CATEGORIA 3

SISTEMA DE VENTILAÇÃO PRIMÁRIA E EXTRAÇÃO DE FUMAÇA DA LINHA 4 DO METRÔ DO RIO DE JANEIRO

INTRODUÇÃO

Para se acompanhar o crescimento das grandes cidades, é necessário realizar investimentos de infraestrutura. A mobilidade é um dos principais fatores a serem considerados, sendo preciso revisar seus sistemas de acordo com as expansões e reorganizações urbanas, a fim de viabilizar a locomoção de milhões de pessoas que utilizam diariamente o transporte público.

Com este foco, o governo do estado do Rio de Janeiro decidiu investir na realização do projeto Linha 4, expandindo o sistema metroviário, ligando a Zona Sul da cidade até a Barra da Tijuca, localizada no início da Zona Oeste. Após vencer licitação pública, o Consórcio Rio Barra (CRB) assina, em 1998, contrato de operação e manutenção da Linha 4 por 25 anos, precedidas de obra pública. Na ocasião da assinatura do contrato, o trajeto da Linha 4 iria da ainda não construída estação Morro de São João, que seria localizada entre as estações Botafogo e Cardeal Arcoverde, até a

estação Jardim Oceânico, na Barra da Tijuca, passando pelos bairros de Botafogo, Humaitá, Jardim Botânico, Gávea e São Conrado.

Após a assinatura do contrato, se passam anos sem que fossem iniciadas as obras para construção da nova linha. Em 2009, o Rio de Janeiro é escolhido como sede dos Jogos Olímpicos de 2016, o que estimula investimentos na mobilidade da cidade. Para atender às necessidades logísticas dos Jogos, é feito estudo para alteração do traçado da linha. Em 2010, é assinado aditivo ao contrato de concessão, transformando a Linha 4 em um prolongamento da Linha 1, passando pelos bairros de Ipanema, Leblon e São Conrado.

Figura 1 - Comparativo entre o traçado original licitado e o traçado atual da Linha 4

Em 2013, o Consórcio Rio Barra (CRB) firma contrato de Operação e Manutenção da Linha 4 com o MetrôRio e de locação de sistemas e material rodante com a MetroBarra (ambas empresas do Grupo Invepar).

A parte de obras civis da nova linha ficou a cargo dos consórcios CL4S (Trecho Sul) e CCRB (Trecho Oeste). Dentro dos vários sistemas a serem executados pelos consórcios, estava o sistema de ventilação primária.

As estações metroviárias possuem características peculiares por tratarem de túneis escavados para transporte de passageiros, ou seja, os espaços físicos são destinados para atender a este fim. Sendo assim, os ambientes devem atender características embasadas em normas, para atender às necessidades dos passageiros, como segurança, conforto térmico, níveis de ruído, entre outros. Para a operação da estação, o sistema de ventilação primária deve estar instalado e operacional.

As estações da Linha 4 do Metrô do Rio foram concebidas contemplando um sistema de ventilação primária moderno, com interações entre as estações e os túneis, sendo capaz de atuar tanto em situações de normalidade, garantindo a renovação do ar e conforto térmico das áreas internas da estação, quanto, também, em casos de sinistro das dependências da estação e túneis.

A geografia dos terrenos por onde a Linha passa e algumas interferências dos modos de construção geraram desafios de projeto para a implantação do sistema de ventilação primária. Entre eles estavam dois túneis de aproximadamente 2km e 6km de extensão, atravessando morros com terreno de rocha maciça, entre as estações de Antero de Quental, São Conrado e a terminal Jardim Oceânico. Estes trechos foram construídos em bitúneis, com configurações específicas que exigiam soluções desafiadoras para situações de riscos operacionais, como incidentes de infraestrutura e incêndios, principalmente para desenvolvimento de alternativa de saída de emergência para evacuação de passageiros.

O projeto de ventilação primária precisou resolver a questão das saídas de emergência com passagens entre os túneis, possibilitando a evacuação e resgate seguro dos usuários. Todo o sistema teve que obedecer a premissa de transformação do existente para criação e atendimento das necessidades de operação.

Em resumo, este artigo tem como objetivo descrever o sistema de ventilação da Linha 4, que buscou atingir os parâmetros de segurança operacional – evitando consequências trágicas como as observadas em recentes incidentes de repercussão nacional – e de excelência no atendimento ao cliente – garantindo o conforto térmico da estação. E, principalmente, trouxe inovações técnicas, que podem ser replicadas em construções similares de outros projetos metroferroviários.

DIAGNÓSTICO

Na execução de uma estação de metrô existem muitos desafios. Para este tipo de construção são realizados vários estudos e dimensionamentos para projetar a estação e o túnel, de acordo com a finalidade que o mesmo desempenhará. Sendo assim, para a operacionalização de uma estação de metrô, vários sistemas e subsistemas são necessários, como por exemplo: subestação auxiliar, subestação retificadora, ventilação primária e secundária, bombeamento, sonorização, sinalização, detecção de incêndio, iluminação, balizamento e o próprio trem que irá transportar os usuários, bem como equipamentos para tornar a estação acessível, como escada rolante, elevador e plataforma vertical. No caso da Linha 4 do metrô do Rio de Janeiro, um dos desafios foi a configuração de túneis singelos, os denominados bitúneis, em

um trecho coberto por morros rochosos, entre as estações Antero de Quental e São Conrado, e entre esta última e a terminal Jardim Oceânico. Esta geografia peculiar dificultou a construção de blocos de ventilação ao longo dos túneis, com acesso à área externa, que muitas vezes são utilizados como saídas de emergência.

Toda a arquitetura foi projetada para atender à lista de requisitos pertinentes aos vários sistemas necessários para a operação de uma estação de metrô. Na execução da nova linha, foi incluída uma nova conexão entre as estações Cantagalo e General Osório, denominada "Túnel de interligação entre as Linhas 1 e 4", que segue por um túnel singelo com via dupla em direção ao oeste, via São Conrado, até chegar ao chamado emboque – saída para a ponte estaida que acessa a estação terminal Jardim Oceânico na Barra da Tijuca (Zona Oeste).

Além das interações entre as linhas, o projeto de ventilação primária da Linha 4 passou por diversos desafios inesperados, oportunidades para a área de Engenharia identificar e desenvolver soluções e propostas. Diversos obstáculos foram enfrentados para se executar e implantar o sistema, tendo que se adequar a condições até então desconhecidas. As estações foram projetadas com uma configuração e uma filosofia mais modernas, obedecendo aos princípios e fundamentos tradicionais, porém com desafios numerosos e desconhecidos. As soluções implantadas trouxeram uma nova forma de operação para o sistema metroviário como um todo, uma vez que existe a interligação entre as linhas e a interface obrigatória entre os sistemas e modos de operação.

1. Princípios de funcionamento e filosofia do Sistema de Ventilação Primária

O sistema de ventilação primária tem como finalidade inicial assegurar aos passageiros condições de conforto térmico aceitáveis dentro de uma estação e túnel, através de renovação de ar, controle da velocidade do ar nas áreas de fluxo de usuários e controle do nível de ruído das instalações de ventilação primária. No entanto, o principal e mais importante dimensionamento a ser realizado é o dos dados necessários para extração de fumaça em caso de sinistro, possibilitando a evacuação segura dos usuários e colaboradores. Assim sendo, o balanço térmico e de vazão consiste em estimar as admissões de calor e as trocas térmicas naturais com as zonas adjacentes e o exterior. Como as admissões de calor são essencialmente devidas aos trens, aos passageiros e aos equipamentos elétricos, e os desperdícios originam das trocas entre os túneis e estações e o exterior, estas liberações de calor ocorrem essencialmente nas estações, galerias de estacionamento nos terminais e plataformas de manobra. O balanço térmico é estabelecido para as horas de pico com trens a plena carga, representando 80% do aporte de calor no túnel e 60% em estação. Outro elemento de admissão de calor para cálculo do balanço térmico é a iluminação, sendo que a potência luminosa consumida se reparte principalmente nas estações e nos acessos.

