessita de estudos mais aprofundados, que tenham em conta não apenas o decréscimo da velocidade de subida, mas também a dificuldade adicional de subida devido à maior altura dos degraus, bem como o “fenómeno da escada rolante avariada”. A influência da fadiga é também um tema relevante quando se trata de uma evacuação de uma estação de elevada profundidade, e cujo estudo carece de maior desenvolvimento.

Por fim, no presente estudo foi possível constatar que a regulamentação em vigor para a Segurança Contra Incêndio em Edifícios (SCIE) (RJ-SCIE, 2008; RT-SCIE, 2008) apresenta algumas lacunas no que diz respeito a este tipo de instalações. Os critérios para determinação do efetivo a considerar no dimensionamento dos caminhos de evacuação e saídas de emergência aparenta poder ser desadequado. Os resultados obtidos para os cenários EVAC 9.”x” (cujo efetivo corresponde ao definido na regulamentação), revelaram-se particularmente gravosos, até porque esta é uma estação dupla e existem quatro plataformas de embarque, o que agrava o número de ocupantes total a considerar. Segundo informação do Metropolitano de Lisboa, a ocorrência desta simultaneidade de ocupação não deverá ocorrer na prática, tendo em conta a frequência entre comboios. Num trabalho futuro seria interessante ser definida uma metodologia para avaliação das condições de evacuação das estações de metro aplicada à realidade portuguesa. Seria também interessante estudar uma forma mais adequada para a definição do efetivo a considerar no projeto de novas estações (por exemplo, assente em dados de ocupação reais, recolhidos em estações de metro equivalentes).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abir, I. M., Mohd Ibrahim, A., Toha, S. F., & Shafie, A. A. (2022). A review on the hospital evacuation simulation models. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 77(April 2021), 103083. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2022.103083>
- Aguirre, B. E. (2005). Emergency evacuations, panic, and social psychology. *Psychiatry*, 68(2), 121–129. <https://doi.org/10.1521/psyc.2005.68.2.121>
- Ahrens, K. L. (2018). *Increased Individual Size and Its Effect on Emergency Evacuation Scenarios*. University of Maryland.
- Almejmaj, M., Meacham, B., & Skorinko, J. (2014). The effects of cultural differences between the west and Saudi Arabia on emergency evacuation—clothing effects on walking speed. *Fire and Materials*. <https://doi.org/10.1002/fam.2227>
- Almejmaj, M., Skorinko, J. L., & Meacham, B. J. (2017). The effects of cultural differences between the us and saudi arabia on emergency evacuation—Analysis of self reported recognition/reaction times and cognitive state. *Case Studies in Fire Safety*, 7, 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.csfs.2016.12.002>
- Altshuler, E., Ramos, O., Núñez, Y., Fernández, J., Batista-Leyva, A. J., & Noda, C. (2005). Symmetry breaking in escaping ants. *American Naturalist*, 166(6), 643–649. <https://doi.org/10.1086/498139>
- Ando, K., Ota, H., & Oki, T. (1998). Forecasting the flow of people (in Japanese). *RRR (Railway Research Review)*, 45(8), 8–14.
- Babrauskas, V., Fleming, J. M., & Russell, B. D. (2010). RSET/ASET, a flawed concept for fire safety assessment. *Fire and Materials*, April 2010, 341–355.
- BBC News. (1999). *Belarus stampede kills 54*. <http://news.bbc.co.uk/2/hi/europe/356828.stm> (acedido em 2021-06-19)
- Belinsky, M., Dveyrin, D., & Katoshevski, D. (2010). *Optimization of Smoke Management System in Short Transportation Tunnels*. *Fds* 5, 545–548. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2062.1844>
- Ben Amor, H., Murray, J., & Obst, O. (2006). Fast, Neat, and Under Control: Arbitrating Between Steering Behaviors. *AI Game Programming Wisdom 3*, 221–232.
