

ESTUDO DA EVACUAÇÃO DE UMA GARE SUBTERRÂNEA DE METRO EM CASO DE INCÊNDIO

Tiago M. Borralho*
Mestrando em
Segurança aos
Incêndios Urbanos
UC - Coimbra
Portugal

**João Paulo C.
Rodrigues***
Professor
UC – Coimbra,
Portugal e UFMG –
Belo Horizonte,
Brasil

**Cristina Calmeiro
dos Santos**
Professora
IPCB
Portugal

António Valente
Diretor de
Segurança
Metro de Lisboa
Portugal

Palavras-chave: modelação da evacuação, estação de metro, comportamento humano, emergência, incêndio.

1. INTRODUÇÃO

Uma condição 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, têm uma grande concentração de ocupantes, a evacuação tem forçosamente que ser feita no sentido ascendente, e geralmente correspondem a locais de grande dimensão constituindo um único compartimento de fogo.

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, sendo possíveis as seguintes abordagens [1]:

1. As instalações são projetadas para que os ocupantes não sejam expostos às 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;

* Autor correspondente – Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra. Rua Luís Reis Santos. Polo II da Universidade. 3030-788 Coimbra. PORTUGAL. e-mail: tiago.borralho@student.dec.uc.pt

3. Em alguns cenários de incêndio é possível admitir 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).

Yang et al. [2] 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. [3] 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. Este estudo teve como principal objetivo analisar a influência da ocorrência de um incêndio, na evacuação em geral de uma estação de metro, e os seus efeitos nos ocupantes. Para tal, efetuou-se uma análise comparativa do tempo de evacuação, 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.

2. METODOLOGIA

2.1 Objeto do estudo

A Estação de Metro Baixa-Chiado, em Lisboa, Portugal, foi a selecionada por forma a estudar a evacuação de gares subterrâneas de transporte em situação de incêndio, aplicada à realidade portuguesa. Os principais motivos para a escolha desta estação foram a sua dimensão, profundidade, o elevado número de passageiros e ser uma estação que serve duas linhas de metro. 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 do Metropolitano de Lisboa. Em 2018 foi utilizada por cerca de 13,6 milhões passageiros, considerando entradas e saídas. A estação é constituída por duas galerias principais, cada uma com dois níveis. No nível superior, cada linha tem cerca de 140 metros de comprimento, e 15 metros de largura; sendo interligadas neste nível por cinco galerias transversais (Figura 1-A). Os tetos da estação no nível superior são abobadados, nomeadamente nas galerias principais, transversais e de acesso à superfície. 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 transversais (Figura 1-B). 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 pisos. O acesso à superfície faz-se por dois acessos, a partir da zona central 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.

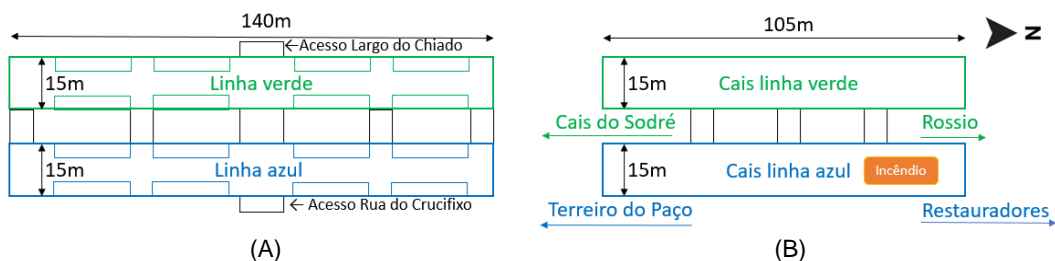


Figura 1 – Representação esquemática dos níveis superior (A) e inferior (B) da Estação Baixa-Chiado e localização do incêndio utilizado nas simulações

2.2 Modelação de incêndio

As simulações de incêndio tiveram por base o motor de cálculo computacional de dinâmica de fluidos do “Fire Dynamics Simulator (FDS)” [4], desenvolvido pelo National Institute for Standards and Technology (NIST). Neste trabalho, foi utilizada a versão FDS 6.7.5. O modelo da estação foi criado no PyroSim [5] (Figura 2), desenvolvido pela Thunderhead Engineering, e que funciona como um pré-processador para o FDS, tendo sido utilizada a sua versão 2020.5.1118.

