



Prefeitura Municipal de Curitiba

Secretaria Municipal de
Planejamento e Administração

Rua Solimões, 160
Fone: 3350-9022
80.510.140
São Francisco
Curitiba - PR
www.curitiba.pr.gov.br

ANEXO III

DIRETRIZES BÁSICAS DO PROJETO

VOLUME IV - PROJETO DE ENGENHARIA E MATERIAL RODANTE

PROJETOS ARQUITETÔNICOS E DEMAIS PROJETOS TÉCNICOS PREDIAIS

PROJETO DE CLIMATIZAÇÃO E VENTILAÇÃO



SUMÁRIO

3.2.6.7. Projeto de Climatização e Ventilação.....	3
a) Análise regulamentar e normativa	3
a.1) Normativa aplicada	3
a.2) Regulamentação internacional da norma NFPA 130	4
a.3) Norma brasileira	7
b) Dados de entrada e hipóteses de estudos	8
b.1) Descrição geral da seção subterrânea	8
b.2) Dados geométricos	9
b.3) Dados de entrada e hipóteses sobre o material rodante	11
b.4) Dados de entrada e hipóteses relativas à operação	16
b.5) Dados climáticos e geotérmicos	17
c) Disposições relativas à evacuação.....	18
c.1) Quantificação dos poços de evacuação entre as estações	18
c.2) Avaliação preliminar do tempo de evacuação	20
d) Disposições relativas à ventilação	22
d.1) Sistema de ventilação de exaustão	22
d.2) Sistema de ventilação em modo normal	38
e) Exemplos de poços de evacuação/ventilação	39



3.2.6.7. Projeto de Climatização e Ventilação

Está apresentado, neste item, o dimensionamento de projeto do sistema de climatização/ventilação proposto a serem implantados na linha do metrô.

a) Análise regulamentar e normativa

Estão apresentadas a seguir as considerações das normatizações aplicáveis ao sistema de climatização/exaustão/evacuação.

a.1) Normativa aplicada

Os estudos conceituais foram realizados em observância das exigências da norma NFPA 130, que é reconhecida internacionalmente e recomendada para esse tipo de projeto em matéria de segurança contra incêndio.

Entretanto, na medida do possível, algumas exigências particulares provenientes da norma brasileira da ABNT NBR 15661 relativa à segurança contra incêndio nos túneis também são consideradas quando essas se mostram mais restritivas que as exigências da norma NFPA 130, mas ainda aplicáveis e pertinentes aos metrôs.

Consideradas as características do projeto, a norma brasileira não faz exigências adicionais àquelas definidas pela norma NFPA 130 quanto às disposições construtivas que dimensionam a obra civil neste estágio do projeto.

Em contrapartida, a norma NFPA 130 define objetivos mais precisos, notadamente em relação à proteção dos trens que não são impactados pelo sinistro no início do incêndio. Esse objetivo precisa prever particularmente uma concepção do sistema de exaustão que esteja relacionada aos headways operacionais, à cinemática dos trens



e ao sistema de sinalização e pode levar à implantação de poços de exaustão nos túneis.

Essa norma também estabelece exigências mais precisas em matéria de evacuação, notadamente no que diz respeito à distância entre duas saídas de emergência, que não deve exceder 762 m. Essa exigência tem um caráter particularmente dimensionador, pois, em função do comprimento do trecho entre as estações, pode demandar a construção de um ou vários poços de evacuação.

As preconizações relacionadas com a ventilação são baseadas na norma NFPA 130.

a.2) Regulamentação internacional da norma NFPA 130

Essa norma é utilizada com frequência internacionalmente nos túneis destinados aos transportes urbanos guiados. Tem a vantagem de definir objetivos gerais de segurança antes de descrever as soluções técnicas ou exigências que permitam atingi-los. Na presente data, a maior parte dos novos projetos de metrô é concebida de acordo com esses objetivos de segurança.

Recomenda-se respeitá-los no presente projeto, particularmente se elas implicarem disposições complementares que não são especificadas claramente no âmbito prescritivo da regulamentação brasileira.

Essa norma se baseia em dois objetivos principais, que são os seguintes:

- Proteger os usuários que não são impactados pelo sinistro no início do incêndio;
- Maximizar a sobrevivência dos usuários que são impactados pelo sinistro no início do incêndio (usuários do trem incendiado).



O primeiro objetivo pode se aplicar notadamente aos usuários que estão presentes nas zonas adjacentes à zona incendiada (proteção das estações adjacentes no caso de um incêndio no túnel). Pode-se também considerar que a norma se aplica a todos os outros trens que não correspondem ao trem incendiado. Particularmente, os trens que vêm a seguir devem ser protegidos das fumaças durante um período de tempo suficiente que permita colocá-los em abrigo ou para que seus passageiros sejam abrigados.

O segundo objetivo diz respeito particularmente aos usuários do trem incendiado para os casos de incêndio no túnel, que desde o início do sinistro são afetados pelo incêndio.

As principais exigências dessa norma, que devem ser consideradas nesse estágio do projeto, no caso dos túneis, são as descritas a seguir (exigências que podem influenciar a estrutura principal da obra civil).

a.2.1) Sistema de evacuação

A seguir estão apresentadas as principais considerações de projeto do sistema de evacuação:

- O sistema de evacuação terá uma superfície para pedestres ou qualquer outro meio aprovado, que permita a evacuação dos trens em todo e qualquer ponto da via do túnel, para que o usuário possa chegar com segurança à estação mais próxima ou a qualquer outra zona;
- Serão previstas travessias para pedestres nas vias, quando necessário, para garantir que a via de evacuação seja plana e contínua;
- As vias de evacuação terão escoamento livre;
 - De 610 mm na superfície de pedestres;
 - De 760 a 1.420 mm acima da superfície de pedestres;
 - De 610 a 2.025 mm abaixo da superfície de pedestres.



- A distância máxima entre duas saídas de emergência não excederá 762 m (saídas que dão para o exterior);
- As portas corta-fogo utilizadas nas vias de evacuação no túnel apresentarão um escoamento livre mínimo de 810 mm de largura.

a.2.2) Sistema de exaustão

A seguir estão apresentadas as principais considerações de projeto do sistema de exaustão:

- Será previsto um sistema de exaustão para toda e qualquer seção subterrânea, cujo comprimento ultrapasse 305 m;
- O sistema de ventilação será projetado para atender aos seguintes objetivos:
 - Fornecer um ambiente controlável ao longo da via de evacuação;
 - Produzir uma vazão de ventilação longitudinal suficiente no túnel, a fim de atingir a velocidade crítica no trem incendiado no túnel. Esse objetivo permitirá empurrar as fumaças numa direção privilegiada, evitando o risco de retorno das fumaças (backlayering);
 - A extração localizada (ventilação transversal) também será permitida, desde que o sistema seja capaz de confinar as fumaças no túnel a uma distância máxima de 150 m;
 - Conter o número máximo de trens que se encontrarão entre dois poços de ventilação.