2. Ventilação utilizada no Metrô do Rio

O sistema de ventilação do Metrô do Rio utiliza a conjugação do processo de ventilação ligada por meio de ventiladores e o de ventilação por efeito pistão dos

trens. A ventilação tem por finalidade assegurar o nível de conforto térmico exigido pelas normas do Metrô, ou seja:

- Diferença de temperatura de 2ºC entre o exterior e o interior das estações;
- Velocidade do ar nas plataformas: máxima 1,5m/s;
- Velocidade do ar nos acessos: máxima 1,2m/s;
- E manter um nível de conforto acústico dentro das estações (NC55 ou 64 dB A) e nas imediações das estações e saídas de ventilação (NC 45 ou 55dB A nas zonas residenciais e NC 55 nos outros casos). [1]

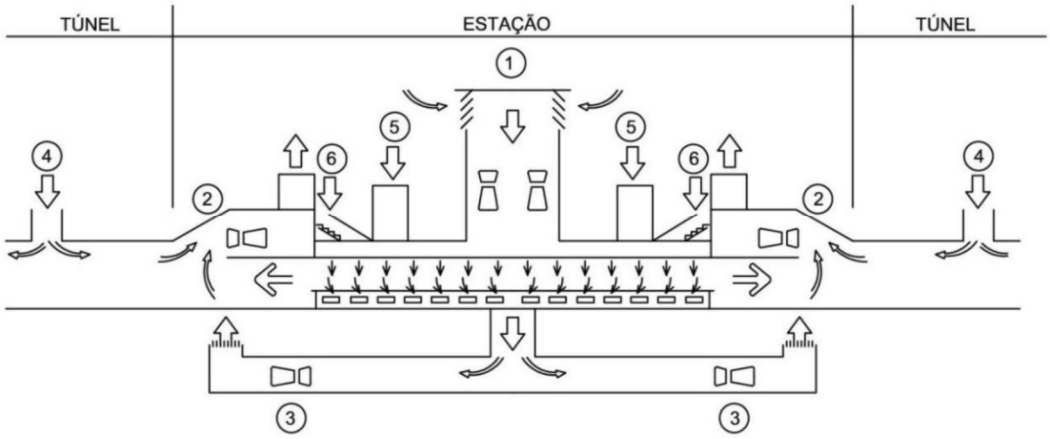

Figura 2 - Esquema do fluxo de ar nas estações de configuração central

O ar fresco aspirado do exterior pelos ventiladores indicados pelo número 1 na Figura 2 é distribuído no mezanino e na plataforma através de grelhas dispostas ao longo do forro falso denominado como pleno. O ar quente é aspirado pelos ventiladores de exaustão, localizados nas posições indicadas pelo número 3 na Figura

[1] Informações conforme documento AT-SIE-0082 – Descritivo lógico energia – Metrô Rio - 1977. 10

2, situados em cada extremidade da estação. Eles captam o calor, gerado pelos trens, por canais sob as plataformas e grelhas distribuídas ao longo da estação. Esta ventilação transversal é completada por outra longitudinal, realizada com 2 pontos de exaustão mista (uma de cada lado da estação com 2(dois) ventiladores). Cada posto localizado na extremidade da estação tem sua aspiração à aproximadamente 30m da entrada da estação, permitindo a entrada de ar naturalmente para o túnel. Esses postos servem também para proteger a estação contra o efeito pistão dos trens. Permitindo com que exista a diferença de pressão, fazendo com que o complemento de ar fresco entre através de 2 aberturas de aeração natural, identificadas na Figura 2 pelo número 4, e pelos acessos.

No túnel, o ar fresco entra através de uma abertura situada no meio da interestação, identificado na Figura 2 pelo número 4, ou seja, aproximadamente a 250m do posto de exaustão mecânica.

Os níveis de ruído do sistema de ventilação são garantidos pela instalação de amortecedores nos grupos de ventiladores, a fim de evitar a transmissão de vibrações, o conjunto motor ventilador montado sobre chassi-suporte é isolado do resto da estrutura através de amortecedores de vibrações e a ligação entre o ventilador e o difusor é feita por conexão flexível. De modo a assegurar o nível de conforto acústico dentro das estações e nas imediações das instalações do Metrô, são instalados 2 conjuntos de atenuadores de ruídos, um na aspiração, o outro na descarga do ventilador, além de portas e alçapões estanques ao ar e isolados acusticamente para evitar a transmissão de ruído pelos acessos do posto.

3. Extração de Fumaça

A finalidade da extração de fumaça em um prédio incendiado é a de realizar duas funções essenciais:

i. Tornar praticáveis os locais em contato com o local incendiado;

ii. Impedir a propagação do fogo fora do volume sinistrado.

A conservação das condições de praticabilidade implica em manter em limiares toleráveis os diversos fatores que ameaçam as pessoas.

Para consegui-lo, a extração de fumaça deve visar a:

- Manter uma visibilidade suficiente (superior a 4m);
- Reduzir o teor dos gases tóxico através de uma diluição;
- Conservar uma taxa de oxigênio aceitável;
- Evacuar as calorias produzidas pelo foco.

4. Princípio da Extração de Fumaça

São designados habitualmente sob o termo genérico de “extração de fumaça” dois grandes tipos de controle das fumaças, correspondendo aos dois objetivos definidos. O primeiro consiste em assegurar uma varredura do espaço a proteger por ar fresco e extrair dele as fumaças a fim de que, na zona de ocupação, a diluição dos gases de combustão seja tal que reduza ao mínimo seus efeitos nocivos, criando uma rota de fuga segura, permitindo a evacuação e a intervenção.

O segundo consiste em estabelecer uma hierarquia das pressões entre o local sinistrado e os locais adjacentes, de maneira a realizar um equilíbrio que se oponha a propagação das fumaças.

A eficiência desses sistemas será maior na medida em que a evacuação dos gases de combustão ocorra o mais rapidamente e o mais perto possível do foco. Sendo assim, diminuídos os volumes de fumaças a extrair e os riscos de propagação.

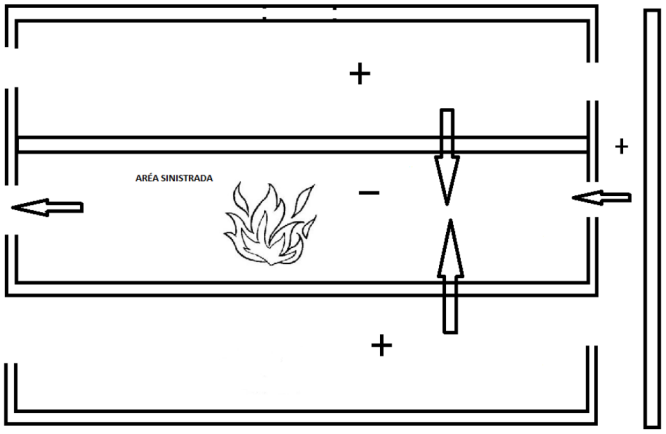

Figura 3 - Extração de fumaça por hierarquia das pressões - O local sinistrado deve estar em depressão com relação aos locais adjacentes