- Bilge, M. I. (2018). CFD SIMULATION OF TRAIN FIRE IN THE ISTANBUL METRO TUNNEL. In *Energies*. MIDDLE EAST TECHNICAL UNIVERSITY.

- Boyce, K. E., Shields, T. J., & Silcock, G. W. H. (1999). Toward the characterization of building occupancies for fire safety engineering: Capabilities of disabled people moving horizontally and on an incline. *Fire Technology*, 35(1), 51–67. <https://doi.org/10.1023/A:1015339216366>
- Breznitz, S. (1984). *Cry Wolf: The Psychology of False Alarms*.
- British Standards Institution. (1997). *DD240 - Fire Safety Engineering in Buildings, Part 1: Guide to the Application of Fire Safety Engineering Principles, Table 21*.
- British Standards Institution. (2004). *PD 7974-6 - The application of fire safety engineering principles to fire safety design of buildings - Part 6: Human factors: Life safety strategies — Occupant evacuation, behaviour and condition (Sub-system 6)*.
- Bryan, J. L. (1957). *A Study of the Survivors Reports on the Panic in the Fire at the Arundel Park Hall in Brooklyn, Maryland on January 29, 1956*. University of Maryland. <https://books.google.pt/books?id=j5OQYgEACAAJ>
- Bryan, J. L. (2002). A selected historical review of human behavior in fire. *Fire Protection Engineering*, 16, 4–10.
- Canter, D. (1980). Fires and human behaviour: Emerging issues. *Fire Safety Journal*, 3(1), 41–46. [https://doi.org/10.1016/0379-7112\(80\)90006-5](https://doi.org/10.1016/0379-7112(80)90006-5)
- Castro, J. D., Rhodes, N., & Leoutsakos, G. (1997). CFD Prediction of Smoke Movement in a Double Track Bored Tunnel, a Cut and Cover Station and a Mined Station in the Athens Metro. *Ninth International Symposium on the Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels*.
- Chiam, B. H. (2005). Numerical Simulation of a Metro Train Fire [University of Canterbury - Christchurch, New Zealand]. In *Fire Engineering*. http://www.civil.canterbury.ac.nz/fire/fe_resrch_reps.html.
- Chua, K. H. (2003). *Guideline for Determining Heat Release Rate for Train Fire in Underground / Enclosed Trainway (Unpublished)*. Land Transport Authority.
- CM Jornal. (2018). *Passadeira de Metro incendeia-se na estação de Entrecampos em Lisboa*. <https://www.cmjornal.pt/portugal/detalhe/passadeira-de-metro-de-entrecampos-incendiou-se> (acedida em 2021-06-05)
- Cunningham, P. P., & Cullen, D. A. (1995). Pedestrian flow data collection and analysis. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Transport*, 111(2), 149–159. <https://doi.org/10.1680/itrans.1995.27585>
- Daly, P. N., McGrath, F., & Annesly, T. J. (1991). Pedestrian speed/flow relationships for underground stations. *Traffic Engineering Control*, 32, 75–78.
- Drake, S., & Meeks, K. R. (2000). Confidence Gaining by Computer Simulation of Emergency Tunnel Ventilation Design. *First International Conference, Tunnel and Underground Stations Fires*.

-
- Fahy, R. F., & Proulx, G. (2009). "Panic" and human behaviour in fire. *Proceedings of the 4th International Symposium on Human Behaviour in Fire*, 387–398. [http://www.survivorsnet.org/research/WTC Study at Fire Symposium 2009.pdf](http://www.survivorsnet.org/research/WTC%20Study%20at%20Fire%20Symposium%202009.pdf)
- Fennel, D. (1988). Investigation into the King's Cross Underground Fire. In *Her Majesty's Stationery Office*. [https://doi.org/10.1016/0379-7112\(89\)90051-9](https://doi.org/10.1016/0379-7112(89)90051-9)
- Fridolf, K. (2010). Fire Evacuation in Underground Transportation Systems: A Review of Accidents and Empirical Research. In *Lund University, Sweden*. <https://doi.org/10.1007/s10694-011-0217-x>
- Fridolf, Karl, Ronchi, E., Nilsson, D., & Frantzich, H. (2019). The representation of evacuation movement in smoke-filled underground transportation systems. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 90(December 2017), 28–41. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2019.04.016>
- Fruin, J. J. (1971). *Pedestrian planning and design*. Planners, Metropolitan Association of Urban Designers and Environmental.