É importante salientar que nessa norma não se prevê nenhuma distância máxima quanto ao confinamento das fumaças no caso da implantação de uma ventilação longitudinal. A necessidade de incluir ou não poços de ventilação será analisada, respeitando-se os objetivos gerais previstos na norma.



a.3) Norma brasileira

A norma que se aplica em matéria de segurança contra incêndio nos túneis no Brasil é a norma NBR 15661 da ABNT. Essa norma é geral a qualquer tipo de túnel destinado ao transporte e se aplica, portanto, tanto ao túnel rodoviário quanto ao túnel de metrô e ao túnel ferroviário.

Deve-se observar que esse caráter geral às vezes induz determinadas prescrições pertinentes no caso do túnel rodoviário, mas menos apropriadas no caso dos metrô e vice-versa. Portanto, convém fazer uma leitura prudente dessa norma quanto à sua aplicabilidade ao metrô.

Essa norma é geralmente prescritiva em matéria de ventilação, de exaustão e de evacuação, sem, no entanto, se apoiar em objetivos de segurança precisos.

Indica especialmente a potência de incêndio a ser considerada para o dimensionamento da ventilação, que será de 30 MW.

Essa potência é bastante comum para o dimensionamento das instalações de ventilação dos túneis rodoviários, mas se mostra elevada no caso dos metrôs, em que a potência de dimensionamento está geralmente compreendida entre 5 e 20 MW.

Além disso, nessa norma se especifica que a potência de incêndio de um vagão de passageiros de metrô ou de um vagão ferroviário estará compreendida entre 15 e 20 MW.

As principais exigências dessa norma, que serão consideradas nesse estágio do projeto, no caso dos túneis (exigências que podem influenciar a estrutura principal da obra civil), estão descritas a seguir.



a.3.1) Sistemas de ventilação

Em matéria de ventilação, indica-se que é possível considerar uma ventilação natural para os túneis de comprimento inferior a 500 m. Além desse comprimento, pode-se aplicar uma ventilação longitudinal até um comprimento de 3.000 m, particularmente para os túneis de tráfego unidirecional.

Outras estratégias são indicadas a seguir, como a utilização de uma ventilação semilongitudinal correspondente a uma ventilação longitudinal com extração ou insuflação maciça, graças à implantação de poços de ventilação. A ventilação transversal também é mencionada como estratégia com possibilidade de ser implantada.

a.3.2) Sistemas de evacuação

A principal prescrição a ser considerada nesse estágio do projeto para as linhas do metrô é:

- Haverá uma largura mínima de 60 cm na altura das portas dos trens, para a passarela lateral ao longo das vias.

b) Dados de entrada e hipóteses de estudos

Estão descritos a seguir os dados relevantes considerados no estudo para implantação do sistema de ventilação.

b.1) Descrição geral da seção subterrânea

A linha do metrô será composta de 16 estações subterrâneas, que são as seguintes:

- Estação Santa Regina
- Estação Terminal Pinheirinho;



- Estação Terminal Capão Raso;
- Estação Hospital do Trabalhador;
- Estação Terminal Portão;
- Estação Morretes;
- Estação Água Verde;
- Estação Bento Viana;
- Estação Oswaldo Cruz;
- Estação Eufrásio Correia;
- Estação Rua das Flores;
- Estação Passeio Público;
- Estação Juvevê;
- Estação Terminal Cabral;
- Estação Terminal Boa Vista;
- Estação Terminal Santa Cândida.

A seção subterrânea inicia-se por uma rampa situada entre a estação aérea CIC-Sul e a estação subterrânea Pinheirinho, e terminará numa parte posterior da estação em forma de rua sem saída, composta de uma área de manobras e de pátio depois da estação terminal de Santa Cândida. O comprimento total dessa seção subterrânea será de 19,75 km.

Os túneis serão monotubos de circulação bidirecional cavados com tuneladora. As estações serão dotadas de plataformas laterais de 110 m de comprimento.

b.2) Dados geométricos

Estão apresentados a seguir os dados geométricos do túnel e dos poços e galerias de ventilação.



b.2.2) Poços e galerias de ventilação e/ou de evacuação

O projeto básico baseado no traçado inicial traz uma estratégia de ventilação que leva à criação de poços intermediários em cada trecho entre estações. Esse projeto também menciona a norma NFPA 130 para a concepção dos poços de evacuação, que em princípio concluiria pela implantação de um ou vários poços de evacuação, quando o comprimento do trecho entre estações excede a 762 m.

Esses princípios de localização e de número de poços de ventilação e de evacuação serão reavaliados neste estudo.

b.3) Dados de entrada e hipóteses sobre o material rodante

Estão apresentados a seguir os principais dados coletados referentes ao material rodante.

b.3.1) Principais características do material rodante

As principais características do material rodante estão mencionadas no item 2.1.7 – Características Operacionais do Material Rodante.

b.3.2) Calor dissipado pelo material rodante

O material rodante constitui a principal fonte de calor dissipado no túnel. Esse calor é produzido pelos equipamentos de frenagem (freios mecânicos e resistências de descarga utilizadas em frenagem dinâmica), pelos equipamentos auxiliares de tração e pelo sistema de climatização embarcado dos trens.



A estimativa precisa do calor médio dissipado por um trem é relativamente complexa, visto que ela depende do material rodante, mas também da forma como esse é operado.

Entre os fatores que influenciam esse parâmetro, temos especialmente:

- O perfil de velocidade na linha, que leva, em alguns casos, a uma solicitação mais ou menos forte dos equipamentos de frenagem e, em outros, a otimizações da energia de tração e da frenagem daí resultante, dando notadamente a possibilidade de o material rodante circular com velocidade em determinados trechos da linha;
- A distância entre as estações, que leva a uma solicitação mais ou menos forte da tração e da frenagem;
- O sistema de energia de tração, que permite uma regeneração mais ou menos alta da energia cinética por ocasião da frenagem, devolvendo essa energia aos outros trens da linha;
- A regulação do sistema de climatização embarcado dos trens.

Simulações complexas que representam o sistema de tração com o material rodante permitem incluir todos esses parâmetros. Algumas primeiras simulações de tração são apresentadas no item 3.2.13 - Especificações Técnicas do Material Rodante.

Essas simulações levarão a uma energia dissipada da ordem de 88,33 Wh/ton.km, sem considerar a frenagem regenerativa, que tenderá a abaixar esse valor, nem a energia dissipada pelos sistemas auxiliares.

Segundo os primeiros estudos de operação, que mostram um tempo de percurso da ordem de 28 minutos para 20,3 km, essa energia corresponderá a uma potência média dissipada por trem ao longo de seu percurso da ordem de 1.112 kW para o sistema de tração.



A essa potência, portanto, será acrescentada aquela dissipada pelos equipamentos auxiliares. Corresponde principalmente à potência dissipada pelo sistema de climatização embarcado do trem. Segundo os desempenhos exigidos para esse sistema de climatização, essa potência é estimada em 340 kW por trem.

A potência média dissipada por um trem será, portanto, da ordem de 1.450 kW (fora frenagem regenerativa).

b.3.3) Potência de incêndio

A potência de incêndio considerada para o dimensionamento dos sistemas de exaustão no metrô dependerá ao mesmo tempo das propriedades de comportamento do material rodante ao fogo, mas também do risco residual que o empreendedor da obra e/ou o operador dos trens podem assumir.