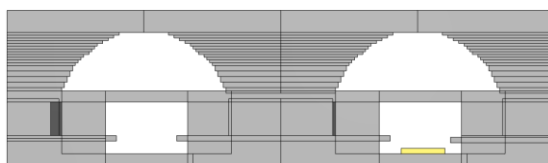


Figura 2 – Geometria da estação modelada no PyroSim - vista em corte

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. Para 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, 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). Foram feitas simulações considerando duas taxas máximas de libertação de calor (HRR), 10 MW e 20 MW. Para integração nas simulações de evacuação foi selecionada a HRR de 20 MW por ser representativa de uma situação mais gravosa para este tipo de ocorrência [6]. Como não foi possível identificar na literatura uma taxa de crescimento específica para um incêndio numa

carruagem, estando esta dependente dos tipos 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. Desta forma, considerando uma curva de incêndio do tipo t^2 , o incêndio atinge o seu pico aos 654 segundos para a HRR considerada. No programa de simulação foi parametrizado um incêndio, constituído por uma superfície com 40 m^2 , do tipo “burner”, com uma HRR de 500 kW/m^2 . A localização considerada para o foco de incêndio foi a indicada na Figura 1-B, 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. 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 $0,117 \text{ kg/kg}$, uma vez este valor é uma boa estimativa para este parâmetro tendo em conta os materiais presentes numa carruagem de metro típica [7]. 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 incêndio, podem funcionar em modo de insuflação, introduzindo ar novo no túnel, ou em modo de extração, retirando o fumo do incêndio. 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 $300 \text{ m}^3/\text{s}$; considerou-se que após a atuação destas superfícies de extração e insuflação as mesmas demoram 50 segundos a atingir o pico, pretendendo-se emular de forma aproximada o efeito de arranque dos ventiladores.

2.3 Modelação 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 “ocupante” que tem características e estratégias de fuga individuais.

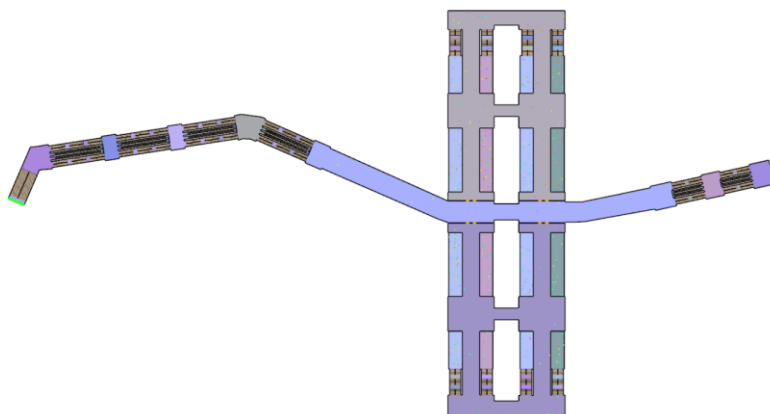


Figura 3 – Geometria da estação modelada no Pathfinder - vista superior

As simulações foram efetuadas com recurso ao programa Pathfinder [8], desenvolvido pela Thunderhead Engineering. O modelo da estação utilizado (Figura 3) teve por base o modelo inicialmente criado no programa PyroSim, tendo em conta as plantas da estação e de acordo com as dimensões referidas acima. Relativamente aos ocupantes presentes na estação foi considerada 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, para o ano de 2011], e que se considera ser representativa da população que utiliza a rede do Metropolitano de Lisboa. Tendo em conta o local em análise, e os períodos em que se prevê maior ocupação, consideram-se apenas as faixas etárias correspondentes à população ativa (entre os 15 anos e os 64 anos). Desta forma, as características da população estudada são as indicadas no Quadro 1. Em cada cenário de evacuação definiu-se uma população para cada zona da estação, respeitando a distribuição percentual da população indicada. A distribuição de pessoas foi feita aleatoriamente, 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). As velocidades de movimento em vias horizontais e verticais utilizadas, para os diferentes géneros e grupos etários, foram as sugeridas pela International Maritime Organization – IMO [9].