- Fruin, J. J., & Strakosch, G. R. (1987). *Pedestrian Planning and Design*. Elevator World. <https://books.google.pt/books?id=vrckAQAAMAAJ>
- Fujiyama, T., & Tyler, N. (2004). Pedestrian Speeds on Stairs -An Initial Step for a Simulation Model. *Proceedings of 36th Universities Transport Studies Group Conference, December 2014*, 7C1.1-11. http://discovery.ucl.ac.uk/1241/1/2004_19.pdf
- Galea, E. R., Sauter, M., Deere, S. J., & Filippidis, L. (2011). Investigating the impact of culture on evacuation behavior - A Turkish data-set. *Fire Safety Science*, 709–722. <https://doi.org/10.3801/IAFSS.FSS.10-709>
- Gershon, R. R. M., Magda, L. A., Riley, H. E. M., & Sherman, M. F. (2011). TheWorld Trade Center evacuation study: Factors associated with initiation and length of time for evacuation. *FIRE AND MATERIALS*. <https://doi.org/10.1002/fam.1080> TheWorld
- Graham, T. L., & Roberts, D. J. (2000). Qualitative overview of some important factors affecting the egress of people in hotel fires. *International Journal of Hospitality Management*, 19(1), 79–87. [https://doi.org/10.1016/s0278-4319\(99\)00049-3](https://doi.org/10.1016/s0278-4319(99)00049-3)
- GSA. (1972). Building Fire Safety Criteria, Appendix D. *General Services Administration*.
- Gwynne, S., Galea, E. R., Parke, J., & Hickson, J. (2003). The collection and analysis of pre-evacuation times derived from evacuation trials and their application to evacuation modelling. *Fire Technology*, 39(2), 173–195. <https://doi.org/10.1023/A:1024212214120>
- Hankin, B. D., & Wright, R. A. (1958). Passenger Flow in Subways. *Journal of the Operational Research Society*, 9(2), 81–88. <https://doi.org/10.1057/jors.1958.9>
- Hart, P. E. ., Nilsson, N. J. ., & Raphael, B. (1968). A Formal Basis for the Heuristic Determination of Minimum Cost Paths. *IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics*, 4(2), 100–107. <https://doi.org/10.1109/TSSC.1968.300136>
-

- Hartzell, G. E., Switzer, W. G., & Priest, D. N. (1985). Modeling of toxicological effects of fire gases: V. Mathematical modeling of intoxication of rats by combined carbon monoxide and hydrogen cyanide atmospheres. *Journal of Fire Sciences*, 3(5), 330–342. <https://doi.org/10.1177/073490418500300504>
- Hettinger, J. C., & Barnett, J. . (1991). Evolution of the Fire Development Scenario for Subway Vehicle Fires Historical Observations, Vehicle Design Standards, and Application of the COMPF2 Post-Flashover Computer Model. In Elsevier Science Publ. Ltd. (Ed.), *Proceedings of the Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels*.
- Hofinger, G., Zinke, R., & Künzer, L. (2014). Human factors in evacuation simulation, planning, and guidance. *Transportation Research Procedia*, 2(0), 603–611. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2014.09.101>
- Hong, W.-H. (2004). The Progress And Controlling Situation Of Daegu Subway Fire Disaster. *Fire Safety Science*, 6, s-5--1.
- IMO. (2016). Revised guidelines on evacuation analasys for new and existing passanger ships. *International Maritime Organization, MSC.1/Circ.*
- ISO. (2012). *ISO 13571:2012 Life-threatening components of fire — Guidelines for the estimation of time to compromised tenability in fires*. International Organization for Standardization.