De fato, poderão ocorrer incêndios de alta potência no metrô. Entretanto, em função das capacidades dos materiais de construção implicados no incêndio, a probabilidade de se chegar a essas altas potências poderá se tornar tão baixa que o risco se torna muito pequeno para justificar a consideração dessas altas potências no dimensionamento das instalações de exaustão.

b.3.3.1) Referências experimentais

Não há muitos dados disponíveis na literatura relativos às potências de incêndio em metrô. A maior parte provém do projeto Eureka-EU 499 Firetun. Trata-se de uma série de experimentações que foram realizadas nos anos 90 na Noruega.

As experiências nos vagões e nos veículos de metrô mostraram uma potência média compreendida entre 13 e 20 MW. Essa ampla faixa é explicada pelas diferentes propriedades dos trens testados.



Um dos ensaios Eureka foi realizado num trem de metrô com o interior de alumínio de 18 m de comprimento, 3 m de largura e 2,8 m de altura. Os resultados mostram uma potência de 35 MW após 10 minutos de incêndio. Após 20 minutos, a potência cai a 10 MW e decresce linearmente para uma potência de 1 a 2 MW durante as duas horas seguintes. Para esse ensaio, entretanto, trata-se de um quadro bem pessimista.

Outras referências são dadas no projeto Europeu FIT (Fire in Tunnels). Após uma análise de 210 referências de cenários de dimensionamento, o projeto recomenda utilizar valores compreendidos entre 12 e 47 MW.

b.3.3.2) Exemplos nos projetos realizados

O quadro, a seguir, apresenta alguns exemplos de potência de incêndio consideradas em alguns projetos conhecidos no mundo.

Potência de Incêndio de Referência em Projetos Realizados ou em Andamento

País	Projeto	Potência de Incêndio
Dinamarca	Copenhague	20 MW
Irã	Tabriz	10 MW
Índia	Chennai	10 MW
Índia	Bangalore	15 MW
Irlanda	Dublin	18 MW
Argélia	Argel	9 MW
França	Marselha	15 MW
Suíça	Lausanne	20 MW
Itália	Parma	10 MW

A faixa de valores está compreendida entre 9 e 20 MW e depende do material rodante e do nível de risco residual aceito.

b.3.3.3) Valor considerado



Nesse estágio do projeto, propõe-se considerar uma potência de incêndio correspondente àquelas frequentemente consideradas em outros empreendimentos em projetos similares, cujas características do material rodante, em termos de tamanho e de normas de concepção, são equivalentes às do projeto do Metrô de Curitiba.

Para o material rodante da Linha Azul (material novo, em fase de aquisição, que preverá as normas de concepção de incêndio recentes), propõe-se uma potência máxima de incêndio de 15 MW nesse estágio do estudo. Essa potência, ressalta-se, é da mesma ordem de grandeza da potência indicada na norma brasileira para um trem de metrô.

b.3.4) Temperatura admissível em funcionamento normal e congestionado

Para garantir o bom funcionamento dos equipamentos do trem, o ar ambiente não deverá ultrapassar determinados valores.

Em modo normal, o valor-limite considerado é geralmente fixado em 40°C, Entretanto, as estações da linha do Metrô não serão equipadas com portas de plataforma. Portanto, convém considerar em média uma temperatura inferior nos túneis, para limitar o impacto dos túneis no ambiente térmico na estação. Recomenda-se, portanto, uma temperatura máxima de 35°C.

Em modo congestionado (black-out), a temperatura do ar será notadamente compatível com o funcionamento dos equipamentos de climatização dos trens, de modo a garantir a continuidade do conforto dos usuários.



Particularmente, a temperatura-limite geralmente admitida pelas unidades de condensação está compreendida entre 45 e 50°C (temperatura local na entrada de ar das unidades de condensação). Isso geralmente leva a uma temperatura média do ar na seção do túnel que não exceda os 45°C.

b.4) Dados de entrada e hipóteses relativas à operação

Estão apresentados a seguir os principais dados coletados referentes à operação das composições.

b.4.1) Headways operacionais e sistema de sinalização

O headway operacional mínimo está fixado em 2 e 3 minutos. Essa hipótese é notadamente considerada para os estudos de riscos de incêndio, que permitem identificar a distância mínima que haverá entre dois trens consecutivos.

Entretanto, em modo normal, a consideração desse headway mínimo num dia inteiro levaria a níveis de calor dissipado num dia inteiro extremamente pessimista. É necessário, portanto, considerar a variação dos headways operacionais num dia típico de operação.

b.4.2) Cinemática dos trens

Conforme indica a norma NFPA 130, os sistemas de segurança contra incêndio terão a capacidade de proteger os usuários que não são impactados pelo sinistro no início do incêndio. A localização dos trens em função de sua cinemática e dos headways operacionais será, portanto, um elemento importante na concepção do sistema de exaustão.



Assim, os princípios funcionais da ventilação de exaustão foram desenvolvidos com base em estudos cinemáticos que consideraram as seguintes hipóteses:

- Velocidade limite no túnel:..... 80 km/h;
- Tempo de parada na estação:30 s;
- Aceleração normal:1,1 m/s²;
- Desaceleração normal:1,1 m/s².

Os cálculos cinemáticos também consideram uma margem de 10%, que especialmente propicia uma margem de operação para recuperar eventuais atrasos.

b.4.3) Alimentação elétrica

A alimentação elétrica destinada à energia de tração será realizada por catenária.

b.5) Dados climáticos e geotérmicos

Estão apresentados a seguir os dados climáticos e geotérmicos da região de implantação da linha do metrô.

b.5.1) Dados climáticos

Os estudos em modo normal considerará os dados climáticos da cidade de Curitiba apresentados no quadro a seguir:

Condições Climáticas da Cidade de Curitiba (°C)

Temperatura	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Máxima	26°	26°	25°	22°	20°	18°	18°	20°	20°	22°	23°	25°
Mínima	17°	17°	16°	14°	11°	8°	8°	9°	10°	12°	14°	16°



b.5.2) Dados geotérmicos

O terreno é composto principalmente de gnaiss e de migmatitos. As propriedades térmicas consideradas na avaliação das trocas térmicas entre o ar dos túneis e o terreno local são as seguintes:

- Concreto
 - Densidade (kg/m³) 2.400;
 - Condutividade térmica (W. K-1. m-1) 1,2;
 - Capacidade de calor (J. K-1. kg-1) 880.

- Gnaiss
 - Densidade (kg/m³) 2.700;
 - Condutividade térmica (W. K-1. m-1) 3,5;
 - Capacidade de calor (J. K-1. kg-1) 790.

c) Disposições relativas à evacuação

Estão descritos a seguir os principais aspectos considerados relativos à evacuação.

c.1) Quantificação dos poços de evacuação entre as estações

Conforme descrito anteriormente, a norma NFPA 130 é considerada norma de referência para a concepção dos sistemas de ventilação e de evacuação no túnel. Os túneis, portanto, será dotados de saídas de emergência, cuja distância máxima entre essas não excederá 762 m. Como as estações serão consideradas saídas de emergência em relação aos túneis, todo trecho entre as estações de comprimento inferior a 762 m não exigirá, portanto, a construção de saída no túnel.



