



31ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA
12º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

CATEGORIA 3

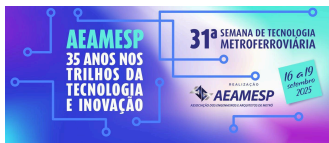
CFD como Ferramenta de Suporte ao Projeto de Sistemas de Controle de
Fumaça em Estações Metroviárias¹

SOBRE OS AUTORES

André Carlos Contini - Graduado em Física pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) em 2007 e Doutor em Fenômenos de Transporte pela mesma universidade em 2021. Atualmente, ocupa a posição de Engenheiro CFD na empresa ENGYS, com foco em engenharia de aplicação e suporte em CFD.

Lisandro Maders - Engenheiro Mecânico pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (Brasil) em 2015. Mestre em Fenômenos de Transporte pela mesma universidade em 2018. Atualmente, Lisandro é o Head de Vendas e Marketing global da ENGYS, e Gerente Geral de todas as operações da ENGYS na América Latina.

¹ Artigo finalista do 12º Prêmio Tecnologia & Desenvolvimento Metroferroviários



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



31ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

12º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

Gustavo Almeida - Graduado em Engenharia Mecânica e possui mestrado em Engenharia Aeronáutica e Mecânica pelo Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA). Também concluiu o doutorado em Ciências da Computação no ITA, com foco em Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD). Com mais de quatro anos de experiência no desenvolvimento de sistemas aeronáuticos, faz parte da equipe de engenharia da ENGYS, onde atua como engenheiro de aplicação e suporte em CFD.



CFD como Ferramenta de Suporte ao Projeto de Sistemas de Controle de Fumaça em Estações Metroviárias

INTRODUÇÃO

O metrô de São Paulo está em expansão, com diversas linhas em construção e outras em fase de projeto, buscando atender à crescente demanda da população. Entre 2022 e 2024, a cidade de São Paulo registrou um aumento de mais de 400 mil habitantes [1]. Atualmente, as linhas 2-Verde, 6-Laranja (privada), 15-Prata e 17-Ouro já estão em obras, enquanto as linhas 16-Violeta, 19-Celeste, 20-Rosa e 22-Marrom estão sendo projetadas [2].

A linha 19-Celeste, que motivou o presente estudo, destaca-se pelas diferenças arquitetônicas e de *layout* de suas estações. Essa variação ocorre devido às diferentes demandas de passageiros e à disposição dos acessos às estações. Essa não uniformidade na arquitetura interna representam um desafio significativo para a previsibilidade do comportamento do sistema de ventilação, especialmente em situações de emergência,



31ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

12º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

como é o caso de um incêndio onde os gases em alta temperatura são liberados e tendem a ter um comportamento ascendente devido a sua abrupta diferença de densidade, ao invés de seguir o fluxo previsto em projeto em direção aos poços de ventilação. Isso diminui a previsibilidade sobre o comportamento dos produtos da combustão em caso de incêndio e sobre a interferência dos mesmos na evacuação de passageiros e funcionários da estação.

Avaliar esse comportamento por meio de ensaios experimentais *in loco* é inviável porque as estações da linha 19-Celeste ainda estão em fase de contratação de obras [3]. Além disso, mesmo que estivessem em fase final de construção, testes experimentais controlados são caros e exigem uma quantidade de recursos humanos considerável, dadas as dimensões envolvidas. Ainda, realizar esse tipo de avaliação após a conclusão da estação não possibilita alterações relevantes na arquitetura, pois a construção já estaria finalizada.

Diante dessas limitações, surge a necessidade de ferramentas alternativas para entender o comportamento do escoamento dentro da estação e mitigar o acesso dos produtos da combustão em regiões com presença de passageiros e funcionários em caso de incêndio. A simulação de fluidodinâmica computacional (CFD - *Computational Fluid Dynamics*) [4] é uma das técnicas mais consolidadas e sugeridas para essa finalidade. A técnica CFD aplica as equações fundamentais da mecânica dos fluidos e da transferência de calor e massa para analisar o comportamento estacionário e transiente de fluidos nos mais diversos setores da academia e da indústria. No setor metroviário, podem ser



31ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

12º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

encontrados estudos que avaliam o comportamento do escoamento e poluentes [5] e [6], assim como avaliações focadas em entender e mitigar os efeitos da propagação da fumaça em cenário de incêndio [7], [8], [9] e [10].

Dado este cenário, o presente estudo tem como objetivo apresentar uma metodologia de análise de simulações CFD em regime transiente para modelar estações de metrô em cenário de incêndio. Para isto, foi utilizada uma tipologia de estação genérica, visando evitar compartilhar geometrias de estações reais da Linha 19 por ainda se encontrarem em fase de licitação do Metrô-SP. O software CFD utilizado foi o HELYX, da ENGYS [11]. O caso analisado corresponde à condição de incêndio assumida como a mais crítica *a priori*, onde o carro com foco de incêndio está localizado na parte central da plataforma, o mais afastado possível dos ventiladores de exaustão adjacentes. Nos resultados, são apresentados campos de velocidade, a dispersão de monóxido de carbono (CO), a distribuição de temperatura e mapas de visibilidade. Destaca-se que, sempre que possível, os resultados buscaram ser comparados com o que é sugerido pela norma do Corpo de Bombeiros de São Paulo [12].

DIAGNÓSTICO

O presente estudo foi estruturado seguindo as principais etapas de uma análise CFD, conforme apresentado na Figura 1. A primeira etapa consiste na construção e/ou preparação da geometria CAD (*Computer Aided Design*) tridimensional. Nessa fase, é necessário definir o domínio de fluido que será utilizado na simulação, removendo



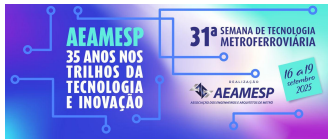
31ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

12º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

regiões que não influenciam no escoamento principal da estação. Também são eliminados pequenos detalhes construtivos, como rodapés, maçanetas, partes do corrimão, entre outros, para reduzir o tamanho final da malha numérica e, consequentemente, o custo computacional da simulação.

Concluída a preparação da geometria, inicia-se a etapa de construção da malha numérica. Nessa fase, o domínio de fluido é discretizado em pequenos volumes de controle, permitindo que as equações diferenciais — deduzidas a partir das leis de conservação da massa, da quantidade de movimento e da energia — sejam resolvidas iterativamente em cada volume de controle. O algoritmo de geração de malha do HELYX é um algoritmo hexa-dominante, resultando em volumes majoritariamente hexaédricos, cujo formato é benéfico em termos de eficiência computacional e acurácia dos métodos empregados em volumes finitos (metodologia utilizada no software HELYX). Busca-se aumentar o refinamento da malha, isto é, diminuir o tamanho dos volumes de controle, em regiões onde se esperam maiores gradientes de velocidade, temperatura e outras quantidades envolvidas na simulação, como por exemplo monóxido de carbono e fumaça.

A terceira etapa refere-se à modelagem matemática. Nela, são definidas as condições de contorno em cada fronteira da estação como, por exemplo, as vazões de ar nos sistemas de insuflamento e exaustão, e a pressão estática em regiões de abertura para o ambiente externo. Também são escolhidos os modelos suplementares que serão adotados em relação às equações de conservação, como modelo de turbulência, modelo



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários

ANP
TRILHOS

TIC TRENS

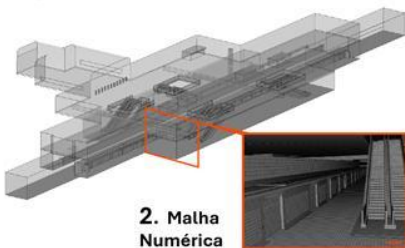
CPTM

31ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 12º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

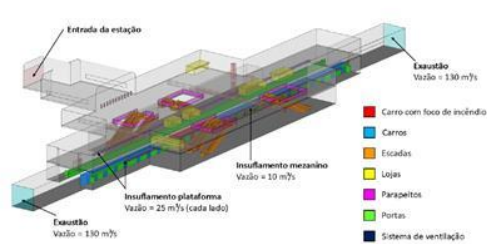
de fluido (se incompressível ou compressível, gás ideal etc.), as simplificações assumidas e as escalas de tempo a serem simuladas. O detalhamento de cada passo da modelagem e as referências tomadas como base são apresentadas nas próximas seções.

Na etapa de solução são resolvidas as equações de conservação necessárias por meio de técnicas numéricas iterativas. Por fim, na etapa de pós-processamento, realiza-se a análise dos resultados, verificando-se o comportamento de cada variável ao longo do tempo e se estes apresentam representatividade física. Exemplos de pós-processamento são planos com perfis de velocidade, temperatura, dispersão de poluentes etc., bem como pontos e superfícies de monitoramento das variáveis nos limites do domínio.

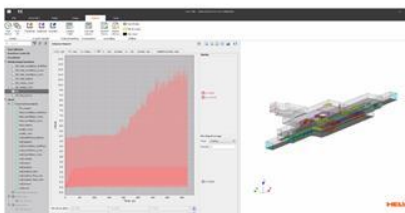
1. Geometria



3. Modelagem Numérica



4. Solução



5. Pós-processamento

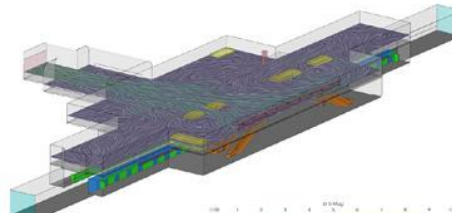


Figura 1 - Principais etapas do fluxo de simulação da abordagem CFD.

31ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 12º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

Geometria

O modelo geométrico adotado neste estudo é de uma estação genérica, uma vez que as estações utilizadas no projeto da Linha 19 não podem ser divulgadas no presente momento, por ainda estarem em fase de licitação. Ressalta-se, contudo, que as dimensões e principais características de uma estação real foram adotadas, além claro, das condições de operação da estação. Na Figura 2, é detalhada as regiões da geometria da estação simulada.

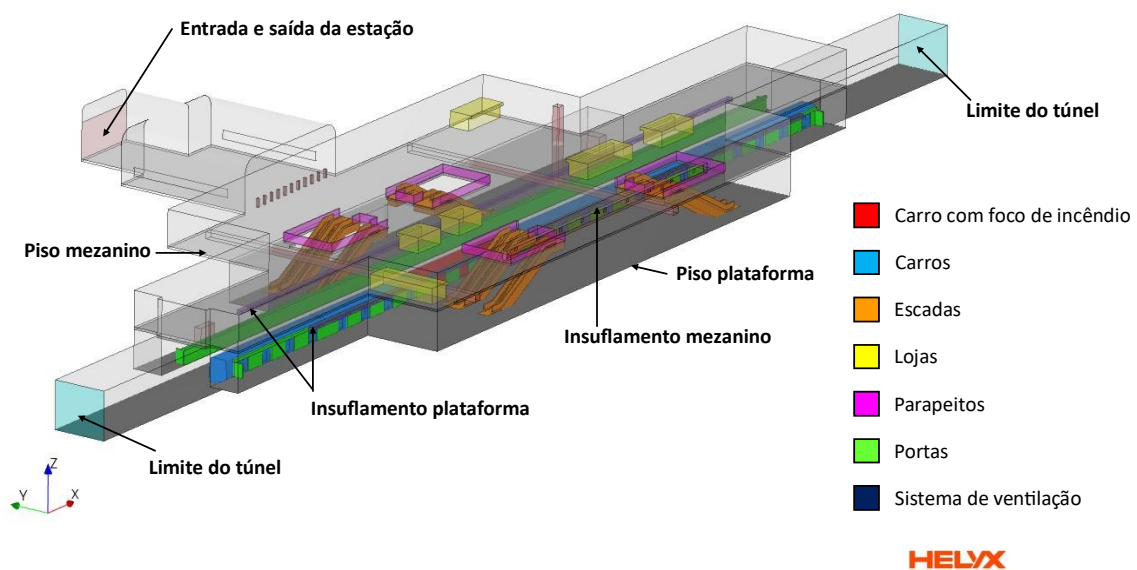


Figura 2 - Modelo geométrico 3D da estação utilizado na análise CFD com a respectiva nomenclatura.



31ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

12º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

Malha numérica

Para resolver numericamente as equações de conservação que descrevem o transporte de ar, calor e produtos da combustão, o volume de ar dentro da estação precisa ser dividido em pequenos volumes de controle, cujas dimensões determinam a resolução da simulação e seu custo computacional. Quanto menores estes volumes, melhores são os resultados, mas também mais custosa será a simulação CFD. Idealmente, tenta-se definir volumes de controle com as maiores dimensões possíveis, mas que sejam pequenas o suficiente para capturar todos os fenômenos relevantes com resolução adequada. Assim, foi determinada uma resolução mínima de 0,3 m em todo o domínio. Esse valor foi imposto seguindo os valores aproximados disponíveis na literatura [13], [14] e [15] e também baseado em experiência prévia da ENGYS em simulações CFD de 9 estações de trem do Metrô de São Paulo e de participação do em projeto financiado pelo governo europeu [16]. Na Figura 3, é apresentado um conjunto de imagens de diferentes pontos da estação detalhando a malha utilizada e o número total de volume requeridos.

31ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

12º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

Tamanho da malha: 7.95 milhões

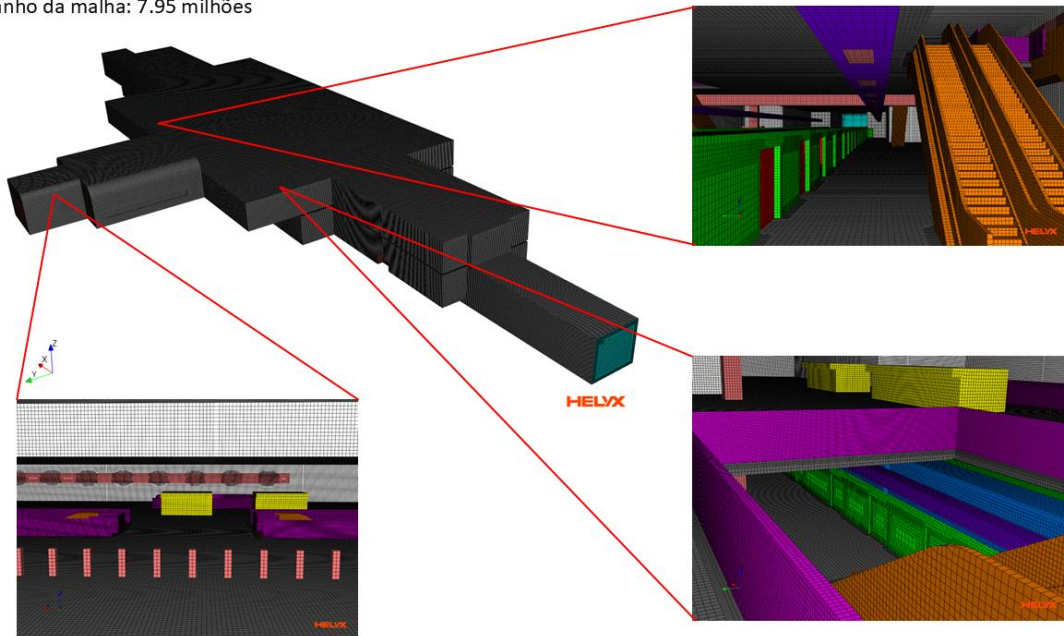


Figura 3 - Vista externa da malha numérica e de alguns pontos internos do domínio.

Modelagem matemática

A modelagem matemática é a etapa em que se definem as propriedades físicas dos materiais, as condições de contorno, os modelos matemáticos aplicáveis a cada fenômeno físico e as simplificações adotadas, com o objetivo de tornar os resultados úteis e viáveis dentro do tempo de projeto disponível. Nas próximas subseções são apresentados detalhes de alguns dos modelos utilizados.

Modelagem da turbulência

O modelo $k-\omega$ SST, que descreve os efeitos da turbulência através de equações para a energia cinética turbulenta (k) e sua taxa de dissipação (ω), foi empregado. Uma



31ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

12º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

função de parede automática baseada na lei de Spalding foi utilizada para descrever o escoamento próximo às paredes, independentemente do valor de y^+ [17].

Modelagem térmica

Os principais mecanismos de transferência de calor considerados foram a convecção natural e forçada. O fenômeno de condução térmica no meio sólido não é simulado e, portanto, as paredes são consideradas adiabáticas. A radiação térmica não foi modelada diretamente e, em vez disso, foi utilizado o método *Fractional Heat Loss*, que assume que aproximadamente 25 % da taxa de liberação de calor (HRR) é proveniente de efeitos de radiação, sendo o restante devido à convecção. Dessa forma, a parcela devido à radiação é descontada da curva HRR [18]. Essa abordagem já foi utilizada com sucesso em trabalhos similares na literatura [19].

Propriedades termofísicas

O ar foi modelado como um gás ideal, e sua massa específica foi calculada em função dos valores de temperatura e pressão. As propriedades dos gases, bem como a difusividade mássica dos escalares passivos e os números adimensionais Pr_t (número de Prandtl) e Sc_t (número de Schmidt) foram estimados com base em estudos disponíveis em [20] e [13].

Visibilidade

Como descrito por [15], a visibilidade é um fenômeno complexo que depende do tamanho, forma e quantidade de partículas na fumaça. Tais parâmetros dependem



31ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA **12º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS**

diretamente do material queimado e das condições de combustão, que são geralmente desconhecidos ou simplificados neste tipo de simulação. Para solucionar este problema complexo, foi desenvolvido um método [21], amplamente utilizado para este tipo de aplicação, em que o índice de visibilidade para um objeto sendo visualizado em situações de incêndio, sob condição de fumaça não irritante, é estimado por meio da equação:

$$v \approx \min\left(\frac{C}{k_m \rho_f}, L_{max}\right),$$

onde C é uma constante adimensional determinada experimentalmente, cujo valor depende do tipo do objeto visualizado; k_m é o coeficiente de extinção mássica da fumaça, que depende de suas características; ρ_f é a densidade da fumaça em um dado ponto e instante; L_{max} a distância máxima em metros, em situação de ar limpo, em que se pode enxergar o objeto em análise; e v é o índice de visibilidade, dado em metros, sendo sempre menor ou igual a L_{max} . Para as simulações foram considerados $L_{max} = 30 \text{ m}$, em conformidade com a IT-45 [12]; $C = 3$, correspondente a uma placa refletiva [22]; e $k_m = 8700 \frac{\text{m}^2}{\text{kg}}$, valor sugerido para chamas de combustão de madeiras e plásticos para um comprimento de onda de 633 nm . Embora geralmente k_m seja considerado constante na literatura, esse valor pode variar em função dos estágios da combustão [21]. Por fim, ρ_f é função da concentração de fumaça e da densidade do ar, sendo, portanto, o parâmetro responsável pela variação temporal e espacial do índice de visibilidade na simulação.

31ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 12º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

Condições de contorno

Nessa etapa, é necessário definir quais condições de contorno serão aplicadas em todas as fronteiras da estação. Buscando sempre representar o cenário mais crítico, os ventiladores do sistema de exaustão na região das plataformas não são acionados durante o incêndio. Apenas os ventiladores de exaustão nos poços de ventilação adjacentes e o sistema de insuflamento permanecem operantes. Sendo assim, as condições de contorno para o escoamento são aplicadas apenas nas aberturas de acesso à plataforma, nos dutos de insuflamento e nas extremidades do túnel, representando os exaustores dos poços adjacentes. As demais fronteiras são consideradas como paredes, conforme apresentado na Figura 4.

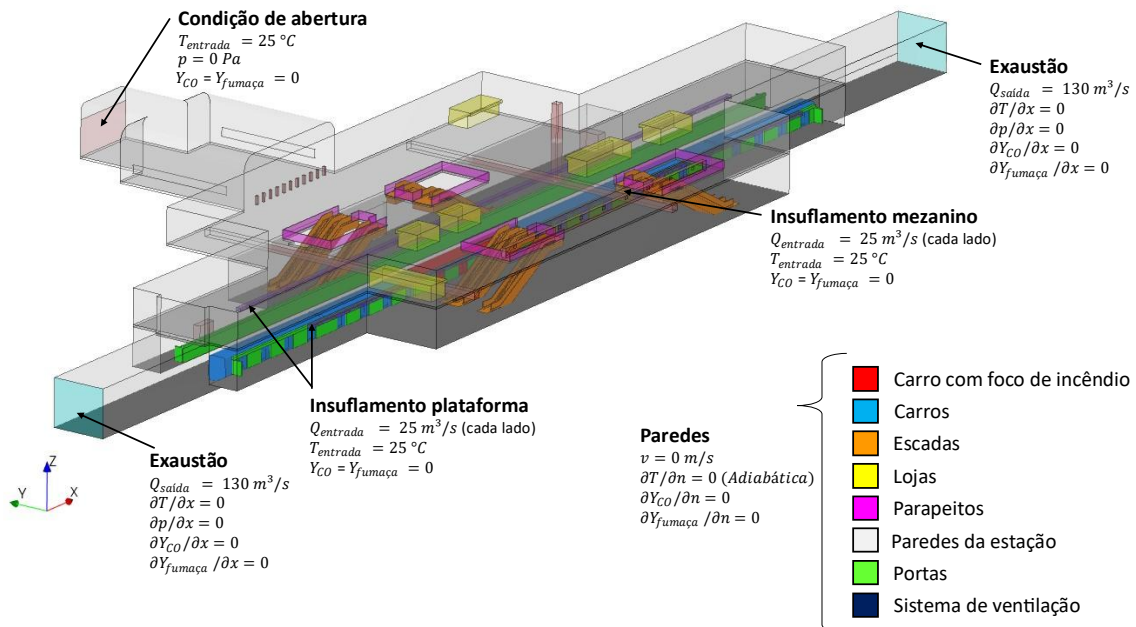


Figura 4 - Modelo geométrico 3D da estação utilizado na análise CFD com a respectiva nomenclatura e principais condições de contorno adotadas.



31ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

12º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

Visando uma abordagem conservadora, o foco de incêndio foi posicionado no carro mais ao centro da estação, assumindo-se que este seria o pior cenário em caso de incêndio, por estar mais longe dos sistemas de exaustão adjacentes. Nessa posição, espera-se que os produtos da combustão tenham mais facilidade para acessar o mezanino e que a influência dos sistemas de exaustão, localizados nos limites da estação, seja a menor possível.

O foco do incêndio foi representado como um termo fonte localizado em um cubo de 1,5 m de lado, centralizado no interior do carro posicionado mais próximo ao centro da plataforma. Na literatura, as dimensões do termo fonte podem variar: por exemplo, [23] considera 1/3 das dimensões do carro, enquanto [7] adota valores de 1 m de comprimento por 2 m de largura.

As portas do carro no sentido da plataforma foram consideradas abertas, permitindo que a fumaça saia do carro e se disperse na estação. Os interiores dos demais carros não foram modelados. A Figura 5 mostra o modelo geométrico 3-D criado, ressaltando a posição do termo fonte e como os produtos da combustão deixam o carro.

31ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

12º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

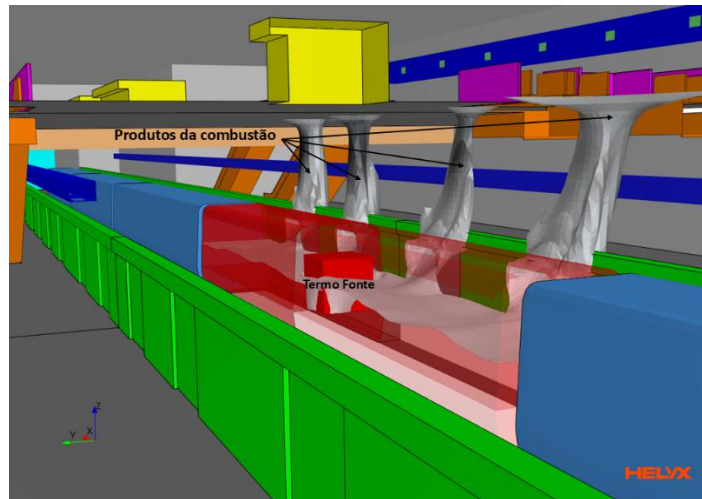


Figura 5 - Modelo 3-D do carro e posição do termo fonte (em vermelho) que representa o incêndio, durante a simulação.

Representação do incêndio (liberação de energia e dispersão de poluentes)

O incêndio é modelado por um termo fonte de energia aplicado em um cubo de 1,5 m de lado no interior do carro mais próximo à parte central da estação. O termo fonte obedece a uma curva de taxa de liberação de energia $\dot{Q}$ (em MW) em função do tempo também chamada de HRR (*Heat Release Rate*), mostrada na Figura 6.

31ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 12º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

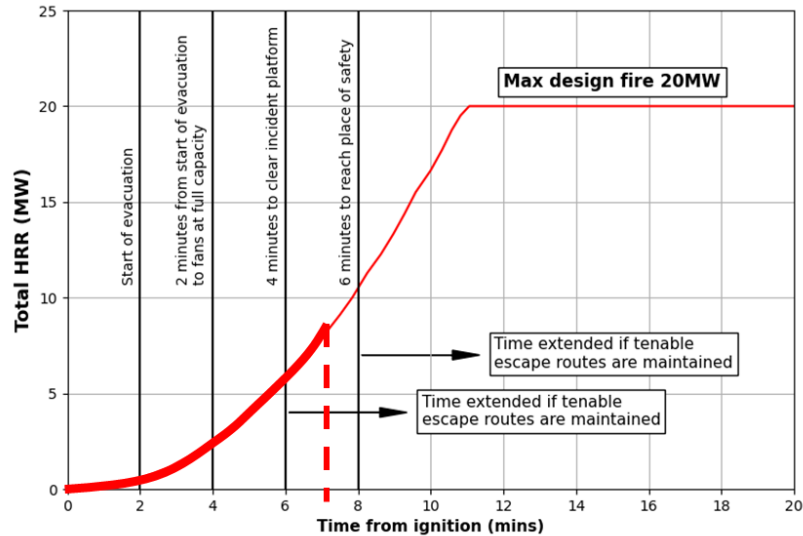


Figura 6 - Curva adotada para a taxa de liberação de calor do incêndio.

Essa curva é considerada de “crescimento rápido” tendo vista que sempre foi buscado o cenário mais crítico [24]. Como a modelagem de radiação adotada foi a de *Fractional Heat Loss* [18], os valores da curva da Figura 6 foram multiplicados por 0,75 para considerar o efeito da transferência de calor por radiação.

Os produtos da combustão (fumaça e CO) foram modelados como escalares passivos, o que significa que são transportados pelo escoamento de ar, mas não exercem influência sobre ele. Essa aproximação é válida para os casos em que a concentração dos escalares é suficientemente baixa e as espécies são não-reativas [25]. Tais condições são atendidas no cenário de dispersão dos produtos da combustão [18], [25]. A taxa de geração dos escalares (em kg/s) foi modelada utilizando termos fontes de geração de massa impostos no mesmo cubo onde foi aplicado a curva de taxa de



31ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 12º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

liberação de calor. O valor da taxa de geração de massa dos produtos da combustão, $\dot{m}$, é determinado como uma função da taxa de consumo de combustível, $\dot{m}_f$, e da fração de produto Y para o dado produto de combustão [14]:

$$\dot{m} = Y \dot{m}_f$$

A taxa de consumo de combustível, por sua vez, é obtida através de uma expressão que envolve a taxa de liberação de calor do incêndio, $\dot{Q}$, e o calor de combustão do combustível ΔH [J/kg] [14]

$$\dot{m}_f = \frac{\dot{Q}}{\Delta H}$$

Ressalta-se que os valores utilizados para a taxa de liberação de calor são os mesmos mostrados na Figura 6, sem descontar a parcela relativa ao método *Fractional Heat Loss*. Para o calor de combustão, foi utilizado o valor de 26 MJ/kg, que é considerado apropriado para um incêndio envolvendo poliuretano, polipropileno e materiais de borracha, conforme apresentado por [14] e [26].