- Jiang, C. S., Deng, Y. F., Hu, C., Ding, H., & Chow, W. K. (2009). Crowding in platform staircases of a subway station in China during rush hours. *Safety Science*, 47(7), 931–938. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2008.10.003>
- Jiang, C. S., Ling, Y., Hu, C., Yang, Z., Ding, H., & Chow, W. K. (2009). Numerical simulation of emergency evacuation of a subway station: A case study in beijing. *Architectural Science Review*, 52(3), 183–193. <https://doi.org/10.3763/asre.2008.0047>
- Jiang, C. S., Yuan, F., & Chow, W. K. (2010). Effect of varying two key parameters in simulating evacuation for subway stations in China. *Safety Science*, 48(4), 445–451. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2009.12.004>
- Jin, T. (2002). Visibility and Human Behavior in Fire Smoke. In P. J. DiNenno (Ed.), *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, Section 2, Chapter 4* (3rd ed., pp. 2-42/2-53). National Fire Protection Association.
- Jin, T., & Yamada, T. (1985). Irritating Effects of Fire Smoke on Visibility. In *Fire Science and Technology* (Vol. 5, Issue 1, pp. 79–90). <https://doi.org/10.3210/fst.5.79>
- Johnson, G. (2006). Smoothing a Navigation Mesh Path. In *AI Game Programming Wisdom Vol 3*.
- Joseph, B. R. J. (2008). *Arundel Burning: The Maryland Oyster Roast Fire of 1956*. Publishing Concepts (Baltimore, MD).
- Kady, R. A., & Davis, J. (2009). The effect of occupant characteristics on crawling speed in evacuation. *Fire Safety Journal*, 44(4), 451–457. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2008.09.010>
-

- Kallianiotis, A., Papakonstantinou, D., Arvelaki, V., & Benardos, A. (2018). Evaluation of evacuation methods in underground metro stations. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 31(June), 526–534. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2018.06.009>
- Kallianiotis, A., Papakonstantinou, D., Benardos, A., & Kaliampakos, D. (2018). Fire and smoke effects to occupants and evacuation procedures in a metro station. *16th World Conference of the Associated Research Centers for the Urban Underground Space (ACUUS 2018)*, November.
- Kennedy, W. D., & Patel, S. J. (1988). The Mount Lebanon Tunnel Ventilation System. *Sixth International Symposium on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels*.
- Kennedy, W. D., Ray, R. E., & Guinan, J. W. (1998). A Short History of Train Fire Heat Release Rate Calculations. *Annual ASHRAE Meeting 1998*.
- Kholshevnikov, V. V., Samoshin, D. A., & Parfenenko, A. P. (2009). Pre-school and school children building evacuation. *Proceedings of the Fourth International Symposium on Human Behaviour in Fire*, 243–254. http://www.fireevacuation.ru/Archive_En/HBF_09.pdf
- Kinateder, M., Comunale, B., & Warren, W. H. (2018). Exit choice in an emergency evacuation scenario is influenced by exit familiarity and neighbor behavior. *Safety Science*, 106(December 2016), 170–175. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2018.03.015>
- Klote, J. H. (2016). Smoke Control. In M. Hurley (Ed.), *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering - Chapter: 50* (5th ed., pp. 1785–1823). Springer.
- Korhonen, T., Hostikka, S., Heliövaara, S., Ehtamo, H., & Matikainen, K. (2007). Fds+ Evac: Evacuation module for fire dynamics simulator. *Proceedings of the Interflam2007: 11th International Conference on Fire Science and Engineering*, 3(January), 1443–1448.