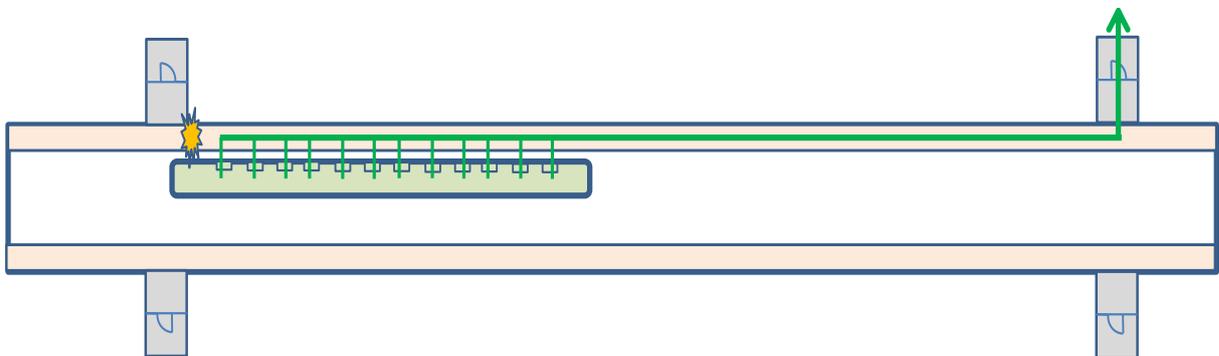
Em contrapartida, vários trechos entre estações serão superiores a essa distância no caso da linha do metrô. O presente estudo indica para cada trecho entre estações o número mínimo de poços de evacuação, apresentado no quadro a seguir, exigido segundo a norma NFPA 130.

Poços de Evacuação em cada Trecho entre Estações	
Estação CIC-Sul	1 Poço
Estação Terminal Pinheirinho	2 Poços
Estação Terminal Capão Raso	0 Poços
Estação Hospital do Trabalhador	0 Poços
Estação Terminal Portão	1 Poço
Estação Morretes	1 Poço
Estação Água Verde	1 Poço
Estação Bento Viana	0 Poços
Estação Oswaldo Cruz	0 Poços
Estação Eufrásio Correia	1 Poço
Estação Rua das Flores	1 Poço
Estação Passeio Público	1 Poço
Estação Juvevê	1 Poço
Estação Terminal Cabral	2 Poços
Estação Terminal Boa vista	2 Poços
Estação Terminal Santa Cândida	



c.2) Avaliação preliminar do tempo de evacuação

Foi feita uma primeira avaliação do tempo de evacuação para o caso mais crítico, que corresponde, por exemplo, a um incêndio na extremidade de um trem diante de uma saída de emergência, o que levará os usuários a se dirigirem a outra saídas situadas a 762 m.



Representação do cenário de evacuação considerado na avaliação (caso crítico)

Essa avaliação foi feita com base nas regras de cálculo da norma NFPA 130 para as vazões de evacuação e levando-se em conta os dados específicos dos projetos, isto é:

- Largura da passarela1 m;
- Número de usuários 955
(hipótese de que todos os usuários evacuem no mesmo sentido, ou seja, para a saída situada a 762 m e com uma densidade de 8 passageiros/m² no trem);
- Número e largura das portas do trem20 portas de 1,4 m de largura.

Considerou-se que a largura da porta da saída de emergência será igual à da passarela, ou seja, 1 m.

Também se considerou que a evacuação inicia-se 2 minutos após o início do evento, que corresponde ao tempo de reação dos operadores e usuários.

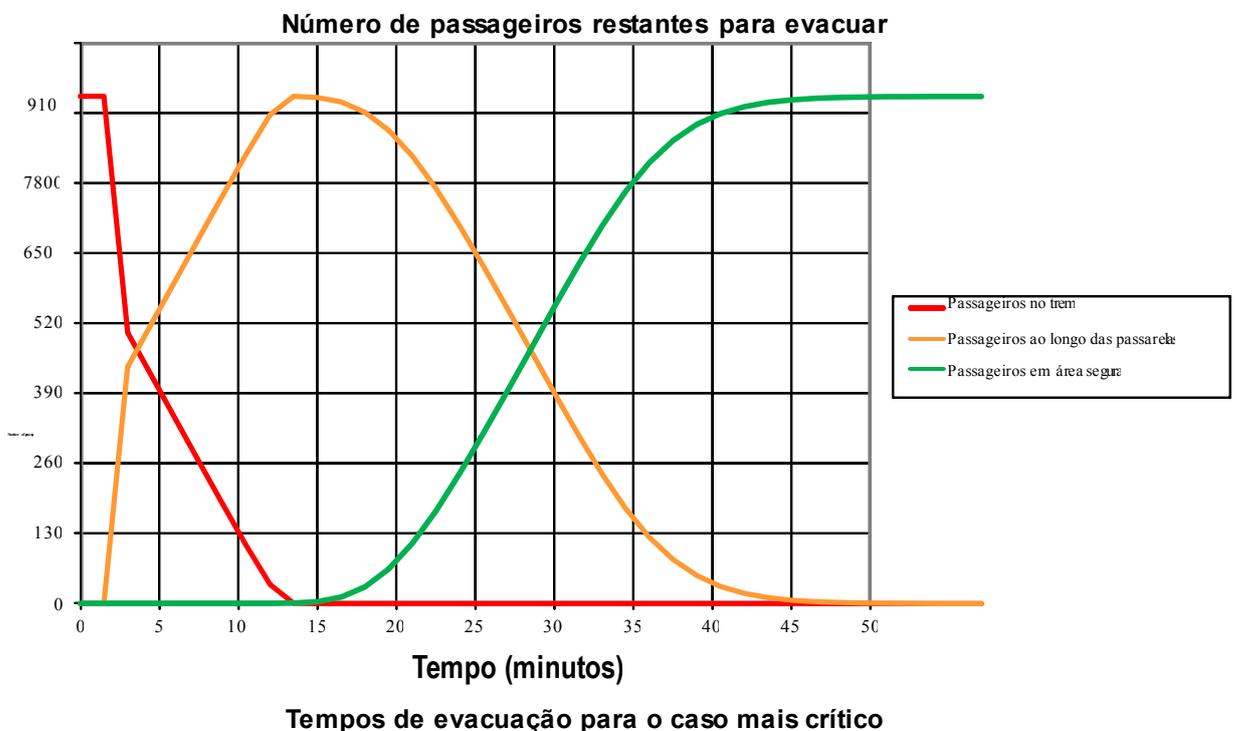


Os resultados estão apresentados na figura a seguir.

A evacuação total do trem durará cerca de 13 minutos. Esse tempo está ligado principalmente ao fenômeno de acúmulo de pessoas que poderá ocorrer na passarela ao longo do trem, no início da evacuação.

Os primeiros usuários atingirão a saída de emergência ao fim de 15 minutos, aproximadamente.

A evacuação total dos usuários para uma área segura durará entre 40 e 45 minutos, em razão principalmente da vazão de passagem reduzida ao longo da passarela, dada a largura limitada de 1 m e a grande distância entre o trem e a saída de emergência 762 m.





d) Disposições relativas à ventilação

Estão descritos, a seguir, os principais aspectos considerados relativos à ventilação.

d.1) Sistema de ventilação de exaustão

O sistema de ventilação de exaustão está estruturado conforme descrito nos itens seguintes.

d.1.1) Caracterização dos cenários de incêndio

Em princípio, o sistema de exaustão no metrô será concebido para atender cenários de incêndio que considerem a localização do trem atingido pelo incêndio, mas também a dos outros trens que poderiam ficar bloqueados por esse trem. Na verdade, um dos objetivos fundamentais da norma NFPA 130, é evitar que esses trens sejam impactados pelo incêndio.