Os valores da fração de produto foram retirados de [13], sendo 0,02775 e 0,1875 para o monóxido de carbono (CO) e a fumaça, respectivamente, que são valores coerentes com os apresentados por [26]. Com isso, a taxa de geração dos produtos da combustão (CO e a fumaça) ao longo do tempo evoluem conforme representado pela Figura 7.

31ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 12º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

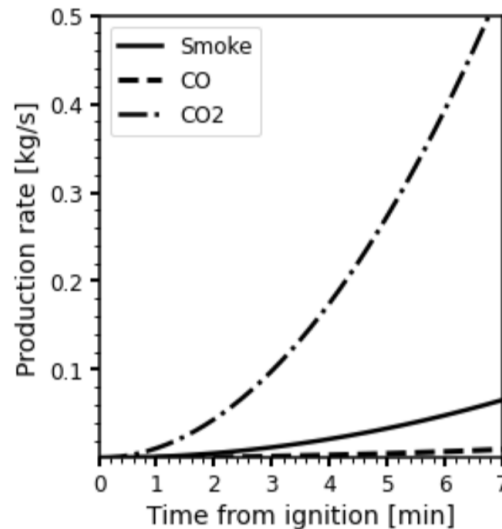


Figura 7 - Taxa de geração dos produtos da combustão.

Condições iniciais

A inicialização da simulação foi realizada considerando que todo ar dentro da estação está em repouso a uma temperatura de 25 °C. No sistema de insuflamento e nas extremidades do túnel são impostos, desde o instante inicial, as condições de contorno descritas anteriormente. As concentrações dos escalares passivos (fumaça e CO) dentro da plataforma são considerados iguais a zero no início da simulação.

Após 60 segundos de simulação, os escalares passivos começam a deixar a parte interna do carro em chamas, conforme apresentado na Figura 8. A partir desse momento, denominado t_0 , é iniciada a contagem do tempo de 6 minutos para avaliar o comportamento e a distribuição dos escalares passivos dentro da estação. Essa abordagem foi considerada buscando sempre o cenário mais crítico. Portanto, ressalta-



31ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 12º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

se que foi simulado sete minutos físicos tendo em vista que os escalares passivos começam a deixar o carro em chamas somente após o primeiro minuto, aproximadamente.

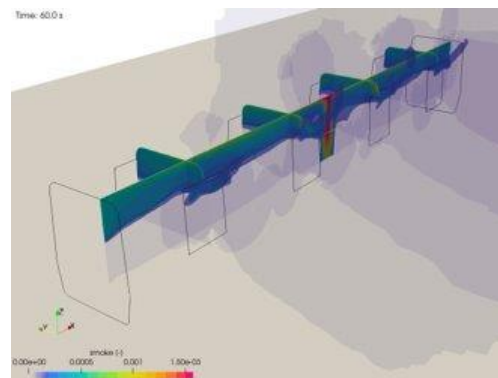


Figura 8. Distribuição da fumaça ao redor do carro em chamas após 60 segundos de simulação, usado como tempo inicial (t_0) para avaliar o cenário de incêndio.

ANÁLISE DOS RESULTADOS

Estimativa da posição dos passageiros

Na Figura 9, é apresentada a posição aproximada de um grupo de passageiros deixando a estação a partir de uma determinada extremidade da plataforma, reproduzindo, assim, o pior cenário de fuga de um passageiro (maior distância até a saída da estação). Considerando a velocidade de uma pessoa deixando a estação como 38 m/min (sugerido pela norma IT-45 [12]), observa-se que o tempo para acessar o mezanino seria de aproximadamente 2 minutos, enquanto o tempo para a saída da estação seria em aproximadamente 3 minutos. Uma possível melhoria futura na

31ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 12º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

metodologia apresentada é a utilização de modelos de evacuação mais sofisticados, visando capturar possíveis efeitos não previstos nesta estimativa, como o nível de lotação, espaço disponível para locomoção, nível de estresse, dentre outros.

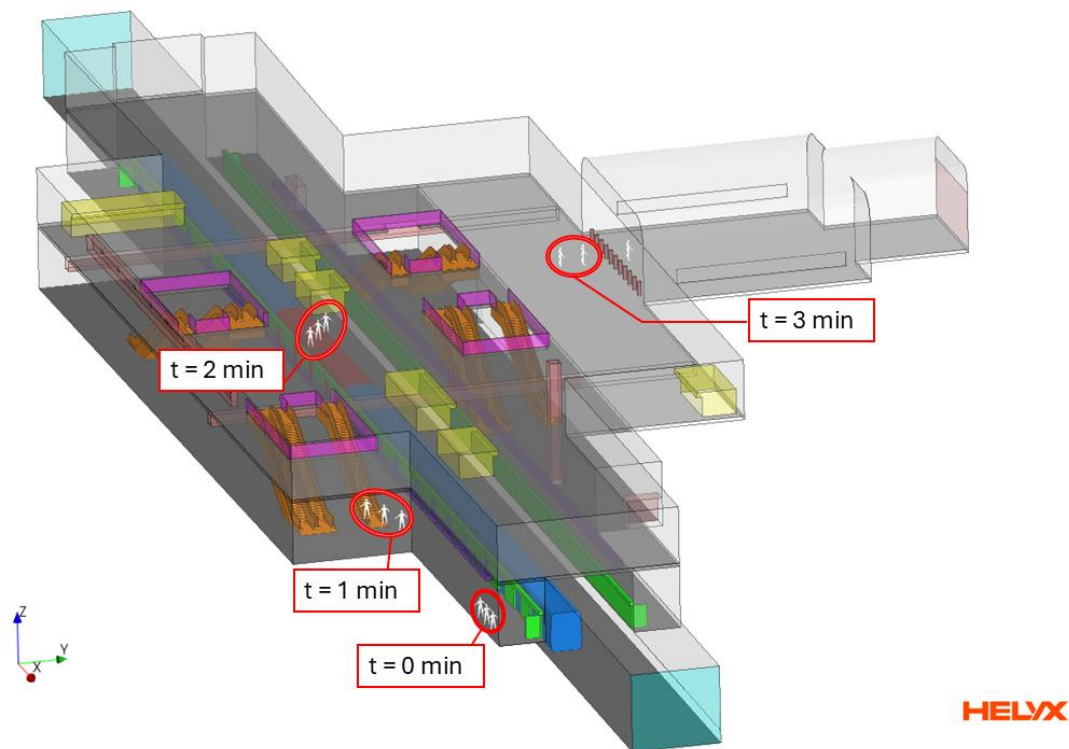


Figura 9 - Tempo estimado de deslocamento de uma pessoa localizada inicialmente em um dos limites da plataforma (que é a posição mais distante da saída da estação).

Os resultados dos campos de velocidade, temperatura, produtos da combustão (CO) e visibilidade serão apresentados nos quatro planos apresentados na Figura 10. No *plano xy – Plataforma* e o *plano xy – Mezanino*, conforme Figura 10 (a) e (b), cuja intenção é mapear o comportamento das variáveis de interesse na altura de 1,7 m do piso de cada andar, que equivale a aproximadamente a altura média de uma pessoa

31ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 12º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

adulta. Já no *plano xz – longitudinal carros* está posicionado no centro dos carros e seguindo a direção dos trilhos da estação com a intenção de mapear a região central da plataforma e o mezanino, assim como o teto da plataforma e o mezanino, e os limites laterais da estação, conforme indicado na Figura 10 (c). Na Figura 10 (d) será avaliado a região de entrada da estação a região e transversal ao carro central onde está localizado o foco do incêndio.