- Korhonen, Timo. (2018). *Fire Dynamics Simulator with Evacuation: FDS+Evac, Technical Reference and User's Guide. Sixth Edition*. VTT Technical Research Centre of Finland. http://virtual.vtt.fi/virtual/proj6/fdsevac/documents/FDS+EVAC_Guide.pdf
- Kretz, T., Grünebohm, A., Kessel, A., Klüpfel, H., Meyer-König, T., & Schreckenberger, M. (2008). Upstairs walking speed distributions on a long stairway. *Safety Science*, 46(1), 72–78. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2006.10.001>
- Lam, W. H. K., & Cheung, C. (2000). PEDESTRIAN SPEED-FLOW RELATIONSHIPS FOR WALKING FACILITIES IN HONG KONG. *Journal of Transportation Engineering*, 126(4)(August), 343–349.
- Levin, B. (1989). EXITT- A Simulation Model Of Occupant Decisions And Actions In Residential Fires. *Fire Safety Science*, 2(July), 561–570. <https://doi.org/10.3801/iafss.fss.2-561>
- Lovreglio, R., Fonzone, A., dell'Olio, L., Borri, D., & Ibeas, A. (2014). The Role of Herding Behaviour in Exit Choice During Evacuation. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 160(Cit), 390–399. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2014.12.151>

- Lovreglio, Ruggiero, Fonzone, A., dell'Olio, L., & Borri, D. (2016). A study of herding behaviour in exit choice during emergencies based on random utility theory. *Safety Science*, 82, 421–431. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2015.10.015>
- LRT. (1984). *The Fire on 23rd November 1984 at Oxford Circus station: Enquiry Report*. London Regional Transport.
- MacClintock, Shields, T., Reinhardt-Rutland, & Leslie, J. (2001). *A Behavioural solution To The learned Irrelevance Of Emergency Exit Signage*.
- McGrattan, K., Hostikka, S., Floyd, J., McDermott, R., & Marcos, V. (2021). *Fire Dynamics Simulator User's Guide. NIST Special Publication 1019 Sixth Edition*. National Institute of Standards and Technology: NIST. <http://dx.doi.org/10.6028/NIST.SP.1019>
- Meacham, B. J. (1998). The evolution of performance-based codes and fire safety design methods. *Nist-Gcr-98-761, January 1998*.
- Meacham, B. J. (1999). Integrating human factors issues into engineered fire safety design. *Fire and Materials*, 23(6), 273–279. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1018\(199911/12\)23:6<273::AID-FAM699>3.0.CO;2-Q](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1018(199911/12)23:6<273::AID-FAM699>3.0.CO;2-Q)
- Metropolitano de Lisboa. (1976). *História do Metro - Ano de 1976*. <https://www.metrolisboa.pt/institucional/1976/02/21/1976/> (acedido em 2021-06-05)
- Metropolitano de Lisboa. (2019). *Estação Baixa-Chiado celebra 21 Anos*. <https://www.metrolisboa.pt/institucional/2019/08/06/estacao-baixa-chiado-celebra-21-anos/> (acedida em 2021-06-05)
- Metropolitano de Lisboa. (2020). *Novo recorde de Clientes em 2019*. <https://www.metrolisboa.pt/2020/01/29/novo-recorde-de-clientes-em-2019/> (acedido em 2021-06-05)
- Metropolitano de Lisboa. (2021). *Metro em números*. <https://www.metrolisboa.pt/institucional/conhecer/metro-em-numeros/> (acedido em 2021-06-05)
- Mishra, P., & Aharwal, K. R. (2018). A review on selection of turbulence model for CFD analysis of air flow within a cold storage. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 402(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/402/1/012145>
- Musluoglu, E. (2009). *A theoretical analysis of fire development and flame spread in underground trains*.
- Nagai, R., Fukamachi, M., & Nagatani, T. (2005). Experiment and simulation for counterflow of people going on all fours. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 358(2–4), 516–528. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2005.04.024>
- Nelson, H. E. “Bud,” & Mowrer, F. W. (2002). Emergency Movement. In P. J. DiNenno (Ed.), *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, Section 3, Chapter 14* (3rd ed., pp. 3-367/3-380). National Fire Protection Association.