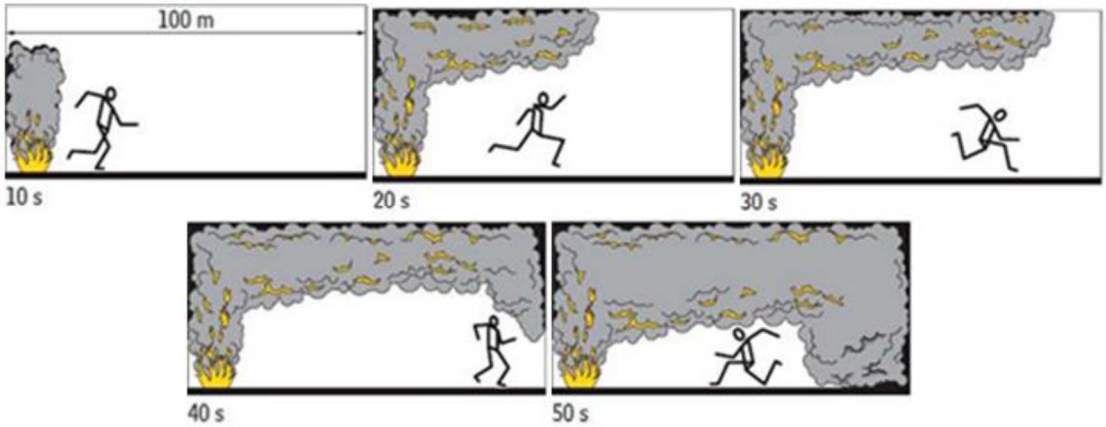

Figura 4 - Dispersão da fumaça em 50s para uma distância de 100m

Seja realizada por ventilação natural ou por ventilação mecânica, a extração de fumaça só será eficaz se atender a certo número de obrigações. A primeira, e talvez a mais importante, concerne à compartimentalização. Os volumes a desenfumaçar devem sempre ter dimensões razoáveis, como um compartimento, um nível, a compartimentalização sendo realizada por divisórias, portas e válvulas a fechamento automático e, nos grandes volumes, por espelhos, dificultando o escoamento das fumaças.

Finalmente, a varredura satisfatória dos locais a desenfumaçar será obtida por uma distribuição ou divisão sensata das entradas de ar e das bocas de extração, de modo a evitar qualquer zona morta onde poderia estagnar um tampão de fumaça inoportuno. A este respeito, deve-se notar que mesmo com uma extração mecânica, não haverá extração de fumaça sem entrada de ar. Convém ainda não esquecer uma obrigação relacionada à exigência de conforto térmico, e agravada pelas necessidades de economia de energia a qual condena todos os sistemas de extração de fumaça com aberturas permanentes.

Deve-se finalmente observar que os pontos de extração devem ser os mais numerosos possíveis para serem eficazes; de fato, é melhor extrair as fumaças o mais próximo quanto possível do foco potencial. Além disto, para a mesma superfície de abertura, vários exaustores bem repartidos são mais eficazes que um só (tomada de ar).

5. Aplicação ao Metrô do Rio

Define-se programa de extração de fumaça como funcionamento conforme programação/parametrização ou desligamento com automatismo de todos os ventiladores de uma estação e de suas interestações, conforme as condições a serem obtidas na zona de sinistro considerada (sobre pressão ou sub pressão). O sistema de ventilação foi projetado para servir, no caso de incêndio, à extração da fumaça. Entre outras medidas, os ventiladores e motores foram previstos para suportar temperaturas elevadas (incialmente 165ºC, atualmente projetados para suportar temperaturas de até 250ºC) e com possibilidade de funcionamento em inversão.

A extração de fumaça das estações ou dos túneis, no caso de incêndio, é destinada:

1. A assegurar a retirada rápida dos passageiros nas melhores condições de segurança;

2. A permitir aos bombeiros que tenham acesso aos locais do sinistro.

O sistema de extração de fumaça utiliza todas as instalações de ventilação (ventiladores de exaustão e insuflação com velocidades e sentidos de funcionamento predeterminados em função do programa escolhido, válvulas de fechamento das aberturas de ventilação natural) e tem prioridade sobre o sistema de regulação e de comando manual. A única exceção é o comando manual localizado no posto de ventilação. Por razão de segurança do pessoal, se o comutador estiver na posição “desligamento” ou “comando local”, o comando de extração de fumaça não terá nenhuma ação sobre os ventiladores do posto considerado, mas fará soar um alarme sonoro indicando que o posto deve ser evacuado rapidamente após a colocação em “Comando a distância” para entrar no programa previsto.

Em uma estação, cinco casos podem ser apresentados:

1. Caso: Incêndio no nível da plataforma ou incêndio na parte inferior de um trem estacionado;

2. Caso: Incêndio na parte superior de um trem estacionado;

3. Caso: Incêndio no mezanino;

4. Caso: Incêndio nos locais técnicos da estação;

5. Caso: Incêndio nas interestações.

Todos os comandos de extração de fumaça são concentrados na sala do Supervisor. Após confirmação visual do local de incêndio, o supervisor efetua as manobras.

ANÁLISE DOS RESULTADOS

1. Configuração da ventilação primária na Linha 4

Transformar rocha e morros em uma linha de metrô, com túnel e estações, trouxe uma série de obstáculos de projeto. Foram necessários cálculos de dimensionamento do sistema de ventilação primária, que atendessem sua concepção: 5 estações com interligação do sistema, contendo blocos de insuflação da estação; blocos de exaustão da estação e porão de cabos; blocos de exaustão do túnel, além de jatos ventiladores ao longo dos bitúneis e as passagens de emergência. A implantação desse sistema de ventilação primária passou por muitas interfaces com outros sistemas, sendo a principal e de maior influência na implantação civil e de automação.

A filosofia da ventilação primária da linha 4, obedece as mesmas características mencionadas anteriormente, acrescidas de inovações e utilização de equipamentos mais modernos. Diferente da linha 1, que cada estação possuiu sua autonomia na operação, a linha 4 opera interagindo com as demais estações, sendo assim em caso de algum sinistro, ao acionar o programa de extração de fumaça solicitado, mais de uma estação será demanda. Essa modernidade de interação na automação do sistema permitiu vencer os desafios encontrados nos bitúneis quanto à restrição para criação de saídas de emergência. Sendo solucionadas com construção das passagens de emergência para evacuação segura.

1.1 Instalações das Estações da linha 4

As estações foram projetadas com o intuito de proporcionar aos seus ocupantes, passageiros e funcionários, um deslocamento rápido e em caso de uma situação de emergência ou evento de incêndio, proporcionar uma rota para um ponto de seguro com rapidez e de fácil acesso.

1.1.1 Materiais de construção

Com foco na segurança, o projeto previa a utilização de materiais para a edificação de todas as novas estações seriam do Tipo I e/ou Tipo II de construção, ou seja, materiais não combustíveis.

1.1.2 Evacuação

O projeto de evacuação das estações considerou a evacuação dos passageiros do trem e da estação até uma área segura. Duas vias de saída, para cada estação, são fornecidas a partir das plataformas das estações. As rotas de saída possibilitam que a plataforma seja evacuada em menos de quatro minutos e permitem um tempo de evacuação para uma área segura menor do que seis minutos.[2]

1.2 Norma para embasamento da solução para a linha 4

A utilização de uma norma internacional que orienta quanto as melhores praticas de atendimento de ventilação em túnel metroferroviário, trouxe ganho e embasamento nas decisões para as soluções encontradas na execução do projeto. A NFPA 130 aplica-se a todas as partes do metrô, incluindo as áreas não públicas, tais como estacionamentos de trens, áreas de armazenamento e vias de manobra.

1.3 Evacuação

Em caso de sinistro a primeira orientação é fazer com que o trem chegue até a próxima estação para evacuação, porém caso não seja possível a movimentação do trem e a evacuação seja no túnel, foram instaladas passarela para os passageiros evacuarem um trem a partir de qualquer local ao longo da rota de fuga. As passagens direcionam a uma estação ou a uma passagem de emergência no trecho do bitúnel.