Quadro 1 – Proporção e características da população considerada

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

O comportamento dos ocupantes foi definido com base no comportamento pré-definido no programa “Goto Any Exit” em que os ocupantes selecionam o percurso e saída mais vantajosos para a evacuação, isto é, que permitem ao ocupante sair da estação em menos tempo. Foi utilizado o modo de comportamento direcional (em inglês, “steering mode”) em todas as simulações de evacuação, uma vez que este modela de forma mais realista o comportamento dos ocupantes durante uma evacuação. Nos cenários de evacuação com incêndio foi introduzido um atraso inicial no movimento dos ocupantes, correspondente ao tempo de pré-movimento de 120 segundos (sugerido na norma PD 7974:6:2004 [10]). O modelo apresentado pressupõe que o utilizador conhece a estação em estudo, e o melhor acesso ao exterior. No entanto, 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. Nas simulações de evacuação com ocorrência de incêndio, considerou-se 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 m, sendo reduzida até uma velocidade mínima de 0,2 m/s, de acordo com o proposto por Fridolf et al. [11]. Na análise e discussão de resultados, em conjunto com os tempos de evacuação obtidos para cada um

dos cenários, foram analisados os níveis da dose efetiva fracionária (em inglês, “fractional effective dose” - FED) no nível superior da estação, a 2m do pavimento, no final do tempo de simulação de cada cenário. O FED constitui um modelo de avaliação da exposição ao fumo, podendo ser utilizado para verificar se o mesmo é incapacitante ou até mesmo letal [12].

2.3.1 Definição de cenários de evacuação

Foram definidos nove conjuntos de cenários de evacuação (Quadro 2). Em cada cenário variou-se o número de ocupantes das diversas zonas da estação, de modo a corresponder a períodos temporais com diferentes densidades de ocupação, conjugados com a chegada de comboios em diferentes plataformas. 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. O cenário 9.”x” corresponde à ocupação definida no Regulamento Técnico de Segurança Contra Incêndio em edifícios (RT-SCIE) [13] uma vez que a estação possui quatro plataformas, cada uma com cerca de 400 m² de área útil.

Quadro 2 – Número e distribuição de ocupantes da estação em cada conjunto de cenários

Cenário	Tipo de ocupação	Número de pessoas presentes em cada zona da estação				Nível superior	Total
		Linha Verde		Linha Azul			
		Oeste	Este	Oeste	Este		
1.”x”	Baixa	100	100	100	100	100	500
2.”x”	Média	200	200	200	200	200	1000
3.”x”	Elevada	400	400	400	400	200	1800
4.”x”	Média + comboio na linha azul	200	200	200	1200	200	2000
5.”x”	Média + comboio na linha verde	1200	200	200	200	200	2000
6.”x”	Elevada + comboio na linha azul	400	400	400	1200	200	2600
7.”x”	Média + dois comboios	1200	200	200	1200	200	3000
8.”x”	Elevada + dois comboios	1200	400	400	1200	200	3400
9.”x”	Quatro comboios	1200	1200	1200	1200	200	5000

Nota: o “x” corresponde a cada um dos sub-cenários referidos no Quadro 3.

Em cada conjunto de cenários efetuaram-se três simulações (sub-cenários), conforme descrito no Quadro 3. Nos cenários “y”.2 o sistema de desenfumagem é ativado aos 300 segundos da simulação. A análise preliminar dos resultados da simulação de incêndio levou a definir 300 segundos como momento limite para ativação do sistema de controlo de fumo, evitando a acumulação de fumo no nível superior, e a exposição ocupantes ao mesmo. Este intervalo é

coerente com outros estudos desenvolvidos na área (e.g. Belinsky et al. [14]). Considerou-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 no plano de emergência da estação, entre elas a ativação da desenfumagem.