- NFPA. (2020). *NFPA 130 - Standard for Fixed Guideway Transit and Passenger Rail Systems*. National Fire Protection Association.
-

- NFPA204. (2012). *NFPA 204 - Standard for Smoke and Heat Venting*. National Fire Protection Association.
- Nilsson, D. (2015). Design of fire alarms: Selecting appropriate sounds and messages to promote fast evacuation. *Sound, Safety & Society*, 33–46.
- Nilsson, D., & Frantzich, H. (2010). Design of Voice Alarms—the Benefit of Mentioning Fire and the Use of a Synthetic Voice. In W.W.F. Klingsch et al. (Ed.), *Pedestrian and Evacuation Dynamics 2008*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-04504-2>
- Observador. (2019). *Metro de Lisboa. Incêndio interrompeu circulação na linha azul*. <https://observador.pt/2019/01/21/metro-de-lisboa-incendio-interrompeu-circulacao-na-linha-azul/> (acedida em 2021-06-05)
- Okada, N., Hasemi, Y., & Moriyama, S. (2012). Feasibility of upward evacuation by escalator — An experimental study. *Fire and Materials*, 36. <https://doi.org/10.1002/fam>
- Okamoto, E., Hasemi, Y., Moriyama, S., & Okada, N. (2011). Experiments for the Feasibility Study of the Evacuation by Moving Escalator in Public Space. In A. J. (eds) Peacock R., Kuligowski E. (Ed.), *Pedestrian and Evacuation Dynamics* (pp. 649–659). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-9725-8>
- Olsson, P. Å., & Regan, M. A. (2001). A comparison between actual and predicted evacuation times. *Safety Science*, 38(2), 139–145. [https://doi.org/10.1016/S0925-7535\(00\)00064-3](https://doi.org/10.1016/S0925-7535(00)00064-3)
- OSHA. (1995). *Precautions and the Order of Testing before Entering Confined and Enclosed Spaces and Other Dangerous Atmospheres.* Occupational Safety and Health Administration. United States Department of Labor: OSHA.
- Owen, M., Galea, E. R., & Lawrence, P. J. (1996). The EXODUS Evacuation Model Applied To Building Evacuation Scenarios. *Journal of Fire Protection Engineering*, 8(2), 65–84. <https://doi.org/10.1177/104239159600800202>
- Papakonstantinou, R., Kallianiotis, A., Papakonstantinou, D., & Menegaki, M. (2021). Computer modeling analysis of METRO ticket gates impact to evacuation procedures. *17th World Conference ACUUS 2020 Helsinki*. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/703/1/012038>
- PORDATA. (2011). *PORDATA, Base de Dados de Portugal Contemporâneo*. <https://www.pordata.pt/> (acedida em 2021-10-31)
- Predtechenskii, V.M.; Milinskii, A. (1969). *Planning for Foot Traffic in Buildings*.
- Proulx, G., Laroche, C., Jaspers-Fayer, F., & Lavallée, R. (2001). Fire Alarm Signal Recognition. In *Institute for Research in Construction - Internal Report No. 828*. <https://doi.org/10.4224/20386276>
- Proulx, G., & Sime, J. (1991). To Prevent “Panic” In An Underground Emergency: Why Not Tell People The Truth? *Fire Safety Science*, 3, 843–852. <https://doi.org/10.3801/iafss.fss.3-843>

- Proulx, Guylène. (2002). Movement of People: The Evacuation Timing. In P. J. DiNenno (Ed.), *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, Section 3, Chapter 13* (3rd ed., pp. 3–342/3–366). National Fire Protection Association.
- Proulx, Guylène. (2003). Playing with fire: Understanding human behavior in burning buildings. *ASHRAE Journal*, 45(7), 33–35.