A área livre que engloba a passagem é definida como se segue:

- 610 mm de largura na superfície de caminhada;

[2] NFPA 130 Seção 5.5.1, NFPA 130 Seção 5.5.6

- 760 m de largura a 1420 mm acima da superfície de caminhada;
- 640 mm de largura a 2025 mm acima da superfície de caminhada;
- As passarelas elevadas devem possuir um corrimão do lado da passagem oposta à ferrovia.

A distância máxima entre as saídas deve ser de 762 m ou menos. Quando são utilizadas passagens de emergência no lugar das saídas, a distância entre elas não deve exceder 244 m e essas passagens não podem distar mais do que 244 m das estações ou portais.

As passagens de emergência são salas pressurizadas por dois exaustores, que são acionados quando existe a necessidade de evacuação neste trecho. Fazem a ligação de uma via a outra no trecho do bitúnel através de portas que suportam a pressão transitória associada aos trens e o sistema de ventilação.

1.4 Ventiladores e dispositivos relacionados

Buscando manter a renovação do ar e as vazões necessárias para a extração de fumaça no bitúnel, foram instalados ventiladores de emergência chamados de jatos ventiladores, que são capazes de mover o ar dos túneis em qualquer direção, conforme os modos operacionais de ventilação.

O sistema também é capaz de funcionar em plena capacidade tanto em modo de insuflação quanto de exaustão para a diluição de produtos nocivos. Quando necessário tem a capacidade de ser desligado e fechar os dampers no caso em que a dispersão de gases nocivos deva ser minimizada. Os ventiladores de emergência, motores e

componentes expostos ao fluxo de ar de exaustão foram projetados para operar a uma temperatura de 250 oC durante um período de pelo menos uma hora.

1.5 Análise de ventilação

A análise do sistema de ventilação divide os túneis da extensão da linha do metrô em zonas de ventilação de túneis (TVZ). Com base na geometria dos túneis e nos resultados da análise, foi decidido se as zonas de túneis seriam ventiladas longitudinalmente ou com exaustão em nível elevado, como mostrado na Figura 4.

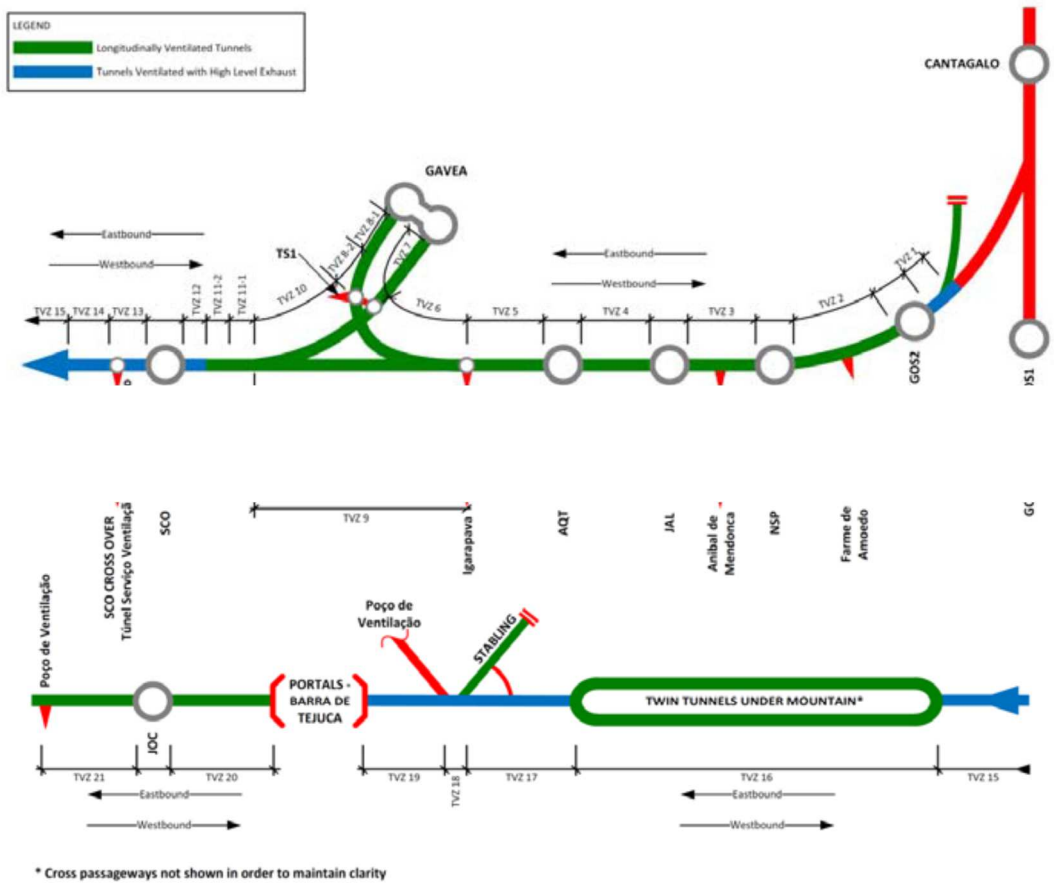

Figura 5 - Métodos de ventilação nos túneis da Linha 4

Quando a análise foi concluída, tabelas de modo operacional e esquemas foram desenvolvidos para auxiliar na configuração do sistema de ventilação. Uma análise de engenharia, realizada com o software de simulação de metrô validado e apoiado por técnicas de dinâmica de fluido computacional (CFD).

1.6 Ventilação longitudinal

O sistema de ventilação longitudinal utiliza ventiladores das estações em lados opostos de uma seção de túnel para soprar e puxar o ar de uma extremidade para a outra. Em muitos casos, duas ou três estações no ponto anterior da seção do túnel incidente são utilizadas para auxiliar o fluxo fornecendo ar para o túnel. O ideal é usar apenas um sistema de ventilação em modo de exaustão para impedir que a fumaça se espalhe em uma estação, no caso da linha 4 em alguns casos em que o fornecimento no ponto anterior ou a capacidade de exaustão local for insuficiente, é utilizado mais de um sistema de exaustão.

A análise de ventilação longitudinal foi realizada com o software de modelagem 1D denominado *Subway Environmental Simulation* (Simulação ambiental de metrô, SES). O programa utiliza parâmetros geométricos, atmosféricos e físicos para calcular fluxos de ar realistas em ambientes de túneis. A velocidade crítica é determinada por um cálculo e os resultados são apresentados na Tabela1.

Tabela 1 - Parâmetros do Projeto

Condições para projeto externo (ao ar livre)	**Valor**
Localização	Rio de Janeiro
Temperatura de projeto de inverno	17.1°C
Temperatura de verão do projeto (bulbo seco)	32.8 °C
Temperatura de verão do projeto (bulbo úmido)	24.9 °C
Limite de umidade	10% - 100% com condensação
Operação de emergência - Evacuação do túnel no incidente de incêndio	**Valor**
Velocidade de circulação máxima do trem incidente	11 m/s
Velocidade máxima de descarga de ar através de grades de exaustão	10 m/s

1.7 Desenvolvimento do Modelo

1.7.1 Passagens

As passagens transversais estão presentes na seção NATM do túnel entre as estações São Conrado e emboque da Barra da Tijuca, onde as vias se dividem em dois túneis distintos. As passagens transversais foram criadas no modelo SES e foram realizadas simulações com passagens transversais fechadas.

A equação de Bernoulli pode ser desenvolvida igualando as forças sobre um elemento de um tubo de fluxo em um fluxo de fluido sem atrito à taxa de variação dinâmica. Ao integrar esta relação para fluxo constante, a seguinte expressão resulta em(6):

$$v22= \int dP\rho+gz=constante\ (Nm/kg)$$ (Equação 1)

A partir desta equação, pode ser feita uma derivada da pressão estática e da velocidade.