Quadro 3 – Caracterização dos sub-cenários considerados em cada conjunto de cenários

Cenário	Descrição
"y".0	Ocupantes utilizam qualquer uma das saídas, e não ocorre incêndio
"y".1	Idem Cenário "y".0, considerando a existência de um incêndio na Linha Azul, com HRR máxima de 20 MW, e sem sistema de controlo de fumo
y".2	Idem Cenário "y".1, sendo o sistema de controlo de fumo, atuado aos 300 segundos

Nota: o "y" corresponde a cada um dos conjuntos de cenários referidos no Quadro 2

3. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

3.1 Influência do número de ocupantes da estação

Nos cenários "y".0 analisou-se a evacuação numa situação de emergência, sem ocorrência de incêndio, e onde os ocupantes podem escolher a saída que for mais vantajosa (Figura 4 e Quadro 4). Os resultados mostram que o aumento do número de ocupantes na estação leva ao aumento do tempo de movimento (e consequentemente também do tempo de evacuação). O maior aumento foi observado 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). No cenário 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 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 1.0), correspondendo a 49% do tempo de movimento da evacuação. Por sua vez, no 4.0 (com 2000 ocupantes – quatro vezes superior ao cenário 1.0), o tempo máximo de congestionamento é de 587,4 segundos (5 vezes superior ao cenário 1.0), correspondendo a 62% do tempo de movimento da evacuação. Finalmente, no cenário 9.0 (com 5000 ocupantes – dez vezes superior ao cenário 1.0) o tempo máximo de congestionamento é de 1190,8 segundos (10 vezes superior ao cenário 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 na estação aumenta, numa proporção também crescente. Relativamente ao tempo médio de congestionamento, no cenário 1.0 (com 500 ocupantes) este é de 23,6 segundos, correspondendo a 6% do tempo de movimento dos ocupantes, enquanto que no cenário 2.0 (com 1000 ocupantes – o dobro do cenário anterior) o tempo médio de congestionamento é de 92,5 segundos (\approx 4 vezes superior ao cenário 1.0), correspondendo a 15% do tempo de

movimento da evacuação. Por sua vez, no cenário 4.0 (com 2000 ocupantes – quatro vezes superior ao cenário 1.0) o tempo médio de congestionamento é de 200,1 segundos (mais de 8 vezes superior ao cenário 1.0), correspondendo a 22% do tempo de movimento da evacuação.

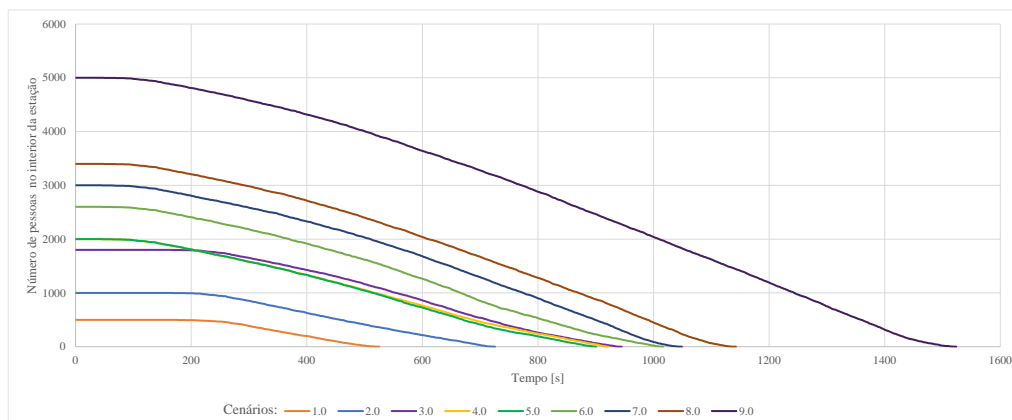


Figura 4 – Número de ocupantes no interior da estação – Cenários “y”.0

Quadro 4 – Resumo dos tempos de evacuação – Cenários “y”.0

Cenários	1.0	2.0	3.0	4.0	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 e o 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 e o tempo de movimento [%]	6%	15%	18%	22%	20%

Cenários	6.0	7.0	8.0	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 e o 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 e o tempo de movimento [%]	21%	24%	24%	29%

Por fim, no cenário 9.0 (com 5000 ocupantes – dez vezes superior ao cenário 1.0) o tempo médio de congestionamento é de 436,6 segundos (mais de 18 vezes superior ao cenário 1.0), correspondendo a 29% do tempo de movimento da evacuação. Nos restantes cenários

observa-se um padrão semelhante, isto é, o tempo médio de congestionamento aumenta à medida que o número de ocupantes da estação aumenta, numa proporção crescente.