- Purser, D. (2003). ASET and RSET: Addressing some issues in relation to occupant behaviour and tenability. *Fire Safety Science, January 2003*, 91–102. <https://doi.org/10.3801/IAFSS.FSS.7-91>
- Purser, D. (2010). Comparisons of Evacuation Efficiency and Pre-travel Activity Times in Response to a Sounder and Two Different Voice Alarm Messages. In W. Klingsch, C. Rogsch, A. Schadschneider, & M. Schreckenberg (Eds.), *Pedestrian and Evacuation Dynamics 2008* (Issue October). Springer. https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-642-04504-2_9
- Purser, D. A. (2010). 4 - Asphyxiant Components of Fire Effluents. In A. Stec & R. Hull (Eds.), *Fire Toxicity* (pp. 118–98). Woodhead Publishing.
- Purser, David A. (2000). Toxic product yields and hazard assessment for fully enclosed design fires. *Polymer International*, 49(10), 1232–1255. [https://doi.org/10.1002/1097-0126\(200010\)49:10<1232::AID-PI543>3.0.CO;2-T](https://doi.org/10.1002/1097-0126(200010)49:10<1232::AID-PI543>3.0.CO;2-T)
- Purser, David A., & McAllister, J. L. (2016). Assessment of hazards to occupants from smoke, toxic gases and heat. In M. Hurley (Ed.), *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering - Chapter: 63* (5th ed., pp. 2308–2428). Springer.
- Quarantelli, E. L. (1954). The Nature and Conditions of Panic. *THE AMERICAN JOURNAL OF SOCIOLOGY*, 60, 267–275.
- Ramachandran, G. (1990). Human behavior in fires-a review of research in the United Kingdom. *Fire Technology*, 26(2), 149–155. <https://doi.org/10.1007/BF01040179>
- Reynolds, C. W. (1999). Steering Behaviors For Autonomous Characters. *Proceedings of the 1999 Game Developer's Conference*.
- Reynolds, R. F., & Bronstein, A. M. (2003). The broken escalator phenomenon: Aftereffect of walking onto a moving platform. *Experimental Brain Research*, 151(3), 301–308. <https://doi.org/10.1007/s00221-003-1444-2>
- Ribeiro, F., & Lopes, M. do C. (1999). Segurança deficiente no metro. *Público*. <https://www.publico.pt/1999/04/19/jornal/seguranca-deficiente-no-metro-132418> (acedido em 2021-06-05)
- RJ-SCIE. (2008). Regime Jurídico da Segurança Contra Incêndio em Edifícios (RJ-SCIE) - DL 220/2008, de 12 de novembro, alterado pelo DL 224/2015, de 9 de outubro, pelo DL 95/2019, de 18 de julho, pela Lei 123/2019, de 18 de outubro e pelo DL 9/2021, de 29 de janeiro.

- Roh, J. S., Ryou, H. S., Park, W. H., & Jang, Y. J. (2009). CFD simulation and assessment of life safety in a subway train fire. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 24(4), 447–453. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2008.12.003>
- Rohlén, P., & Wahlström, B. (1996). *Tunnelbaneolyckan i Baku, Azerbajjan 28 oktober 1995* (Title translated to English: *The fire in the Baku metro the 28th of October 1995*).
- Ronchi, E., Reneke, P. A., & Peacock, R. D. (2016). A conceptual fatigue-motivation model to represent pedestrian movement during stair evacuation. *Applied Mathematical Modelling*, 40(7–8), 4380–4396. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2015.11.040>
- RT-SCIE. (2008). Regulamento Técnico de Segurança Contra Incêndio em Edifícios (RT-SCIE) - Portaria n.º 1532/2008, de 29 de dezembro, alterada pela Portaria n.º 135/2020, de 2 de junho.