A equação de Fanning:

$$\Delta p = f r v 22 \times L D \text{ (Equação 2)}$$

A equação Darcy-Weisbach:

$$\Delta p = 4 f r v 22 \times L D \text{ (Equação 3)}$$

É importante salientar que a diferença entre as equações de Fanning e Darcy-Weisbach é sutil, mas precisa ser compreendida e aplicada corretamente. A equação de Fanning usa 'profundidade hidráulica média' (geralmente, 'm') como a dimensão de corte, enquanto Darcy-Weisbach usa o diâmetro. O diâmetro hidráulico é quatro vezes a profundidade hidráulica média.

Infelizmente, 'f' é muitas vezes usado para ambos os sistemas e isso gera muita confusão. Isso é fundamental para a análise e por isso usamos a seguinte relação como base para diferenciar os dois:

Se o coeficiente de atrito laminar for dado como 16/Re, então o “f” é de Fanning. Se o coeficiente de atrito laminar for dado como 64/Re, então o “f” é de Darcy-Weisbach.

Para um diagrama de Moody; Se o coeficiente de atrito em Re> 100.000 para r/e = 100 (d/k = 200) é 0,0075, então é o "f" de Fanning. Se o coeficiente de atrito em Re > 100.000, para r/e = 100 (d/k = 200) é de 0,03, então o “f” é de Darcy-Weisbach.

1.7.2 Capacidade da ventilação do túnel

Os ventiladores são reversíveis e de alta eficiência. Possuem uma eficiência de fluxo de 90% em seu sentido inverso. A vazão do volume mais baixo em ambos os

sentidos proporciona uma margem de segurança significativa na operação do sistema de ventilação primária da linha 4. Os ventiladores de alta eficiência, reversíveis, devem são capazes de operar em plena capacidade em ambas as direções, ou seja, insuflação e exaustão. Os ventiladores também são capazes de funcionar durante um período mínimo de 1 hora a uma temperatura de 250 °C.

1.8 Operações emergenciais

1.8.1 Zonas de ventilação do túnel

Durante um incêndio dentro de um túnel, serão gerados calor e fumaça pela queima de material combustível dos vagões e de seus acessórios. A taxa de liberação de calor é fundamental, pois é a base para a concepção do sistema de ventilação do túnel para as operações de emergência, como um incêndio de trem dentro da rede de transporte. Foi definido o valor da taxa de liberação de calor para 20 MW e este valor é considerado como a taxa total de liberação de calor do fogo a ser aplicada ao carro do trem em chamas em cada TVZ. A curva de crescimento do fogo utilizada no projeto para modelar incêndios na estação e nos túneis é mostrada na Figura 6.

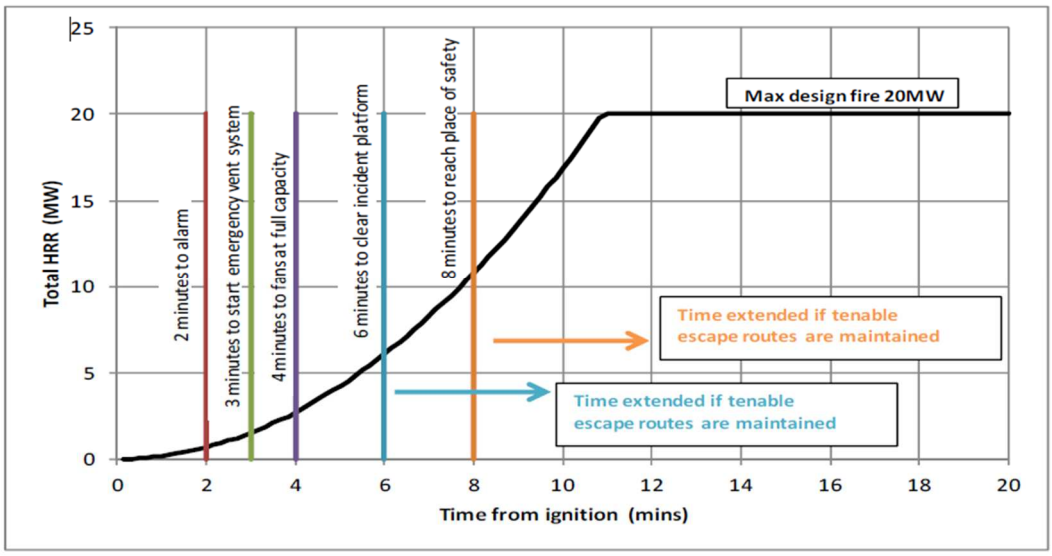

Figura 6 - Cronograma do crescimento do incêndio

A solução de projeto foi a criação de salas que interligassem um túnel singelo ao outro – as chamadas passagens de emergência. Estas salas permitem a evacuação segura dos passageiros e funcionários até a estação mais próxima e, então, para a rua.

1.9 Abordagem preferencial

Na hipótese de um incêndio em trem nos túneis de via, o trem deve seguir viagem até a próxima estação, onde a evacuação do trem ocorrerá de forma mais segura e mais rápida do que se a evacuação ocorresse nos túneis.

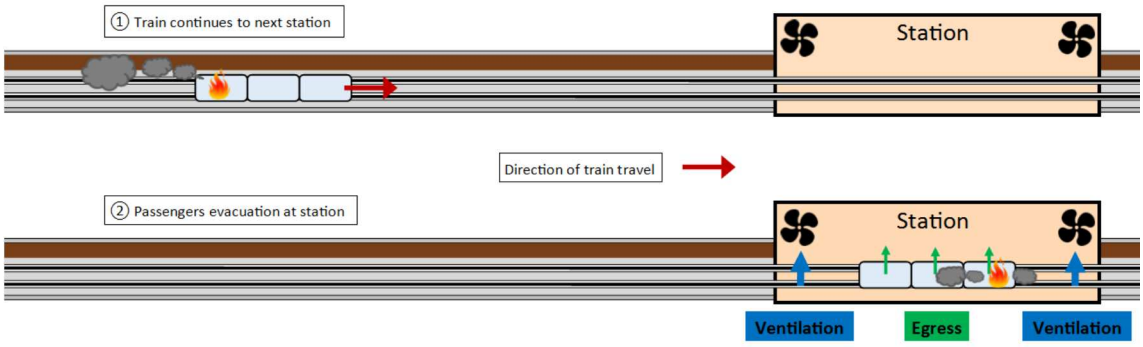

Figura 7 - Esboço que mostra a abordagem preferencial para a saída de emergência

No caso de um incêndio que impeça a movimentação do trem nos túneis, a evacuação será pelas portas laterais nas partes traseiras do trem do incidente, usando o corredor lateral para chegar a um local seguro.

1.10 Procedimento principal de evacuação de túneis

Na hipótese de um incêndio nos túneis, o Sistema de Ventilação de Túneis (TVS) manterá a rota sustentável de um lado do incêndio, permitindo que os passageiros escapem e que o Corpo de Bombeiro aja. Após o local do incêndio ter sido identificado e a direção da fuga ter sido definida, os passageiros andarão em direção contrária ao incêndio e na direção do local seguro mais próximo. O sistema de ventilação abastecerá a rota de evacuação com ar fresco, soprando a fumaça na direção oposta à da fuga e impedindo a ocorrência de *backlayering*; este conceito é ilustrado abaixo, na Figura 8.

Por padrão, o TVS enviará a fumaça na direção do percurso, uma vez que a corrente na direção do trem deixará a seção de ventilação afetada em menos de cinco

minutos. Nessas circunstâncias, a evacuação ocorrerá em direção à parte traseira do trem. O layout aberto do material rodante e os largos corredores permitirão que os passageiros evacuem o trem em caso de incêndio da parte inferior da estrutura do vagão ou passem por um incêndio de pequeno porte em seu estágio inicial.