3.2 Influência da ocorrência de incêndio

Nos cenários "y".1, 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 (Quadro 5). Os resultados obtidos foram comparados com os cenários "y".0, de modo a analisar a influência da ocorrência de incêndio na evacuação da estação. A Figura 5 permite analisar visualmente a dispersão de fumo no nível superior da estação em 6 momentos chave da simulação (150, 300, 450, 600, 750 e 900 segundos). Observa-se que, aos 300 segundos da simulação, praticamente todo o nível superior está preenchido com fumo.

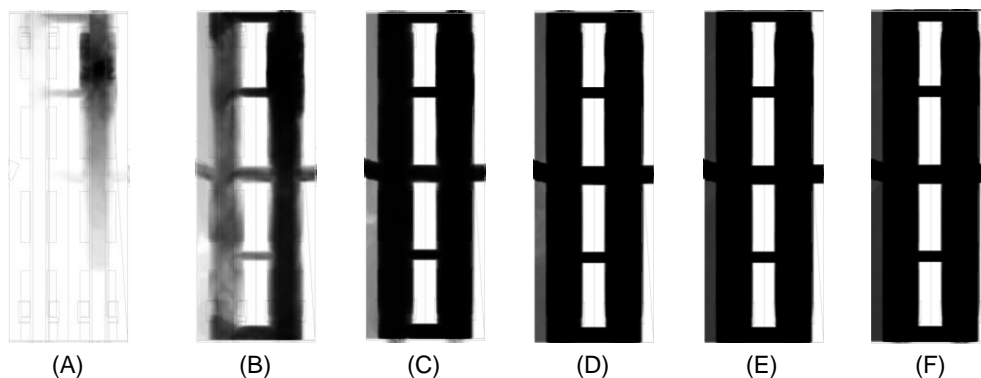


Figura 5 — Dispersão do fumo do incêndio no nível superior da estação – Cenários "y".1:
(A) aos 150 segundos / (B) aos 300 segundos / (C) aos 450 segundos / (D) aos 600 segundos /
(E) aos 750 segundos / (F) aos 900 segundos

Os dados obtidos mostram que o incêndio não foi um fator penalizador do tempo de evacuação no cenário 1.1, correspondendo a um período de baixa ocupação da estação (500 ocupantes). Nos restantes cenários o tempo de evacuação é aumentado pela ocorrência de um incêndio. Analisando os níveis da dose efetiva fracionária (FED), no final do tempo de simulação deste cenário, verifica-se os mesmos são residuais, pelo que seria expectável que a evacuação dos ocupantes nestas condições decorresse sem incidentes. No cenário 2.1, 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 2.0). Os níveis da dose efetiva fracionária (FED) mostram que o valor máximo de FED mantém-se abaixo do valor de referência de 0,3, ainda que apresente 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 [15]. Relativamente ao cenário 3.1, 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 3.0). Este aspeto pode ser explicado pelos níveis de densidade ótica de fumo que são suficientes para reduzir a velocidade dos ocupantes [11]. No final da simulação observa-se ainda que o valor máximo de FED excede largamente o valor

de referência de 0,3, pelo que se prevê que uma parte considerável da população (entre 50% e 89%) pudesse ficar incapacitada durante a evacuação [15]. O tempo de movimento registado no cenário 3.1, bem como o elevado nível da dose efetiva fracionária (FED) registado no nível superior da estação, sugerem que o cenário 2.1 corresponde às condições limite para uma evacuação segura, para um incêndio com as características preconizadas (Figura 6). Mesmo assim seria expectável que uma pequena parte da população ficasse incapacitada durante a evacuação, isto é, a exposição ao fumo seria suficiente para impedir a evacuação ou resultar em lesões, problemas de saúde prolongados ou a morte.

Quadro 5 – Resumo dos resultados da simulação de evacuação – Cenários EVAC."y".1

Cenários		1.1	2.1	3.1	4.1	5.1
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 "y".0 [s]		-5,2	64,7	432,0	622,6	518,4
Diferença do tempo de movimento em relação ao cenário "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 Linha Verde	0,03 0,01	0,24 0,12	2,04 1,49	3,64 2,78

Cenários		6.1	7.1	8.1	9.1 (*)
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 "y".0 [s]		733,6	839,9	991,4	1712,9
Diferença do tempo de movimento em relação ao cenário "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 Linha Verde	5,13 4,02	6,21 4,93	8,45 6,84

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.