- Scarpina, F., Cau, N., Cimolin, V., Galli, M., Castelnuovo, G., Priano, L., Pianta, L., Corti, S., Mauro, A., & Capodaglio, P. (2017). Body-scaled action in obesity during locomotion: Insights on the nature and extent of body representation disturbances. *Journal of Psychosomatic Research*, 102(September), 34–40. <https://doi.org/10.1016/j.jpsychores.2017.09.004>
- Schröder, B., Arnold, L., & Seyfried, A. (2020). A map representation of the ASET-RSET concept. *Fire Safety Journal*, 115(April). <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2020.103154>
- SFPE. (2016). SFPE handbook of fire protection engineering (2016). In M. J. Hurley, D. T. Gottuk, J. R. H. Jr., K. Harada, E. D. Kuligowski, M. Puchovsky, J. L. Torero, J. M. W. Jr., & C. J. Wieczorek (Eds.), *Society of Fire Protection Engineers* (5th ed.). Springer-Verlag New York. <https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2565-0>
- SFPE. (2019). SFPE Guide to Human Behavior in Fire. In *SFPE Guide to Human Behavior in Fire*. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-94697-9>
- SIC Notícias. (2016). *Foco de incêndio obrigou a evacuar estação do metro de Lisboa*. <https://sicnoticias.pt/pais/2016-10-07-Foco-de-incendio-obrigou-a-evacuar-estacao-do-metro-de-Lisboa> (acedida em 2021-06-05)
- Sime, J. D. (1985). Movement toward the familiar: Person and Place Affiliation in a Fire Entrapment Setting. *Environment and Behavior*, 17(6), 697–724. <https://doi.org/10.1177/0013916585176003>
- Design and Construction of Building Exits*, (1935) (testimony of National Bureau of Standards). https://www.designingbuildings.co.uk/wiki/Environmental_product_declaration
- Statens Haverikommission. (2009). *Rapport RJ 2009 : 10 Brand i tunnelståg vid Rinkeby station, AB län, den 16 maj 2005 [Fire in a subway train at the Rinkeby station, AB county, 16 May, 2005] Dnr J-06/05*.
- Thompson, P., Nilsson, D., Boyce, K., & McGrath, D. (2015). Evacuation models are running out of time. *Fire Safety Journal*, 78, 251–261. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2015.09.004>

- Thornton, C., Kanski, R. O., Hardeman, B., & Swenson, D. (2011). Pathfinder: An Agent-Based Egress Simulator. *Pedestrian and Evacuation Dynamics*. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-9725-8_94
- Thunderhead Engineering. (2021). Pathfinder Technical Reference Manual - Version: 2021-2. In *Thunderhead Engineering*. https://support.thunderheadeng.com/docs/pathfinder/2021-1/technical-reference-manual/?_ga=2.103489536.122923135.1614546982-1581860049.1594780880
- Togawa, K. (1955). Report No. 14,. *Building Research Institute*.
- TVI24. (2012). LISBOA: INCÊNDIO DEFLAGROU EM ESTAÇÃO DE METRO. <https://tvi24.iol.pt/sociedade/metro-de-lisboa/lisboa-incendio-deflagrou-em-estacao-de-metro> (acedida em 2021-06-05)
- Van Bogaert, A. F. (1986). *Evacuating Schools on Fire*. 551–560. <https://doi.org/10.3801/iafss.fss.1-551>
- Wang, C., & Song, Y. (2020). Fire evacuation in metro stations: Modeling research on the effects of two key parameters. *Sustainability (Switzerland)*, 12(2). <https://doi.org/10.3390/su12020684>
- WHO. (2020). World Health Organization - Obesity and overweight. In *World Health Organization*. <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/obesity-and-overweight> (acedido em 2021-06-03)
- Yang, P., Li, C., & Chen, D. (2013). Fire emergency evacuation simulation based on integrated fire-evacuation model with discrete design method. *Advances in Engineering Software*, 65, 101–111. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2013.06.007>
- Yau, R., Lai, F., Li, J., & Lau, B. (2002). *Design of Tunnel Ventilation System of Underground Rapid Transit System in Bangkok*.
- Yoon, S. H., Lee, M. J., & Yee, J. J. (2013). An experimental study on evacuation times in a subway station using evacuation parameters. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, 12(1), 93–100. <https://doi.org/10.3130/jaabe.12.93>