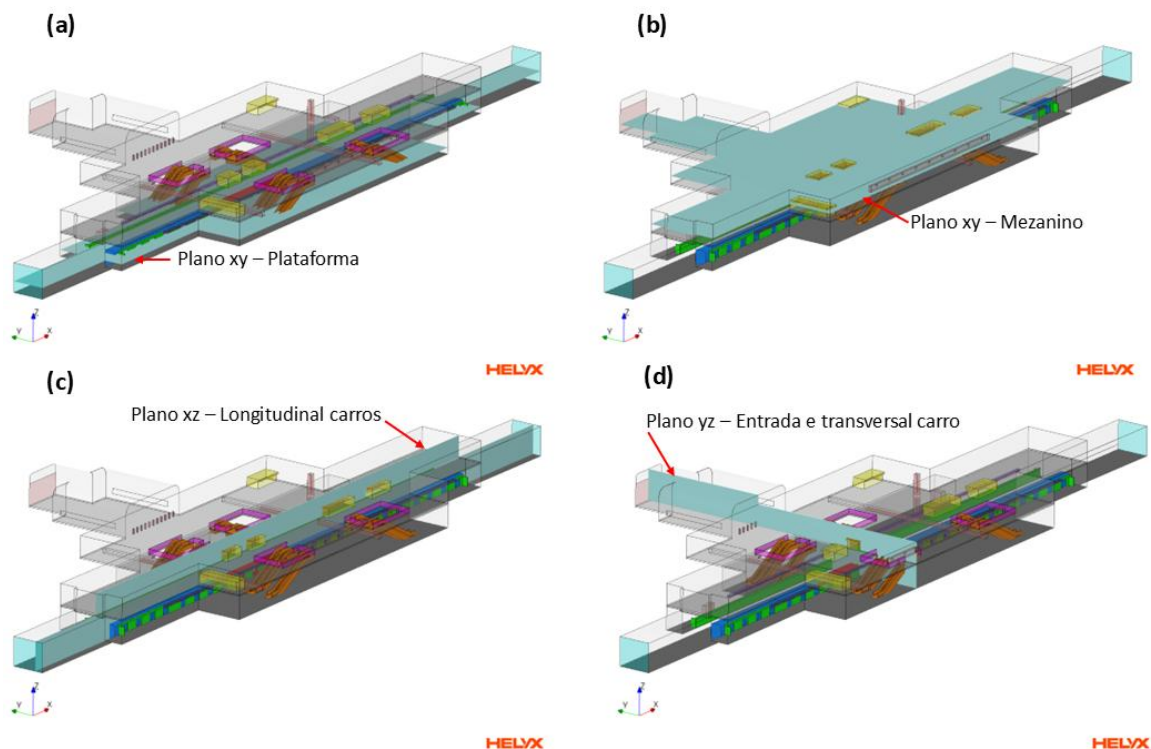


Figura 10 - (a) *Plano xy – Plataforma* está localizado a 1,7 m do piso da plataforma. (b) *Plano xy – Mezanino* está posicionado a 1,7 m do mezanino. (c) *Plano xz – Longitudinal carros* está alinhado com o centro dos carros. (d) *Plano yz – Entrada e transversal do carro* que passa pela parte central da entrada da estação e por uma das portas do carro com o foco de incêndio.



31ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

12º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

Campos do escoamento

Os níveis de velocidade na estação são um importante parâmetro de projeto. Por um lado, é importante que haja uma velocidade mínima, chamada de velocidade crítica, para evitar o fenômeno de fluxo reverso dos produtos da combustão (*back-layering*). Por outro lado, a velocidade não deve ser demasiadamente alta a ponto de prejudicar o deslocamento dos passageiros. De acordo com a IT-45 [12], as velocidades devem ser maiores que 0,75 m/s e menores que 11 m/s nas rotas de fuga e nas rotas utilizadas pelos socorristas. Observou-se que, no cenário avaliado, a velocidade dentro da estação não atingiu valores médios superiores a 11 m/s (exceto uma pequena região no carro onde ocorre o incêndio), obedecendo os limites sugeridos pela norma. No plano xy – Mezanino, observou-se que fluxo vindo da entrada da estação criou um escoamento preferencial nas escadas localizadas no lado oposto a região de entrada. No plano yz – Entrada e transversal carro, também é possível ver um escoamento ascendente acima do carro com o foco do incêndio. Os gases que deixam o carro em alta temperatura geram o efeito de empuxo, aumentando as velocidades do fluido nessa região. Os dois limites laterais da estação vistos pelos planos xz – *Longitudinal* carros e xy – *Plataforma* nota-se regiões com velocidades acima de 6 m/s, o que está ainda dentro do que é sugerido pela norma.



31ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

12º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

Tabela 1 - Tempo máximo de exposição sem incapacitação respiratória [12].

Temperatura de exposição °C	Máximo tempo sem incapacitação min
80	3,8
75	4,7
70	6,0
65	7,7
60	10,1
55	13,6
50	18,8
45	26,9
40	40,2

Na Figura 12, é apresentada a distribuição de temperatura em um plano posicionado a 1,7 m do piso da plataforma (altura que corresponde aproximadamente ao rosto de uma pessoa adulta). Aos 2 minutos, a plataforma não apresentou temperaturas acima de 40 °C na região de acesso dos passageiros (exceto nas proximidades do carro onde o incêndio foi considerado). Aos 4 minutos, parte da plataforma já atinge patamares de 40-50 °C, principalmente no lado da plataforma onde está ocorrendo o incêndio. Aos 6 minutos, algumas regiões com acesso de passageiros atingiram temperaturas acima de 60 °C, mas espera-se que após 6 minutos transcorrido nenhum passageiro esteja localizado na região da plataforma.

31ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

12º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

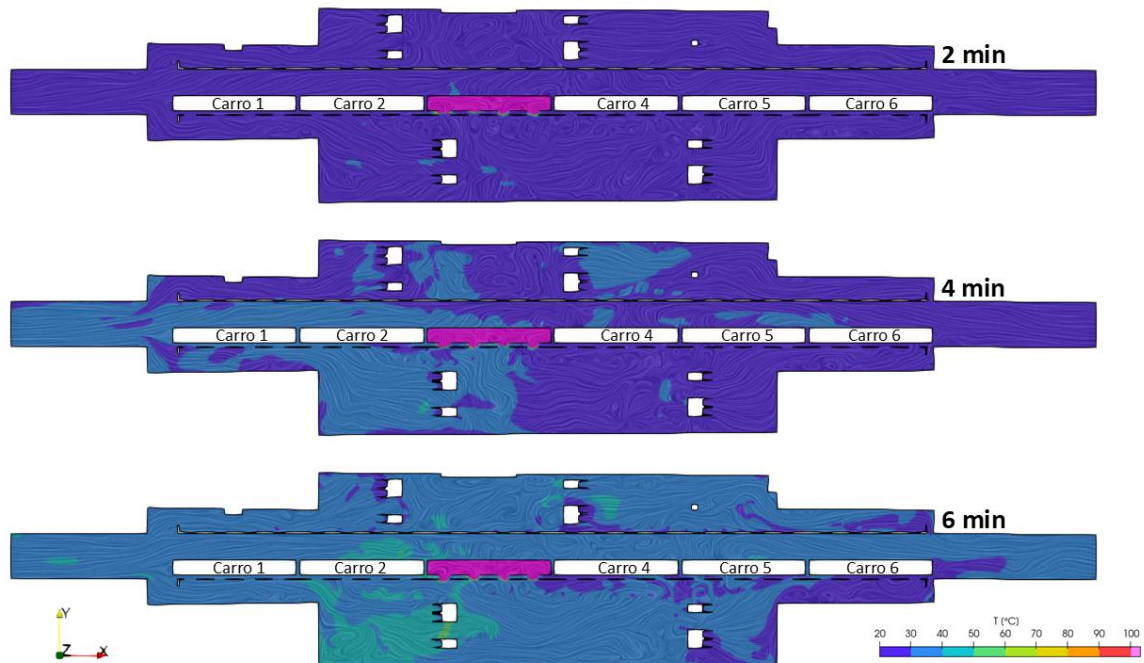


Figura 12 - Contornos de temperatura a 1,7 m do piso da plataforma nos instantes de $t = 2, 4$ e 6 min na plataforma.

Na Figura 13, é apresentado o contorno de temperatura no plano yz onde ocorre o incêndio. Aos 2 minutos, na frente das portas do carro onde ocorre o incêndio e teto da plataforma apresentam temperaturas superiores a $100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Em 4 minutos a lateral da escada próxima ao teto da plataforma também apresenta regiões com temperaturas acima de $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ sendo um ponto de atenção. Aos 6 minutos, alguns pontos do teto do mezanino atingem valores superiores a $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ e a região da plataforma acima de $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ é amplificada quando comparado ao obtido aos 4 minutos.

31ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA
12º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

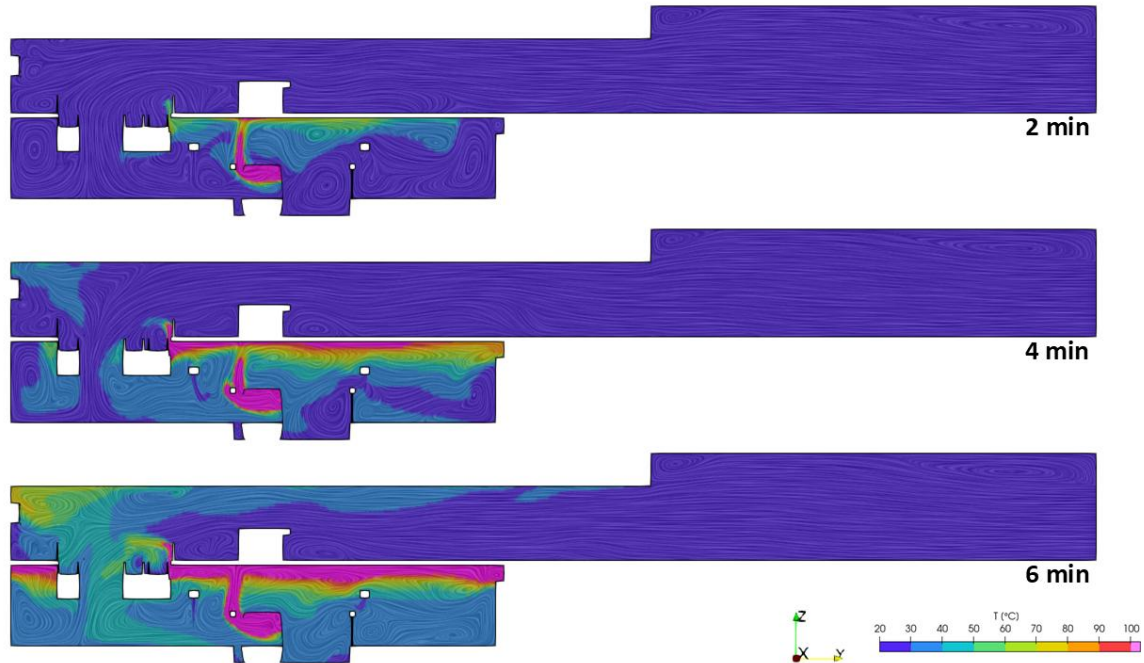


Figura 13 - Contornos de temperatura em t = 2, 4 e 6 min em um plano transversal ao carro onde ocorre o incêndio.