Em outras palavras, o sistema de exaustão, para cada cenário identificado, será capaz de:

- Oferecer, na medida do possível, uma via de evacuação mais segura possível para possibilitar a evacuação de um número máximo de usuários do trem incendiado. No metrô, essa condição é frequentemente respeitada pelo emprego de uma ventilação longitudinal que permite empurrar todas as fumaças de um único lado do túnel e propiciar uma área isenta no trecho de túnel situado antes do incêndio em relação ao sentido de escoamento adotado pela ventilação;
- Impedir toda e qualquer propagação de fumaças para os outros trens que possam ficar bloqueados pelo trem incendiado e que não disponham de nenhuma outra forma de escape (ré, desvio), que possa ser adotada num prazo suficiente, antes que as fumaças os atinjam.



Essa caracterização dos cenários de incêndio, portanto, consiste principalmente em identificar o número de trens que potencialmente podem ficar bloqueados no trecho entre estações atingido pelo incêndio. Deve-se notar que a localização dos trens depende fortemente dos headways operacionais e da cinemática dos trens.

Essa localização também dependerá das restrições impostas pelo sistema de sinalização implementado, sabendo-se que essas deverão ser compatíveis com os headways operacionais mínimos desejados.

Foram realizados estudos cinemáticos para se evidenciar os tempos de percurso para cada trecho entre estações. Os resultados desse estudo são apresentados no quadro, a seguir, considerando-se uma margem de 10% nos cálculos cinemáticos. No quadro, estão apresentados, também, o número máximo de trens que estarão presente em cada trecho entre estações, em função do headway operacional mínimo considerado.

A duração máxima será de 178 s. Pode-se considerar, portanto, que os trens situados na via oposta à do trem incendiado sairão do trecho entre estações pois, durante os primeiros minutos do incêndio, os efeitos térmicos e as quantidades de produtos de combustão liberados serão baixos e compatíveis com uma circulação de trens nessa via oposta.

Esses resultados mostram que será possível, na maior parte dos casos, haver apenas um trem por trecho entre estações, o que é compatível com os headways operacionais estudados.

Entretanto, existirão alguns trechos entre estações em que dois trens estarão presentes para se cumprir o headway, particularmente quando esse cai para 2 minutos e 30 segundos ou 2 minutos. Isso supõe então que, em caso de incêndio, o



trem que, vem a seguir ficará bloqueado por um trem incendiado situado na mesma via.

Esses trechos entre as estações serão os seguintes:

- Para um headway de 2 minutos e 30 segundos
 - Pinheirinho/Capão Raso;
 - Cabral/Boa Vista (*);
 - Boa Vista/Santa Cândida.

- Para um headway de 2 minutos
 - Pinheirinho/Capão Raso;
 - Portão/Nova Estação (*);
 - Alto da Glória/Cabral (*);
 - Cabral/Boa Vista;
 - Boa Vista/Santa Cândida.

(*) Esses trechos entre estações não seriam contemplados se não se considerasse a margem de 10% adotada nos cálculos de cinemática.

Deve-se notar que o resultado apresentado para o trecho entre estações CIC-SUL/Pinheirinho, de 2 minutos, será relativizado, pois esse trecho apresenta uma grande seção elevada e em princípio na seção subterrânea de 980 m de comprimento é possível limitar a um o número de trens por via.



Tempo de Percurso e Número de Trens entre Estações para cada Via

Túneis		Tempo entre Estações (s)	Número de Trens entre Estações para cada Via		
			Headway 2 minutos	Headway 2,5 minutos	Headway 3 minutos
CIC - Sul	Pinheirinho	143	2	1	1
Pinheirinho	Capão Raso	178	2	2	1
Capão Raso	Hospital do Trabalhador	100	1	1	1
Hospital do Trabalhador	Portão	88	1	1	1
Portão	Nova Estação	122	2	1	1
Nova Estação	Água Verde	112	1	1	1
Água Verde	Bento Viana	107	1	1	1
Bento Viana	Oswaldo Cruz	89	1	1	1
Oswaldo Cruz	Eufrásio Correia	88	1	1	1
Eufrásio Correia	Rua das Flores	95	1	1	1
Rua das Flores	Passeio Público	103	1	1	1
Passeio Público	Alto da Glória	91	1	1	1
Alto da Glória	Cabral	127	2	1	1
Cabral	Boa Vista	151	2	2	1
Boa Vista	Santa Cândida	173	2	2	1

d.1.2) Principais critérios de escolha da ventilação de exaustão

Estão descritos, nos itens a seguir, os critérios de escolha da concepção da ventilação de exaustão.

d.1.2.1) Os grandes princípios de ventilação de exaustão em metrô

O sistema de ventilação de exaustão deverá ser capaz de criar uma corrente de ar longitudinal que permita empurrar as fumaças de um único lado do incêndio para abrir, na porção anterior ao incêndio, uma via de evacuação isenta para os usuários do trem incendiado. Essa corrente de ar deve ser superior à velocidade crítica, que depende da potência de incêndio de dimensionamento, da seção e da inclinação do túnel. Essa velocidade crítica está estimada em 2,5 m/s para uma potência de incêndio de 15 MW e para a maior inclinação indicada pelo perfil longitudinal da linha do metrô, que é de 4%.



O sistema de exaustão também deverá ser capaz de evitar toda e qualquer propagação de fumaças nas estações, pois essas são geralmente utilizadas como área de estacionamento dos outros trens. Conseqüentemente, será necessário proteger todos os usuários presentes ou que estejam sendo evacuados nas estações.

Essa condição, portanto, levará à necessidade de se implantar um ou vários poços de exaustão em cada trecho entre estações, para extrair as fumaças para o exterior.

Há três formas de soluções para esses poços de exaustão, quais sejam:

- Poços somente na extremidade das estações

Essa solução evita a construção de poços de ventilação intermediários. As centrais e poços de ventilação se concentram nas estações. A corrente de ar longitudinal é em parte garantida pela presença de um poço em regime de insuflação e o poço oposto em regime de extração (ventilação em “push-pull”).

Talvez também seja necessário instalar aceleradores no túnel como complemento dessa ventilação em regime de “push-pull”, para garantir a velocidade crítica na área incendiada. O poço de extração também serve para a extração das fumaças, com a finalidade de evitar que essa se propague na estação. Esse dispositivo tem a vantagem de ser reversível, o que permite especialmente escolher o sentido da dispersão das fumaças:

- Seja em função da localização do incêndio no trem (conforme a figura apresentada a seguir);





Princípio de ventilação com poço na extremidade das estações

- Seja em função da posição de outro trem que possa estar bloqueado pelo trem incendiado no trecho entre estações que possam conter dois trens. Para esse caso em questão, é possível, em contrapartida, que as fumaças sejam dispersadas num sentido que não seja o mais favorável para o trem incendiado (exemplo de incêndio na cauda do trem – conforme na figura apresentada a seguir). Nesse caso, convém analisar, portanto, as consequências nas condições de evacuação para os usuários desse trem.