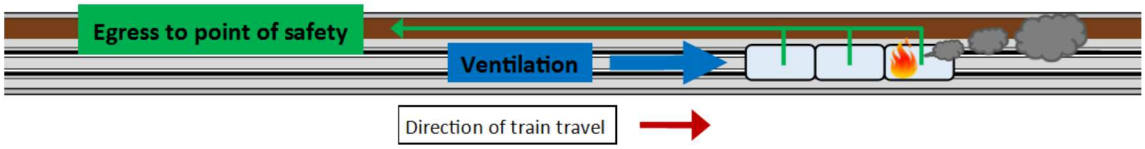

Figura 8 - Esboço que mostra o procedimento principal de evacuação de túneis

Os procedimentos existentes definem que apenas a porta do carro do trem que está mais próxima à direção da evacuação deve ser aberta, permitindo que os passageiros escapem na direção necessária e, ao mesmo tempo, se protejam dos efeitos da fumaça do fogo externo ao compartimento de passageiros. Este procedimento não geraria um tempo de evacuação maior, já que é o tempo da passagem pelo ponto de estrangulamento no corredor ao final do trem que rege o tempo necessário para evacuação pelo corredor, e não as portas disponíveis.

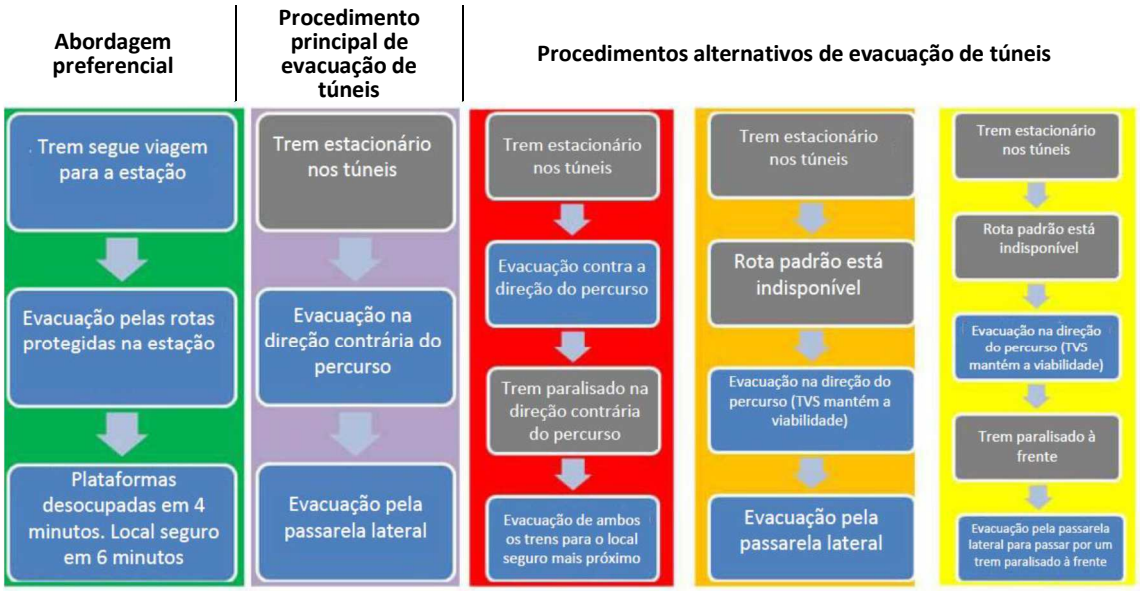

Figura 9 - Cenários de incêndio em trem e proposta de estratégia de evacuação

2. Conceito de operações para túneis longos

A estratégia desenvolvida para os túneis longos trata as questões específicas decorrentes das longas distâncias entre as saídas para a superfície. Os procedimentos de evacuação após a identificação de um incêndio em um trem, são descritos em detalhes para cenários nos túneis longos. A Figura 10 é um desenho esquemático que mostra as zonas de ventilação e de energia de tração nos túneis longos. As zonas de energia de tração permitem que seções de menos de 1 km de cada túnel de escoamento sejam isoladas, conforme exigido pela norma NFPA 130 e debatido na Seção 3.5 da mesma norma.

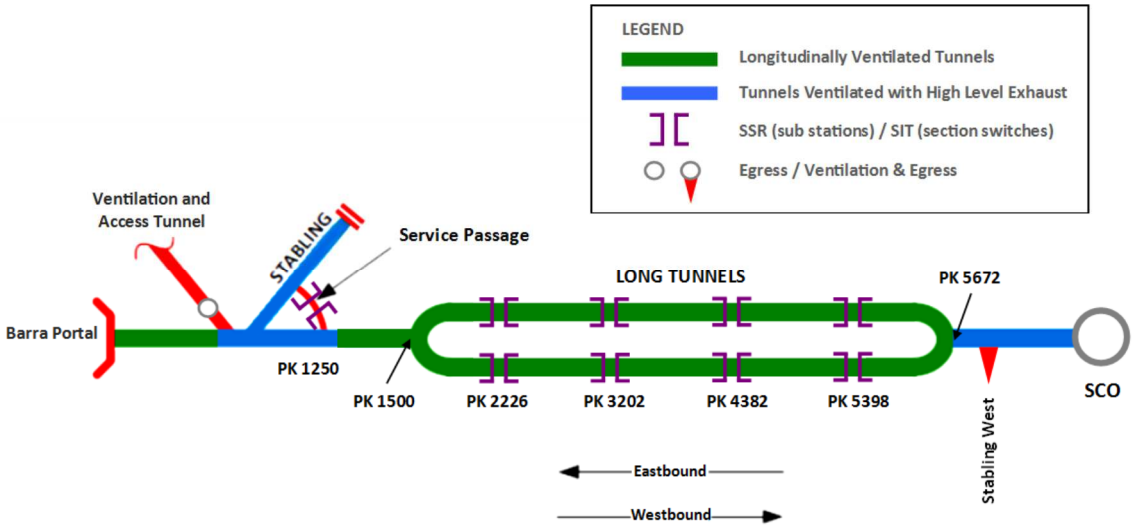

Figura 10 - Desenho esquemático que mostra as zonas de ventilação e de energia de tração nos túneis longos

A distância entre as passagens transversais nos túneis longos é inferior a 244 m, conforme exigência da norma NFPA 130. Buscando alcançar um nível de segurança equivalente recomendado na NFPA, para cumprir a exigência de distâncias entre saídas, *dampers* de ventilação foram instalados nas vias, nas extremidades das seções de túneis duplos. Sendo assim, depois que os passageiros passam pelos *dampers* de ventilação das vias, o sistema de ventilação proporciona condições viáveis para o restante da rota de saída.

A norma NFPA 130 não especifica critérios de tempo para a evacuação de túneis; ao chegar a um local seguro, a maioria dos passageiros será capaz de evacuar por conta própria, no entanto, dado o comprimento de quase 6 km dos túneis longos, estratégias operacionais para resgate e evacuação foram adotadas:

A evacuação serão através das passagens de emergência que permitem de forma segura que os usuários aguardem na outra via, livre de sinistro, o resgate por meio de um trem que virá no sentido oposto ao fluxo da extração. Essa estratégia foi definida considerando que:

a. O percurso de 2,5 km pode ser muito longo para que algumas pessoas com necessidades especiais, pessoas com mobilidade reduzida (PMR) ou ferida no incidente consigam evacuar o local;
b. O tempo de percurso dos emboques até o meio dos túneis é de cerca de 40 minutos (ida) ou 80 minutos (ida e volta), ou seja, muito tempo para que as operações de emergência sejam coordenadas com eficiência.