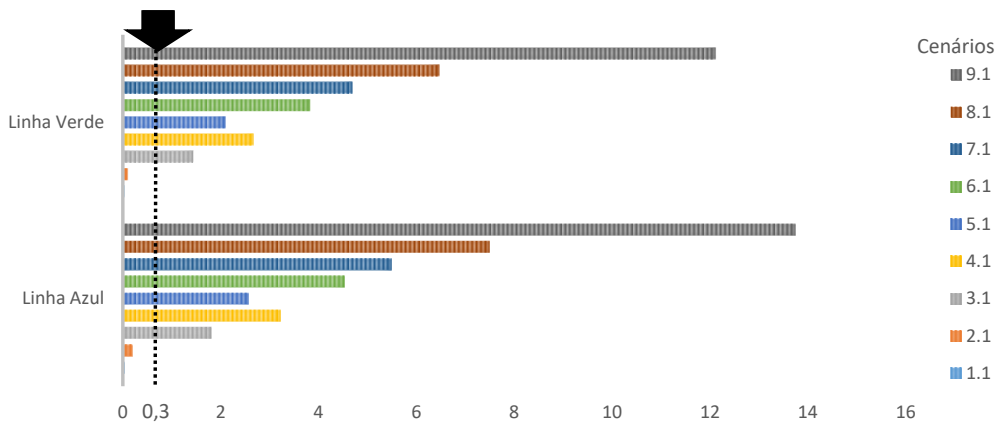


Figura 6 – Dose efetiva fracionária média (FED) no nível superior da estação, no final do tempo de evacuação de cada cenário

Os resultados da simulação dos cenários “y”.2, considerando a evacuação numa situação de emergência, com ocorrência de um incêndio, e com a ativação do sistema de desenfumagem aos 300 segundos da simulação, são apresentados no Quadro 6. A Figura 7 permite analisar visualmente a dispersão de fumo no nível superior da estação em 6 momentos chave da simulação (150, 300, 450, 600, 750 e 900 segundos). Quando a desenfumagem entra em funcionamento, aos 300 segundos da simulação, 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. De um modo geral, não se verifica um aumento dos tempos de evacuação quando é ativada a desenfumagem.

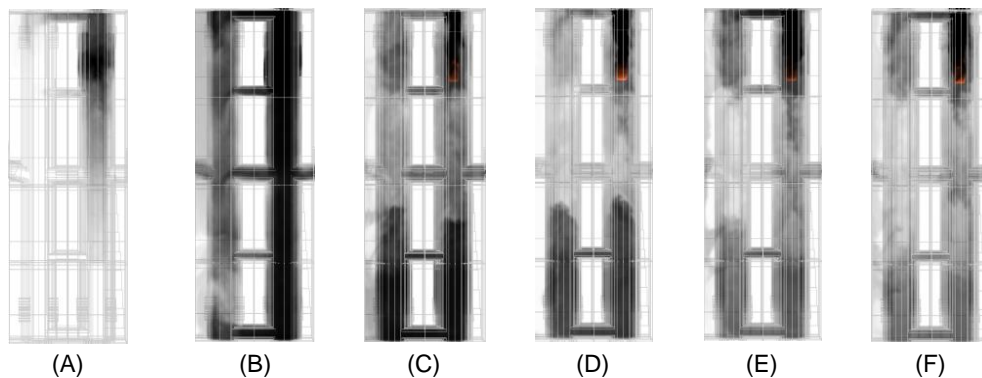


Figura 7 – Dispersão do fumo do incêndio no nível superior da estação – Cenários “y”.2: (A) aos 150 segundos / (B) aos 300 segundos / (C) aos 450 segundos / (D) aos 600 segundos / (E) aos 750 segundos / (F) aos 900 segundos

Analisando os níveis da dose efetiva fracionária (FED) no nível superior da estação, 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 de condições necessárias para uma evacuação segura.