Na Figura 14, são apresentados os contornos de temperatura no mezanino em um plano posicionado a 1,7 metros do piso aos 2, 4 e 6 minutos. Observa-se que a maior parte do mezanino segue seguro durante todo o tempo simulado. Por esse plano, as regiões com maiores temperatura ficam nas laterais das escadas localizadas mais próxima do carro onde é considerado o incêndio. Isso é observado principalmente ao final dos 6 minutos.

31ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

12º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

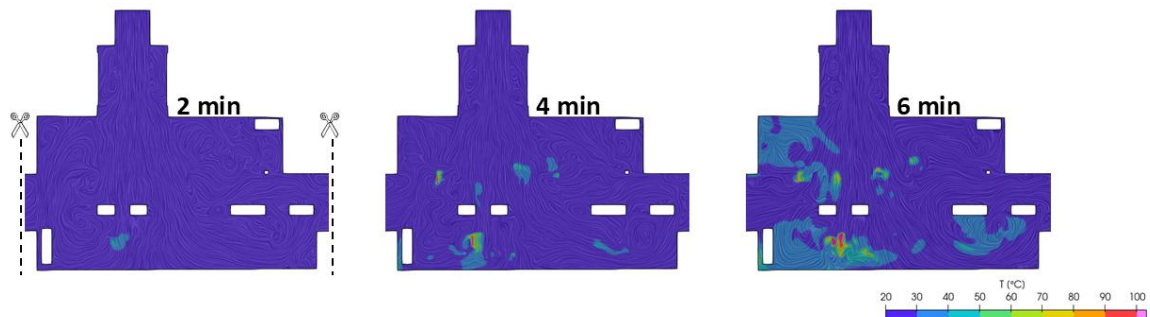


Figura 14 - Contornos de temperatura a 1,7 m nos instantes de $t = 2, 4$ e 6 min no mezanino.

Dispersão de poluentes (Monóxido de carbono)

Nesta seção, são apresentados os resultados relacionados aos níveis de CO dentro da estação. Além disso, avaliamos a visibilidade dentro da estação, utilizando modelos previamente desenvolvidos na literatura.

Primeiramente, ressalta-se que a IT-45 [12] estabelece valores limites para a dispersão de CO devido a sua alta toxicidade, os quais serão discutidos a seguir. Quanto aos níveis de visibilidade, a IT-45 [12] não define critérios máximos e mínimos para o interior da estação. Portanto, optou-se por adotar uma escala de valores que permita uma visualização mais clara do fenômeno dentro da plataforma, sem sugerir quais são os valores críticos em cada caso.

A avaliação do monóxido de carbono (CO) é apresentada na IT-45 [12] na forma de tabela, considerando o tempo de exposição que uma pessoa pode tolerar por um certo intervalo de tempo (Tabela 2). Na tabela, os valores-limite de 50% consideram a



31ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

12º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

tolerância a CO de pessoas adultas e saudáveis, enquanto os valores-limite de 30% são empregados para pessoas mais sensíveis, suscetíveis a graves efeitos irreversíveis ou outros efeitos de longa duração para a saúde.

Tabela 2 - Exposição máxima de monóxido de carbono (CO) [12].

Tempo min	Concentração – limite de CO mg/m ³	
	30%	50%
4	1 954	3 257
6	1 303	2 171
10	782	1 303
15	521	868
30	261	434
60	130	217
240	32	54

A Figura 15 mostra a evolução na distribuição de CO na plataforma nos tempos de 2, 4 e 6 minutos, considerando um plano a 1,7 m do piso da plataforma. Aos 2 minutos, observa-se que a plataforma permanece praticamente sem a presença de CO em todas as regiões acessíveis aos passageiros (exceto na região dentro do carro onde é considerado o foco do incêndio). Aos 4 minutos, os níveis de CO chegam a até 55 ppm e ficam localizados principalmente no lado da plataforma onde ocorre o incêndio e na região dos trilhos. Ao final da simulação (6 minutos), as áreas com frações de CO de até 55 ppm aumentam; porém, nas regiões acessíveis aos passageiros, não foram observados valores superiores a esse limite. Em seguida, destaca-se que os maiores níveis de CO ficam localizados acima desse plano de 1,7 m.

31ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

12º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

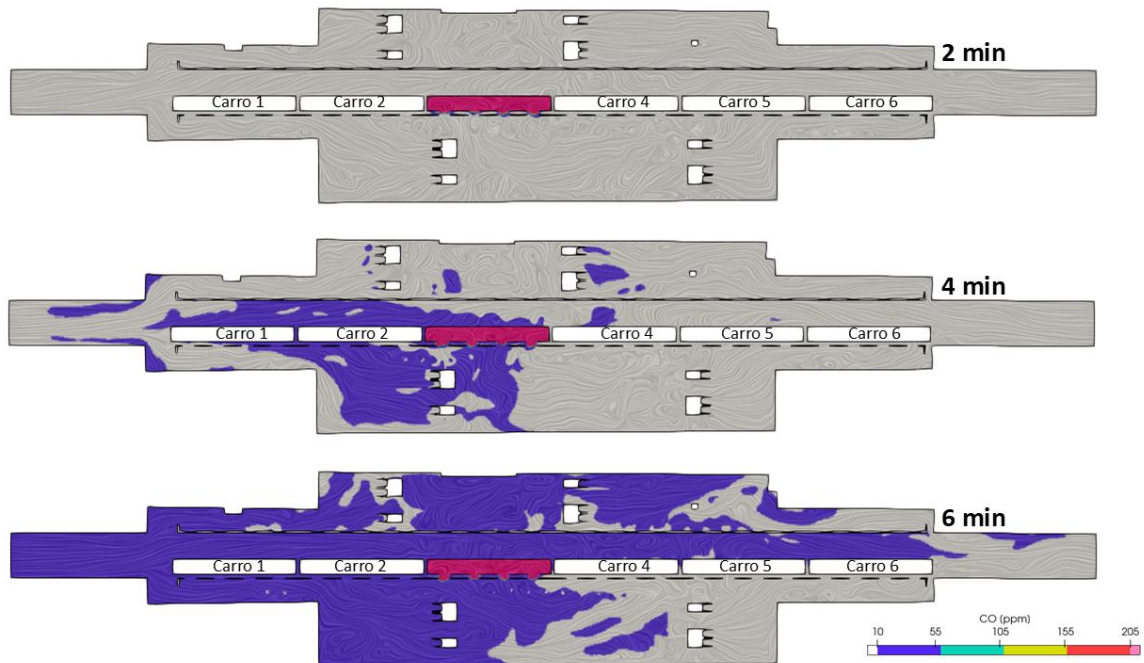


Figura 15 - Contornos de CO a 1,7 m do piso da plataforma nos instantes de 2, 4 e 6 min.

Na Figura 16, é apresentado o contorno de CO em um plano transversal ao carro onde ocorre o incêndio. Similar ao que foi observado nos mapas de temperatura, nos primeiros 2 minutos os maiores níveis de CO concentram-se na frente do carro em chamas e no teto da plataforma. À medida que o tempo evolui, as concentrações de CO no teto aumentam e começam a alcançar o mezanino pelas laterais da escada (por volta dos 4 minutos). Aos 6 minutos, o teto da plataforma atinge valores acima de 155 ppm, enquanto, no teto do mezanino, as concentrações variam entre 55 e 105 ppm.

31ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

12º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

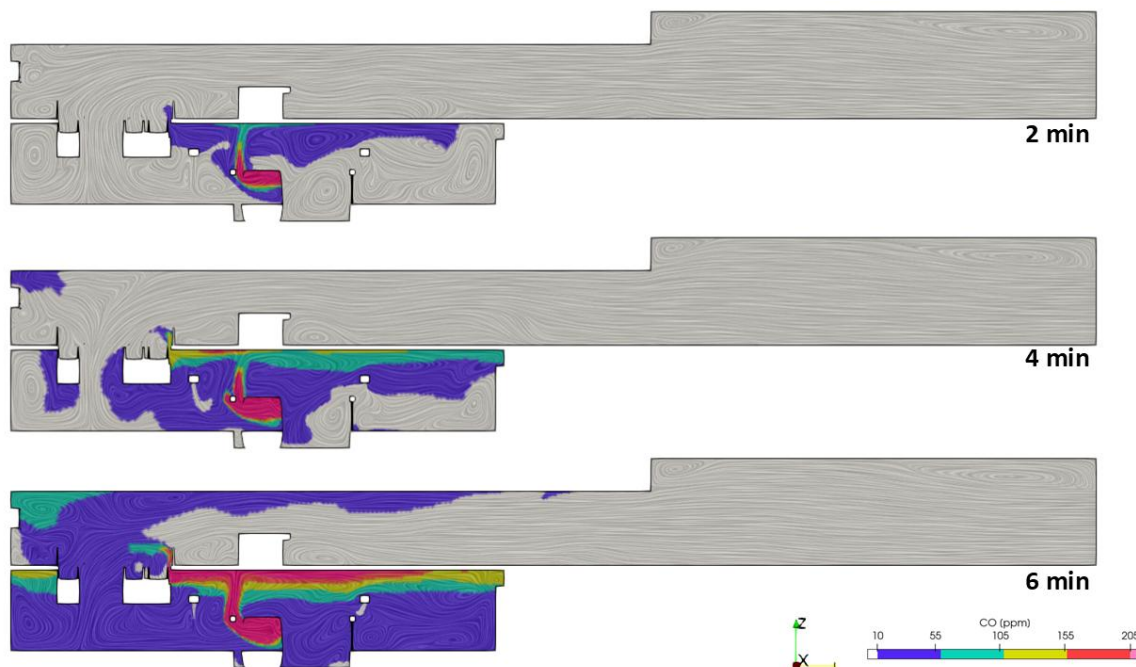


Figura 16 - Contornos de CO em $t = 2, 4$ e 6 min em um plano posicionado transversal ao carro onde ocorre o incêndio.