O TVS foram programados para estar em funcionando durante o período necessário para a evacuação, o que será longo no caso de um incêndio em direção ao meio dos túneis. No entanto, a fumaça não estará quente quando alcançar os ventiladores. Em caso de incêndio próximo aos ventiladores, situações em que os ventiladores podem ser afetados pelas temperaturas elevadas, o tempo necessário para a conclusão da evacuação será menor.

A seguir são apresentados os principais casos e estratégias de emergência nos trechos de bitúnel.

2.1 Caso de incidência de emergência – TVZ 09-2m

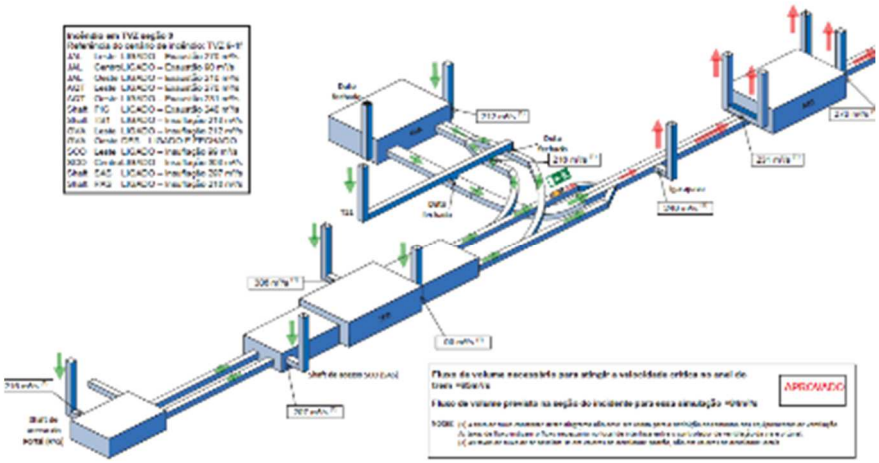

Figura 11 - Emergência TVZ 09-2m

Um trem estacionário está em chamas na seção do túnel 168, segmento 168. Esta é uma seção de túnel NATM de via única entre Igarapava e a estação São Conrado. O cenário demanda os sistemas de ventilação nas extremidades leste e oeste da estação NSP, nas extremidades leste, oeste e no centro da estação JAL, em ambas as extremidades da estação Leblon, em Igarapava, em TS1, na extremidade leste e no centro da estação São Conrado e no shaft de acesso da estação São Conrado estão ligados. Os insufladores têm 90% de sua capacidade de projeto. Os dampers de ventilação da via em todos os locais em que há ventiladores ligados estão abertos.

A figura 11 demonstra que a fumaça é direcionada para Antero de Quental e a evacuação na direção de São Conrado.

Tabela 2 – Emergência TVZ 09-2m

Status do sistema de ventilação (por bloco de ventilação):	Modo	Capacidade total (m³/s)	Fluxo real (m³/s)
NSP Leste	Insuflação	270	243
NSP Oeste	Insuflação	210	189
JAL Leste	Insuflação	270	243
JAL Centro	Insuflação	90	81
JAL Oeste	Insuflação	210	189
AQT Leste	Insuflação	270	243
AQT Oeste	Insuflação	231	208
PIG	Insuflação	240	216
TS1	Insuflação	240	216
SCO Leste	Exaustão	110	110
SCO Centro	Exaustão	340	340
SAS	Exaustão	330	330

2.2 Caso de incidência de emergência – TVZ 09-2o

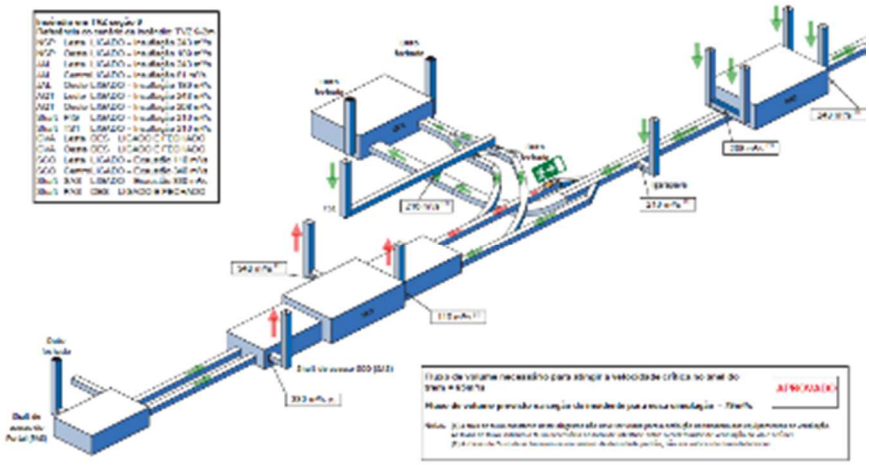

Figura 12 - Emergência – TVZ 09-2o

Um trem estacionário está em chamas na seção do túnel 168, segmento 168. Esta é uma seção de túnel NATM de via única entre Igarapava e a estação São Conrado. Os sistemas de ventilação estão operacionais ao Leste e Oeste de NSP, Leste, Centro e Oeste de JAL, nas duas extremidades da Estação AQT, Igarapava, Leste e Centro de SCO, e, acesso ao shaft de SCO. Os insufladores têm 90% de sua capacidade

de projeto. Os dampers de ventilação da via em todos os locais em que há ventiladores ligados estão abertos.

A figura 12 demonstra que a fumaça é direcionada para São Conrado e a evacuação na direção de Antero de Quental.

Tabela 3 - Emergência – TVZ 09-2o

Status do sistema de ventilação (por bloco de ventilação):	Modo	Capacidade total (m³/s)	Fluxo real (m³/s)
NSP Leste	Insuflação	270	243
NSP Oeste	Insuflação	210	189
JAL Leste	Insuflação	270	243
JAL Centro	Insuflação	90	81
JAL Oeste	Insuflação	210	189
AQT Leste	Insuflação	270	243
AQT Oeste	Insuflação	231	208
PIG	Insuflação	240	216
TS1	Não Operacional	-	-
SCO Leste	Exaustão	110	110
SCO Centro	Exaustão	340	340
SAS	Exaustão	330	330

2.3 Caso de incidência de emergência - TVZ 16-3º

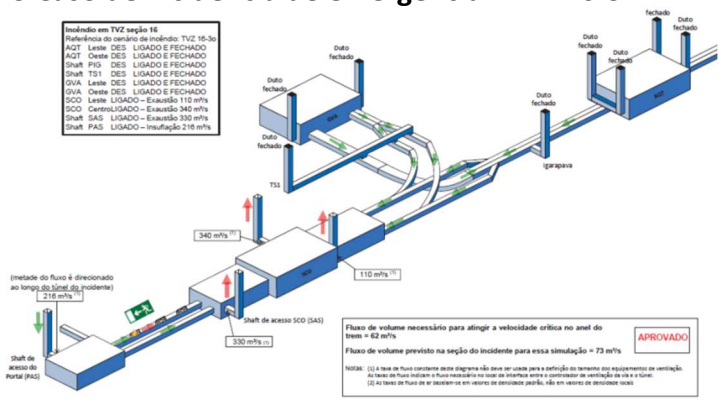

Figura 13 - Emergência – TVZ 16-3o

Um trem estacionário está em chamas na seção do túnel 210, segmento 210, e dois trens estacionários sem incidente estão na mesma zona de ventilação. Esta é uma seção de túnel NATM de via única entre a estação São Conrado e o Emboque da Barra. Os sistemas de ventilação na extremidade leste e no centro da estação São Conrado e nos shafts de acesso da estação São Conrado e do Emboque da Barra estão ligados. Metade da capacidade do shaft de acesso do Emboque da Barra tem dutos para os túneis longos, onde libera ar com força ao longo do túnel. Os insufladores têm 90% de sua capacidade de projeto. Os dampers de ventilação da via em todos os locais em que há ventiladores ligados estão abertos.