Princípio de ventilação com poço na extremidade das estações (sentido de exaustão, em caso de existência de outro trem logo em seguida)

Para essa solução, também se deve dar atenção especial quando se faz a concepção da geometria dos poços e das vazões de extração para garantir que as fumaças não vão além do poço de extração, sob risco de se propagarem na estação adjacente.

- Poço intermediário

O poço de ventilação está situado no trecho entre estações. A corrente de ar longitudinal é formada por extração na altura do poço e geralmente por aceleradores presentes no túnel.

O poço de extração também serve para a extração das fumaças para o exterior, para evitar que essas se propaguem no trecho de túnel adjacente. Sendo assim,



essa solução permite dividir o trecho entre estações em duas seções de ventilação delimitadas pelo poço: uma seção incendiada e uma seção isenta.

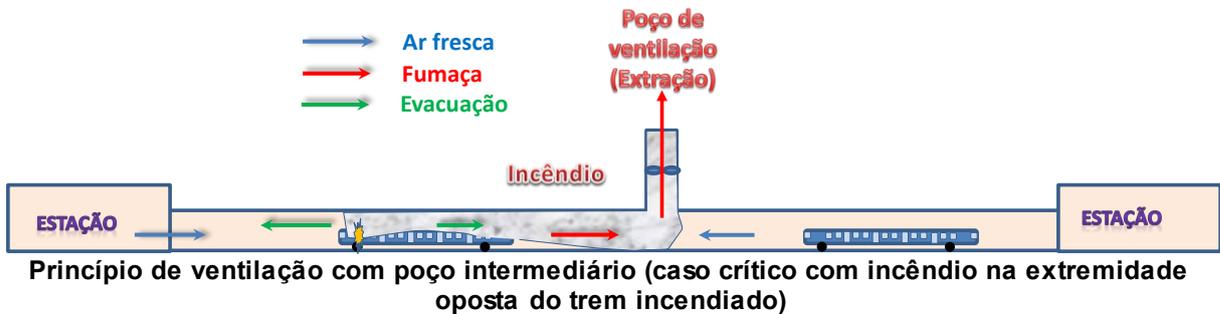
Ao se posicionar criteriosamente o poço de extração, é possível então proteger das fumaças do incêndio um eventual trem que venha em seguida. Isso será respeitado, no entanto, desde que no sistema de sinalização seja implantada uma função permanente que impeça a penetração do próximo trem na seção situada após o poço de ventilação intermediário enquanto essa seção não for liberada pelo primeiro trem (implantação de pelo menos duas seções de bloqueio de sinalização delimitadas pelo poço).

Na ausência de poço na extremidade da estação, as fumaças devem forçosamente ser dispersadas para o poço de extração para evitar que se propaguem na estação.

O sentido de exaustão é então imposto em cada seção, impedindo, assim, de haver uma ventilação reversível.

É possível que as fumaças sejam dispersadas num sentido que não seja o mais favorável para o trem incendiado (por exemplo: incêndio no trem situado em sua extremidade oposta em relação à posição do poço, conforme as figuras apresentadas a seguir). Nesse caso, convém analisar, portanto, as consequências nas condições de evacuação para os usuários desse trem.





- Poço na extremidade das estações com poço intermediário
Nesse caso, trata-se de combinar as duas primeiras soluções. Essa concepção oferece ao mesmo tempo a possibilidade de dividir o trecho entre estações em duas seções de ventilação distintas e de escolher o sentido mais apropriado da dispersão das fumaças em função da localização do incêndio no trem incendiado, conforme figuras a seguir e isso qualquer que seja a seção em que se situe o incêndio.

Entretanto, as consequências em termos de obra civil não são negligenciáveis, em razão da grande quantidade de poços.





d.1.2.2) Análise relativa à possibilidade de inverter o sentido de dispersão das fumaças

A apresentação das diferentes soluções de exaustão mostra que a possibilidade ou não de inverter o sentido de dispersão das fumaças em função da posição do incêndio no trem incendiado é uma noção importante que convém considerar na escolha de concepção da instalação de ventilação.

De fato, essa possibilidade oferece condições favoráveis de segurança, mas com consequências na obra civil. Uma necessidade desse tipo deve ser analisada, portanto, especialmente ao se avaliar se é aceitável ou não, em termos de segurança, o risco induzido pelo sentido da dispersão das fumaças imposto em determinado caso.

Foi feita uma primeira análise sumária nesse estágio dos estudos da linha do metrô com base nas hipóteses atuais do projeto. Essa análise diz respeito a um incêndio localizado numa extremidade de trem cujo sentido de dispersão das fumaças se faz ao longo desse trem para evitar que as fumaças se propaguem para um trem que venha em seguida ou para uma estação adjacente.

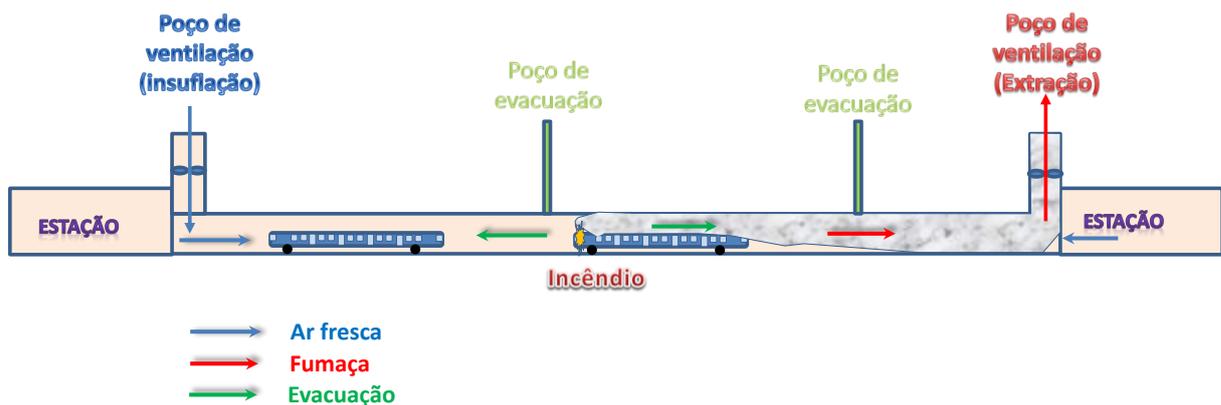
O caso estudado é apresentado na figura a seguir. O incêndio se localiza na cauda da primeira composição. A presença de um trem logo em seguida no túnel e a



ausência de um poço de ventilação intermediário impede o acionamento da dispersão das fumaças na direção da estação situada antes do incêndio.