Na Figura 17, é apresentado o contorno de CO no mezanino aos 2, 4 e 6 minutos. As maiores frações de CO ficaram localizadas na região da escada mais próxima ao local do incêndio. Ao final dos 6 minutos, apenas uma pequena região obteve valores acima 155 ppm e ficaram localizados próximo da escada mais próxima ao local onde foi considerado o incêndio.

31ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

12º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS



Figura 17 - Contornos de CO a 1,7 m do piso do mezanino nos instantes de $t = 2, 4$ e 6 min.

Campos de visibilidade

Na Figura 18, é apresentado um contorno de visibilidade nos tempos de 2, 4 e 6 minutos na plataforma. Observa-se que, aos 2 minutos, a visibilidade é pouco comprometida na área acessível aos passageiros, uma vez que se espera que em 2 minutos todos os passageiros estejam seguros no andar do mezanino, para o cenário mais conservador. Aos 4 minutos, a visibilidade é afetada em ambos os lados da plataforma, atingindo valores inferiores a 6 em algumas regiões. Aos 6 minutos, a visibilidade fica comprometida em praticamente toda a plataforma.

31ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

12º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

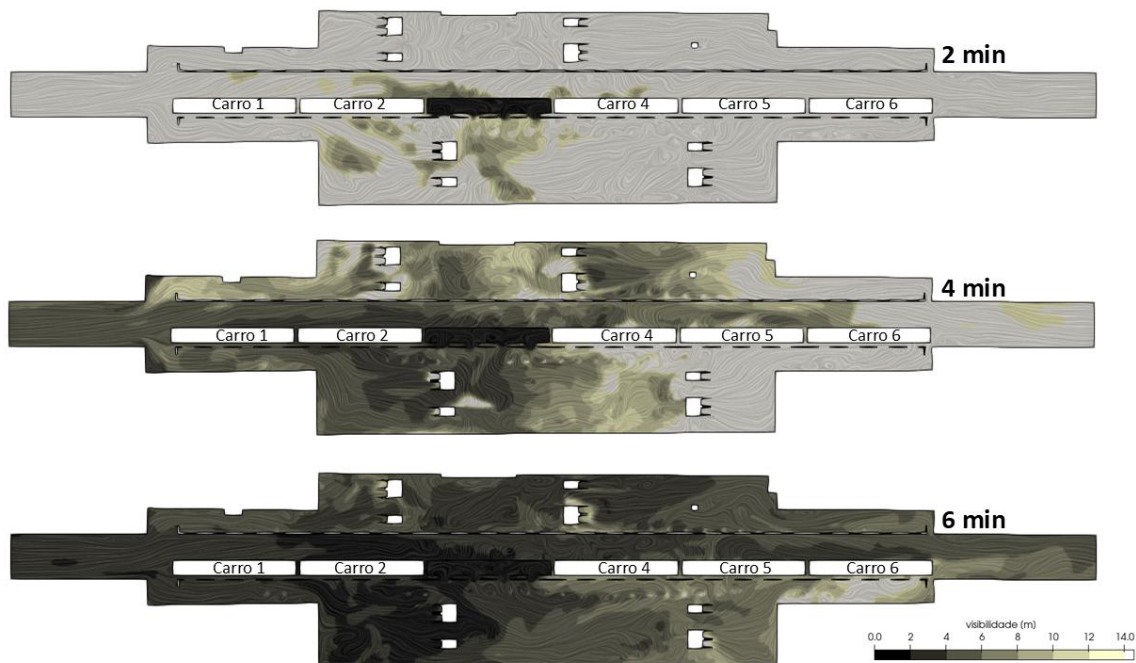


Figura 18 - Contornos de visibilidade a 1,7 m do piso da plataforma nos instantes de 2, 4 e 6 min.

Os campos de visibilidade numa seção transversal a um dos carros são mostrados na Figura 19 nos tempos de 2, 4 e 6 minutos. Ao final dos 2 minutos de simulação observa-se que, no teto da plataforma e na frente do carro em sinistro, a visibilidade é mais afetada. Aos 4 minutos, observa-se que a visibilidade começa a ficar reduzida no teto do mezanino e a região com redução da visibilidade na plataforma com acesso dos passageiros é ampliada. Aos 6 minutos, nota-se que a plataforma fica completamente comprometida. No mezanino, nota-se que a região da escada atinge patamares próximo a zero, assim como algumas partes do teto.

31ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA
12º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

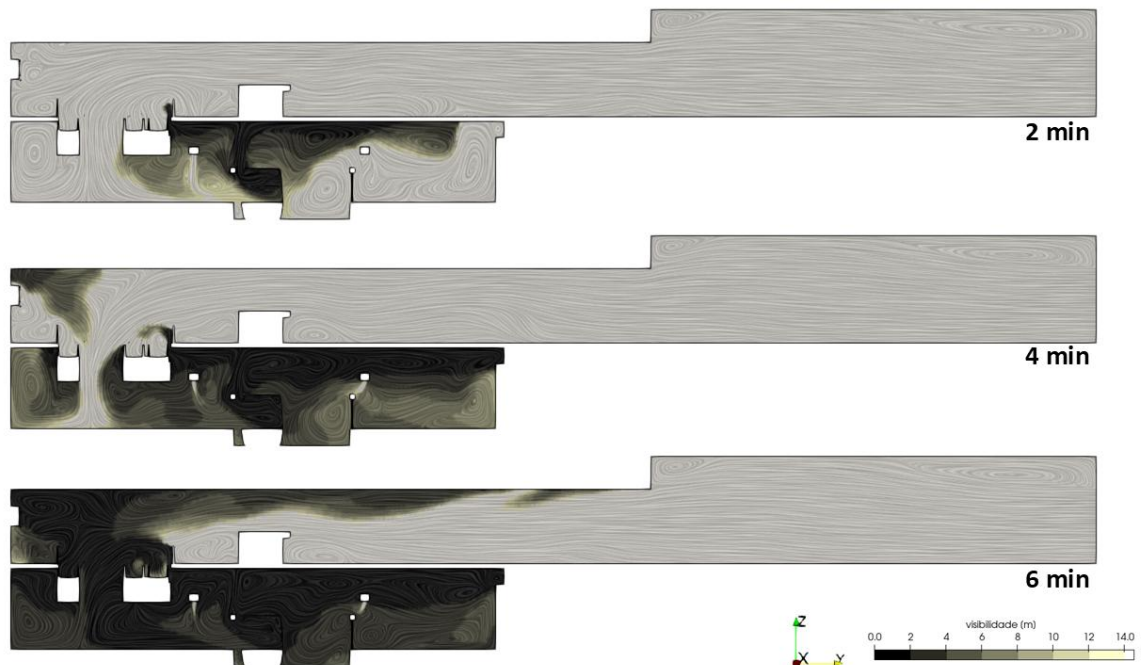


Figura 19 - Mapa de visibilidade em um plano posicionado transversal a entrada da estação e ao carro onde ocorre o incêndio para os tempos 2, 4 e 6 minutos.

Na Figura 20, é avaliada a visibilidade no mezanino nos tempos de 2, 4 e 6 minutos em um plano posicionado a 1,7 m do piso do mezanino. Ao final dos 2 minutos, a visibilidade é afetada pontualmente nesse andar. Aos 4 minutos, a região das escadas mais próximas ao incêndio tem a visibilidade parcialmente comprometida nas suas proximidades. Além disso, algumas regiões pontuais nas demais escadas também começam a ser afetadas. Aos 6 minutos, duas laterais do mezanino ficam parcialmente comprometidas, mas nesse instante é esperado que nenhum passageiro ainda esteja na estação.

31ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA
12º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

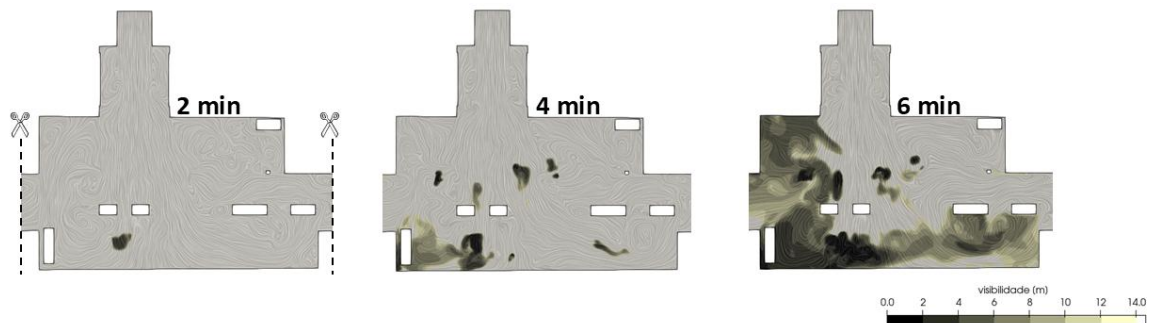


Figura 20 - Contornos de visibilidade a 1,7 m do piso do mezanino nos instantes de $t = 2$, 4 e 6 min.



31ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

12º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

CONCLUSÕES

Este trabalho teve como principal objetivo apresentar uma metodologia numérica utilizando a técnica CFD para avaliação de cenário de incêndio em uma estação de metrô genérica, demonstrando como o CFD pode ser utilizado de forma complementar para atender à norma IT-45, recomendada pelo Corpo de Bombeiros [12]. Durante o estudo, foi possível mapear as regiões com maiores velocidades dentro da estação, concluindo-se que, na estação analisada, não foram observados valores de velocidade que excedessem aos limites sugeridos pela norma.

Na trajetória dos passageiros, a partir do ponto mais distante do acesso de entrada e saída da estação, observou-se que, em aproximadamente 2 minutos, eles estariam localizados no centro do mezanino e, em 3 minutos, já estariam deixando a estação em segurança. Nessas condições, notou-se que as temperaturas obtidas não prejudicam a evacuação segura dos passageiros, uma vez que, até o segundo minuto, não foram observadas temperaturas acima do estabelecido em norma na região do mezanino.

Os mapas de monóxido de carbono (CO) obtidos na simulação CFD seguiram o mesmo comportamento dos mapas de temperatura. Até os 2 minutos, praticamente todo o mezanino permanece livre de CO. Aos 4 minutos, uma pequena região do mezanino apresenta uma concentração limitada a 55 ppm, o que sugere que todos os passageiros não teriam tempos exposição de CO acima do que é sugerido pela norma.



31ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA **12º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS**

Nos mapas de visibilidade, observa-se que, até o segundo minuto, a visibilidade é comprometida apenas nas proximidades dos carros onde ocorre o incêndio, principalmente no teto da plataforma e na frente da porta do carro onde ocorre o incêndio. Espera-se, entretanto, que nesse intervalo de tempo todos os passageiros e funcionários já estejam localizados no mezanino. Após 4 minutos, a plataforma apresenta grandes áreas com perda de visibilidade, mas o mezanino exibe apenas algumas regiões isoladas com redução significativa da visibilidade.

Dessa forma, foi possível verificar que, no cenário simulado e com as estimativas previstas na norma IT-45 [12], os passageiros conseguiriam evacuar da estação em segurança. No entanto, ressalta-se que essas conclusões são válidas apenas para as condições simuladas. Caso os carros estivessem posicionados do outro lado da plataforma, não seria possível garantir, sem uma nova simulação, que a fumaça não atingiria antecipadamente a entrada da estação, dificultando a evacuação dos passageiros nessa região.

Por fim, é importante destacar que qualquer simulação CFD representa uma aproximação numérica baseada em diversas considerações e simplificações. Resultados diferentes podem ser obtidos em condições reais, dada a complexidade de se prever, *a priori*, o tipo de incêndio, sua velocidade de propagação do fogo, sua localização exata e a forma como as pessoas reagiriam em uma situação de pânico.



31ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA
12º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] IBGE, “<https://www.ibge.gov.br/>,” [Online]. Available:
<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sp/sao-paulo/panorama>. [Acesso em 17 07 2025].
- [2] Metrocptm, “[metrocptm.com.br](https://www.metrocptm.com.br/),” 19 04 2023. [Online]. Available:
<https://www.metrocptm.com.br/confira-como-estao-os-projetos-de-expansao-da-rede-de-metro-em-sao-paulo/>. [Acesso em 17 07 2025].
- [3] Metrô, “<https://www.metro.sp.gov.br/>,” [Online]. Available:
<https://www.metro.sp.gov.br/2025/03/24/metro-lanca-edital-para-contratar-obras-da-linha-19-celeste-que-vai-ligar-guarulhos-a-capital/>. [Acesso em 17 07 2025].
- [4] C. R. Maliska, Transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional, Rio de Janeiro: LTC, 2004.
- [5] F. E. Camelli, G. Byrne e R. Löhner, “Modeling subway air flow using CFD,” *Tunnelling and Underground Space Technology*, pp. 20-31, 2014.



31ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA
12º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

- [6] Y. Xie, Q. Li e F. Jiang, "CFD investigation of the unsteady airflow and pressure characteristics in the underground highway station with the train passing," *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, pp. 1268--1283, 2023.
- [7] C. I. Teodosiu e V. F. Kubinyecz, "Numerical study on the impact of platform screen doors in a subway station with a train on fire," *Applied Sciences*, 2022.
- [8] S. Zhang, Y. Yao, K. Zhu, K. Li, R. Zhang, S. Lu e X. Cheng, "Prediction of smoke back-layering length under different longitudinal ventilations in the subway tunnel with metro train," *Tunnelling and underground space technology*, pp. 13--21, 2016.
- [9] J. S. Roh, H. S. Ryou, W. H. Park e Y. J. Jang, "CFD simulation and assessment of life safety in a subway train fire," *Tunnelling and Underground Space Technology*, pp. 447--453, 2009.
- [10] F. a. G. Chen, S.-C. a. Chuay, H.-Y. a. Chien e Shen-Wen, "Smoke control of fires in subway stations," *Theoretical and computational fluid dynamics*, pp. 349--368, 2003.
- [11] ENGYS, 2025. [Online]. Available: <https://engys.com/>.
- [12] Corpo de Bombeiros do Estado de São Paulo, *Instrução Técnica nº 45/2019 - Segurança Contra Incêndio para Sistemas de Transporte Sobre Trilhos*, Secretária da Segurança Pública, 2019.



31ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA
12º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

- [13] A. Haghighat e K. Luxbacher, "Determination of Critical Parameters in the Analysis of Road Tunnel Fires," *International Journal of Mining Science and Technology*, vol. 29, pp. 187-198, 2019.

- [14] M. M. Barsin, M. A. Bassily, H. M. El-Batsh, Y. A. Rihan e M. M. Sherif, "Performance of impulse ventilation system in an underground car park fire: Case Study," *Journal of Building Engineering*, vol. 29, 2020.

- [15] M. I. Bilge, *CFD Simulation of Train Fire in the Istanbul Metro Tunnel*, 2018.

- [16] ENGYS, "Smoke Control in Subway Tunnels: Revolutionizing Safety through HPC-Based Engineering Design," 30 10 2023. [Online]. Available: <https://engys.com/blog/smoke-control-in-subway-tunnels/>. [Acesso em 23 07 2025].

- [17] A. d. S. Neto, *Escoamentos Turbulentos: Análise Física e Modelagem Teórica*, Uberlândia, MG: Composer, 2020.

- [18] N. Gobeau, *Guidance for HSE Inspectors: Smoke Movement in Complex Enclosed Spaces - Assessment of Computational Fluid Dynamics*, Health & Safety Laboratory - Fire and Explosion Group, 2002.

- [19] FF4EUROHPC, "https://www.ff4eurohpc.eu/," 27 09 2023. [Online]. Available: <https://www.ff4eurohpc.eu/en/success->



31ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA
12º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

stories/2023092218335604/hpccbased_engineering_design_for_control_of_smoke_in_subway_tunnels. [Acesso em 27 09 2023].

- [20] W. J. Massman, "A review of the molecular diffusivities of H₂O, CO₂, CH₄, CO, O₃, SO₂, NH₃, N₂O, NO, and NO₂ in air, O₂ and N₂ near STP," *Atmospheric Environment*, vol. 32, nº 6, pp. 1111-1127, 1998.
- [21] T. Jin, "Studies on Human Behavior and Tenability in Fire Smoke," *Fire Safety Science*, vol. 5, pp. 3-21, 1997.
- [22] G. W. Mulholland, "SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, chapter Smoke Production and Properties," *National Fire Protection Association*, vol. 3rd edition, pp. 337-338, 2002.
- [23] J.-Y. Jung, S.-G. Kang, H.-J. Yoon, K.-B. Shin e J.-K. Lee, "Analysis of Heat and Smoke Flow according to Platform Screen," *Advances in Civil Engineering*, 30 05 2018.
- [24] H.-J. Kim e D. G. Lilley, "Heat Release Rates of Burning Items in Fires," em *AIAA - 38th Aerospace Sciences Meeting & Exhibit*, Reno, NV, 2000.
- [25] R. Papa, L. C. d. C. Santos, C. R. d. Andrade e E. L. Zaparoli, "Numerical Simulation of the Smoke Transport Inside an Aircraft Cargo Compartment Using a Passive Scalar Approach," em *COBEM*, Brasília, DF, 2007.



31ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA
12º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

- [26] P. DiNenno, C. Beyler, R. Custer e W. Walton, SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, Society of Fire Protection Engineers, 2002.