A figura 13 demonstra que a fumaça é direcionada para São Conrado e a evacuação na direção de Jardim Oceânico.

Tabela 4 - Emergência – TVZ 16-3o

Status do sistema de ventilação (por bloco de ventilação):	Modo	Capacidade total (m³/s)	Fluxo real (m³/s)
SCO Leste	Exaustão	110	110
SCO Centro	Exaustão	340	340
SAS	Exaustão	330	330
PAS (com dutos)	Insuflação	120	108
PAS	Insuflação	120	108

2.4 Caso de incidência de emergência – TVZ 16-4l

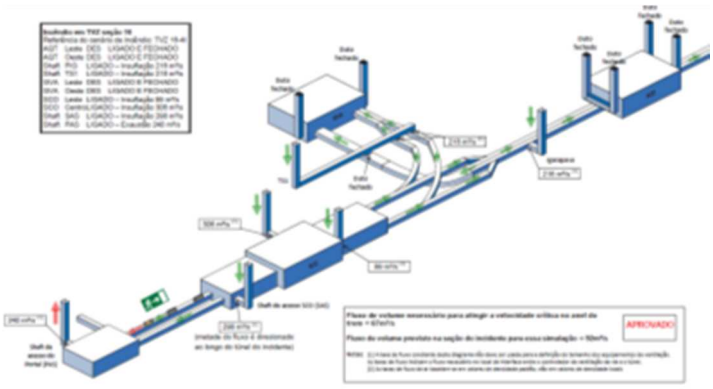

Figura 14 - Emergência – TVZ 16-4l

Um trem estacionário está em chamas na seção do túnel 210, segmento 211, e dois trens estacionários sem incidente estão na mesma zona de ventilação. Esta é uma seção de túnel NATM de via única entre a estação São Conrado e o Emboque da Barra. Os sistemas de ventilação em PIG, em TS1, na extremidade leste e no centro da estação São Conrado e nos shafts de acesso da estação São Conrado e do Emboque da Barra estão ligados. Metade da capacidade do shaft de acesso da estação SCO tem dutos para os túneis longos, onde libera ar com força ao longo do túnel. Os insufladores têm 90% de sua capacidade de projeto. Os dampers de ventilação da via em todos os locais em que há ventiladores ligados estão abertos.

A figura 14 demonstra que a fumaça é direcionada para Jardim Oceânico e a evacuação na direção de São Conrado.

Tabela 5 - Emergência – TVZ 16-4l[3]

Status do sistema de ventilação (por bloco de ventilação):	Modo	Capacidade total (m^3/s)	Fluxo real (m^3/s)
PIG	Insuflação	240	216
TS1	Insuflação	240	216
SCO Leste	Insuflação	110	99
SCO Centro	Insuflação	340	306
SAS	Insuflação	166	149
SAS (com dutos)	Insuflação	166	149
PAS	Exaustão	240	240

[3] Relatório de análise da ventilação em túneis_vol_1_v5 – CH2MHILL – Nov/2013

Tabela 6 - Resumo do sentido da operação do TVF e sentido da evacuação

Execução no.	Localização do incêndio	Tipo de túnel	Sentido da evacuação		Direção da ventilação	
Estações do sul		Entre Estações / Shaft		Rumo à estação / Shaft		Rumo à estação / Shaft
TVZ02-1	GOS2	-	NSP	TBM	NSP	GOS2
TVZ02-2	GOS2	-	NSP	TBM	GOS2	NSP
TVZ03-1	NSP	-	JAL	TBM	JAL	NSP
TVZ03-2	NSP	-	JAL	TBM	NSP	JAL
TVZ04-1	JAL	-	AQT	TBM	AQT	JAL
TVZ04-2	JAL	-	AQT	TBM	JAL	AQT
TVZ05-1	AQT	-	Igarapava	TBM	Igarapava	AQT
TVZ05-2	AQT	-	Igarapava	TBM	AQT	Igarapava
Triângulo						
TVZ06-1	Igarapava	-	TS1	TBM	TS1	Igarapava
TVZ06-2	Igarapava	-	TS1	TBM	Igarapava	TS1
TVZ07-1	TS1	-	Gávea	TBM	Gávea	TS1
TVZ07-2	TS1	-	Gávea	TBM	TS1	Gávea
TVZ08-1	Gávea	-	comprimento 8.666,878	NATM	comprimento 8.666,878	Gávea
TVZ08-2	Gávea	-	comprimento 8.666,878	NATM	Gávea	comprimento 8.666,878
TVZ08-3	comprimento 8.666,878	-	TS1	NATM	TS1	comprimento 8.666,878
TVZ08-4	comprimento 8.666,878	-	TS1	NATM	comprimento 8.666,878	TS1
TVZ09-1	Igarapava	-	Cruzamento em desnível	NATM	Cruzamento em desnível	Igarapava
TVZ09-2	Igarapava	-	Cruzamento em desnível	NATM	Igarapava	Cruzamento em desnível
TVZ10-1	TS1	-	Cruzamento em desnível	NATM	Cruzamento em desnível	TS1
TVZ10-2	TS1	-	Cruzamento em desnível	NATM	TS1	Cruzamento em desnível

CONCLUSÕES

O sistema de ventilação primaria é essencial para manter a segurança e a comodidade dos passageiros em uma estação metroferroviaria. É o sistema que garante a evacuação segura em caso de incêndio com o acionamento dos programas

de extração de fumaça nas estações e tuneis. Além de proporcionar a renovação do ar e conforto térmico de todo o trecho que contempla.

A ventilação primaria da linha 4 apresentou particularidades e interferências de construção, que levaram a engenharia a buscar recursos e alternativas para solucionar o problemas identificados e executar o projeto atingindo os parâmetros de segurança operacional – evitando consequências trágicas como as observadas em recentes incidentes de repercussão nacional – e de excelência no atendimento ao cliente – garantindo o cumprimento da básico do sistema que é manter o conforto térmico da estação. E, principalmente, garantir a extração de fumaça trazendo e aplicando inovações técnicas, que serão replicadas em construções similares de outros projetos metroferroviários.

Um túnel com aproximadamente 2km e outro de 6 km, sem ligação com a superfície, nos levaram à busca de uma solução para manter e garantir a segurança dos passageiros e funcionários durante toda a operação. Equipamentos modernos e inovadores foram utilizados nesse projeto. A comprovação deste resultado é o reconhecimento da operacionalidade do sistema quando demandado, verificado em simulações e testes de extração de fumaça. Além das interfaces de projeto, as interações com a as áreas operacionais foram primordiais. O acionamento dos programas de extração de fumaça possui interligação entre as estações, demandando mais de uma no procedimento de extração, e o entendimento de quem vai acionar é fato decisivo para o sucesso da operação do sistema. Treinamentos e simulações contaram com a participação e interação de várias áreas da empresa, sempre com o foco na segurança operacional para garantir o conforto e integridade dos passageiros.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

a. NFPA 130, Norma para trânsito em via fixa e sistemas de transporte ferroviário de passageiros, 2010;

b. NFPA 130, Norma para trânsito em via fixa e sistemas de transporte ferroviário de passageiros, 2014;

c. Tarefa D.1.8 - Relatório de Análise de Evacuação - Túneis_v1.3;

d. Tarefa E.3 - Nota Técnica - Revisão do sistema de segurança para atender a NFPA 130_v1.