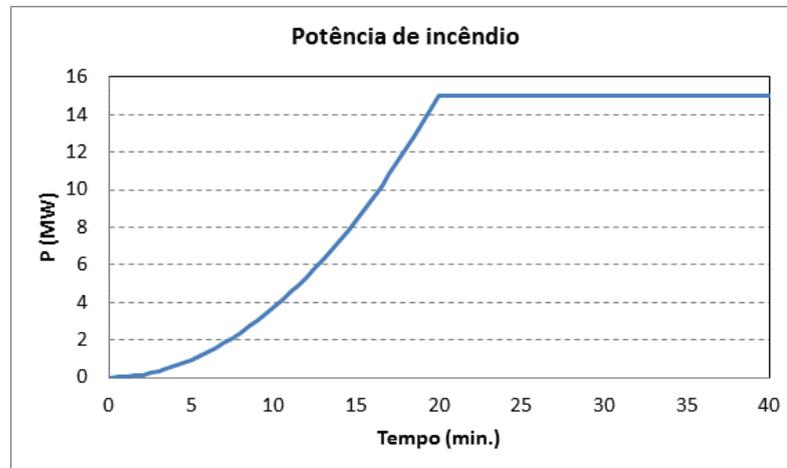
Em termos de evacuação, foi considerada a situação mais desfavorável. Assim, o incêndio está situado diante de uma saída de emergência.

Essa configuração, na verdade, obriga os usuários que não conseguem atravessar o incêndio a evacuar passando pela fumaça até a saída de emergência ou até a estação seguinte, cuja distância pode atingir 762 m.



Caso de estudo de risco ligado à não reversibilidade

Essa análise foi feita com base numa modelagem 1D do incêndio no túnel, com uma potência de incêndio de 15 MW (potência de dimensionamento) atingida ao fim de 20 minutos após o início do evento.



Evolução da potência de incêndio ao longo do tempo

A ventilação de exaustão é ativada 2 minutos após o início do incêndio e atinge seu regime nominal ao fim de 3 minutos. Assim, garante-se uma velocidade longitudinal de 2,5 m/s no túnel, e as fumaças são extraídas pelo poço de extração mais próximo em relação ao sentido de dispersão escolhido. No caso apresentado, trata-se do poço situado na extremidade da estação seguinte.

Embora a situação mais favorável seja evacuar os usuários no trecho de túnel situado na porção de ar fresco, a radiação térmica emitida pelas chamas pode rapidamente impedir os usuários de atravessar a seção incendiada para atingir esse trecho de túnel.

A simulação de evacuação considerada na análise corresponde, portanto, de forma desvantajosa, ao caso em que ninguém consiga atravessar o incêndio, obrigando todos os usuários a evacuar por entre as fumaças.

Os resultados dos cálculos de evacuação e de exaustão realizados com base num modelo simplificado 1D são apresentados na figura a seguir para a temperatura.



Esses resultados mostram que quase todos passageiros podem evacuar em condições de temperatura aceitáveis. A situação se torna um pouco mais crítica para os últimos passageiros.

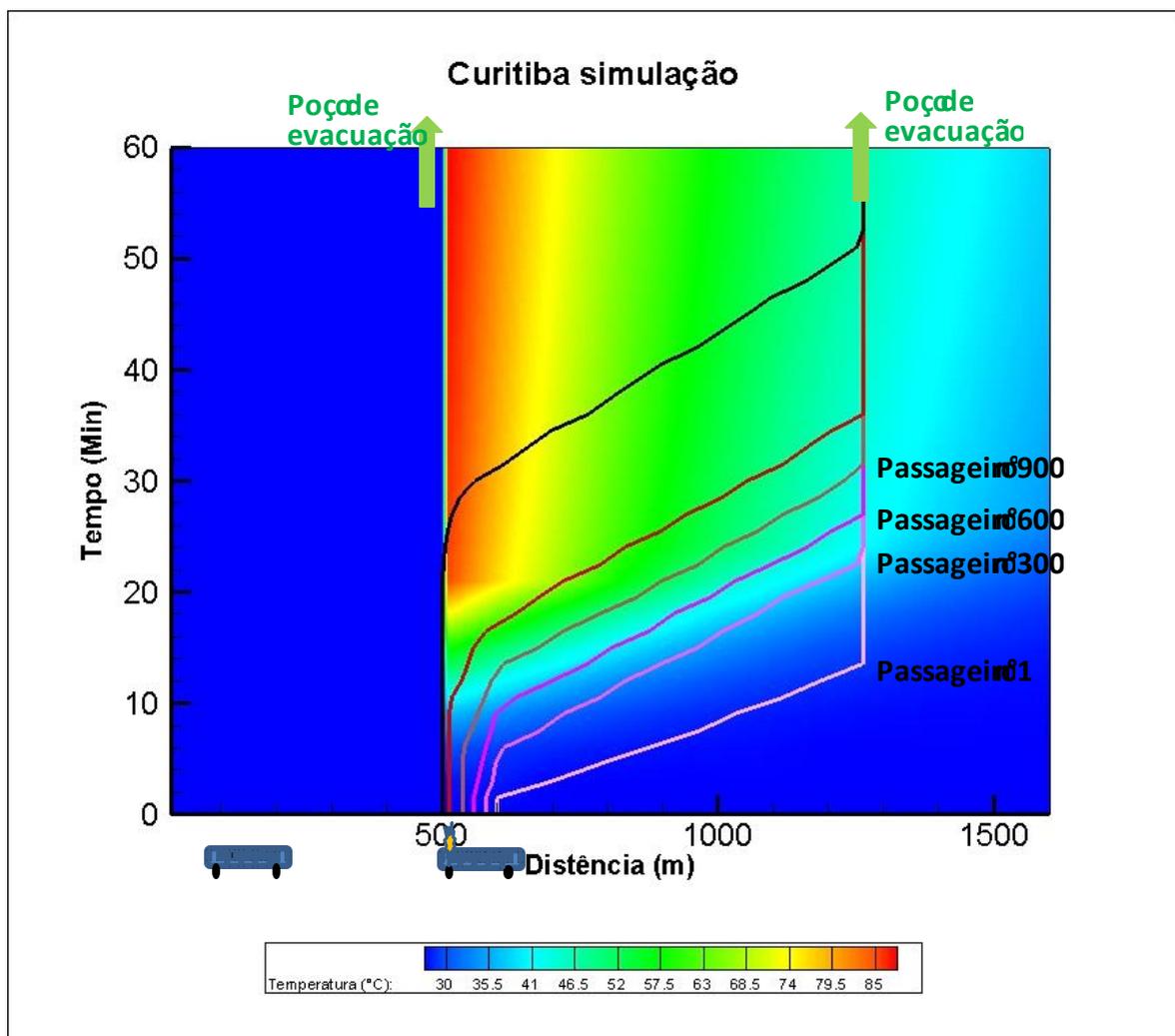
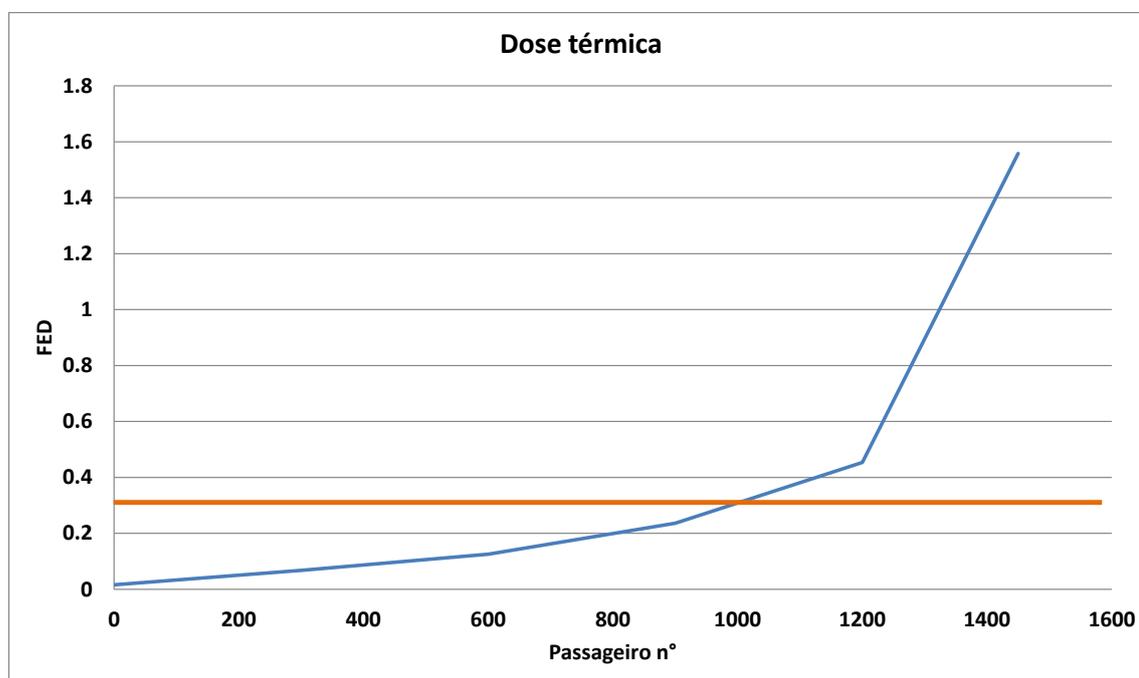