Quadro 6 – Resumo dos resultados da simulação de evacuação – Cenários "y".2

Cenário	1.2	2.2	3.2	4.2	5.2
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 "y".0 [s]	-2,3	2,9	10,0	0,2	-5,8
Diferença do tempo de movimento em relação ao cenário "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

Cenário	6.2	7.2	8.2	9.2
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 "y".0 [s]	2,7	-3,1	-25,8	-14,4
Diferença do tempo de movimento em relação ao cenário "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

4. CONCLUSÕES

O conjunto de simulações desenvolvidas permitiu 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 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 ocupantes não seja superior a 1000 pessoas.

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 de uma das saídas torna a evacuação por essa via mais demorada, podendo não ser uma opção viável para alguns ocupantes, com pior forma física ou com algum tipo condicionalismo 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 mostraram 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. As ferramentas computacionais permitiram identificar vários fatores condicionantes, levando ao melhoramento e desenvolvimento de soluções que em última instância resultarão num processo de evacuação mais eficiente e eficaz.

5. AGRADECIMENTOS

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. 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 neste estudo.

REFERÊNCIAS

- [1] D. A. Purser and J. L. McAllister, "Assessment of hazards to occupants from smoke, toxic gases and heat," in *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering - Chapter: 63*, 5th ed., M. Hurley, Ed. Springer, 2016, pp. 2308–2428.
- [2] P. Yang, C. Li, and D. Chen, "Fire emergency evacuation simulation based on integrated fire-evacuation model with discrete design method," *Adv. Eng. Softw.*, vol. 65, pp. 101–111, 2013, doi: 10.1016/j.advengsoft.2013.06.007.
- [3] A. Kallianiotis, D. Papakonstantinou, A. Benardos, and D. Kaliampakos, "Fire and smoke effects to occupants and evacuation procedures in a metro station," in *16th World Conference of the Associated Research Centers for the Urban Underground Space (ACUUS 2018)*, 2018, no. November.
- [4] K. McGrattan, S. Hostikka, R. McDermott, J. Floyd, C. Weinschenk, and K. Overholt, "Sixth Edition Fire Dynamics Simulator Technical Reference Guide Volume 1: Verification guide," vol. 1, pp. 1–147, 2015.
- [5] Thunderhead Engineering, "PyroSim User Manual - Version: 2021-4." 2021, [Online]. Available: www.thunderheadeng.com.
- [6] B. H. Chiam, "Numerical Simulation of a Metro Train Fire," University of Canterbury - Christchurch, New Zealand, 2005.
- [7] E. Musluoglu, "A theoretical analysis of fire development and flame spread in underground trains," 2009.
- [8] Thunderhead Engineering, "Pathfinder Technical Reference Manual - Version: 2021-2," *Thunderhead Engineering*. 2021, [Online]. Available: https://support.thunderheadeng.com/docs/pathfinder/2021-1/technical-reference-manual/?_ga=2.103489536.122923135.1614546982-1581860049.1594780880.
- [9] IMO, "Revised guidelines on evacuation analysis for new and existing passenger ships," *Int. Marit. Organ.*, vol. MSC.1/Circ, 2016.
- [10] British Standards Institution, "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)." 2004.
- [11] K. Fridolf, E. Ronchi, D. Nilsson, and H. Frantzich, "The representation of evacuation movement in smoke-filled underground transportation systems," *Tunn. Undergr. Sp. Technol.*, vol. 90, no. December 2017, pp. 28–41, 2019, doi: 10.1016/j.tust.2019.04.016.
- [12] J. H. Klote, "Smoke Control," in *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering - Chapter: 50*, 5th ed., M. Hurley, Ed. Springer, 2016, pp. 1785–1823.
- [13] "RT-SCIE." 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, 2008.
- [14] M. Belinsky, D. Dveyrin, and D. Katoshevski, "Optimization of Smoke Management System in Short Transportation Tunnels," no. Fds 5, pp. 545–548, 2010, doi: 10.13140/RG.2.1.2062.1844.
- [15] ISO, "ISO 13571:2012 Life-threatening components of fire — Guidelines for the estimation of time to compromised tenability in fires." International Organization for Standardization, 2012.