Diagrama espaço/tempo para a temperatura e a evacuação em caso de incêndio na cauda da composição

Para avaliar as consequências de maneira mais precisa, foram realizados cálculos de doses térmicas segundo as regras de cálculo da Norma NFPA 130 (Fractional Effective Dose). A título de indicação, uma dose térmica (FED) igual a 0,3 corresponde a atingir o limiar incapacitante para 11,4% da população. Um valor igual a 1 corresponde ao limiar de letalidade.



Os resultados da figura a seguir correspondem às doses térmicas armazenadas por cada passageiro, considerando-se que seus percursos lhes permitem atingir a saída de emergência. Esses resultados mostram que todos os usuários podem atingir a saída sem ultrapassar o limiar incapacitante de 0,3.



Dose térmica para cada usuário, considerando que eles atinjam a saída de emergência

Entretanto, esses resultados teóricos devem ser relativizados em razão dos limites desse estudo, que são os seguintes:

- Os usuários mais expostos termicamente são também os usuários que durante os primeiros minutos do evento teriam condições de atravessar o incêndio para chegar ao trecho do túnel situado na porção de ar fresco. A potência de incêndio é de fato muito fraca durante os 5 primeiros minutos (da ordem de 1 MW) e de acordo com uma primeira análise, as 300 pessoas mais próximas do incêndio (últimos veículos) poderiam evacuar na direção oposta para rapidamente chegar à porção de ar fresco. Isso não foi considerado na presente análise, pois são



justamente essas 300 pessoas que estão expostas aos ricos térmicos mais severos de mortalidade nos resultados apresentados anteriormente;

- A modelagem da exaustão é de tipo 1D. Não considera, portanto, os fenômenos de estratificação que podem ocorrer nas proximidades do incêndio. Ora, as doses térmicas são armazenadas em grande parte quando os usuários estão próximos do incêndio na presente análise. Um estudo mais aprofundado com modelos de tipo 3D certamente levaria a consequências menos graves;
- A modelagem da evacuação considera que todos os usuários fiquem nas passarelas laterais. Ora, deve-se esperar que um grande número de usuários desça até as vias, descongestionando a passarela, e reduza a duração total de evacuação;
- A localização do incêndio na extremidade do trem e diante de uma saída de emergência que se torna inacessível é uma situação realista, claro, mas cuja probabilidade é extremamente baixa;
- Ao fim de 30 minutos, pode-se esperar que os serviços de socorro já estejam em atividade e possam rapidamente inverter a exaustão após verificar que não há mais usuário na estação e no trecho de túnel situados antes do incêndio.

Enfim, é importante considerar a baixa probabilidade de se ter um grande incêndio na extremidade da composição.

Finalmente, com base nessas discussões, a incapacidade de inverter, em todos os casos discutidos, o sentido de dispersão das fumaças em função da localização do incêndio no trem incendiado poderia representar um nível de risco aceitável no caso da linha do metrô. O risco residual induzido por essa limitação deverá, em todos os casos, ser objeto de uma aprovação das autoridades competentes.



d.1.3) Princípio de ventilação de exaustão proposto nesse estágio

Na hipótese de se confirmar e validar a incapacidade de inversão do sentido de dispersão das fumaças em função da localização do incêndio no trem incendiado, o princípio de ventilação de exaustão mais apropriado no caso da linha do metrô seria a solução com um poço intermediário único em cada trecho entre estações. A solução tipo é apresentada na figura a seguir.



Essa solução apresenta as seguintes vantagens:

- A maior parte dos trechos entre estações, segundo as recomendações da norma NFPA 130, será dotada de poços de evacuação. É possível, portanto, utilizar alguns desses poços também como poços de ventilação, aumentando-se sua seção para que possam abrigar as centrais e os dutos de ventilação;
- O número de centrais e de poços de ventilação é geralmente menor que para a solução com poço em cada extremidade de estação em toda a linha;
- Esta solução permite tratar de forma simples a problemática da presença de um trem logo em seguida sem ter que se questionar sobre o sentido de dispersão das fumaças;
- A dispersão das fumaças no sentido de um poço na extremidade da estação está sempre sujeita a um risco de propagação dessas na estação adjacente onde pode haver muitos usuários. O fato de empurrar sistematicamente as fumaças para um poço situado no trecho entre estações reduz consideravelmente esse risco;



- As otimizações de vazão de extração são mais simples quando se faz a extração no poço;
- No caso de túneis monotubos de tráfego bidirecional, a presença de um poço de ventilação intermediário é mais adaptada à ventilação dos túneis em modo normal que um sistema de ventilação com poços somente na extremidade da estação.

As desvantagens, no entanto, poderão ser as seguintes:

- A linha dispõe de quatro trechos curtos entre estações, que não demandam a construção de poços de evacuação. Portanto, deveriam ser construídos poços especificamente para a ventilação desses túneis;
- Para os trechos entre estações mais curtos, cujos estudos cinemáticos mostraram que era possível haver um único trem no trecho entre estações, o nível de segurança trazido por essa solução poderia ser mais baixo que um sistema de ventilação com poço na extremidade da estação. De fato, esse último oferece a possibilidade de sistematicamente se escolher o sentido de dispersão das fumaças em função da posição do incêndio no trem incendiado, tendo em vista a ausência de trens logo em seguida no trecho entre estações e a possibilidade de se extrair a fumaça em cada uma das extremidades das estações adjacentes. Segundo a análise apresentada no item anterior, o nível de segurança suplementar trazido por essa disposição poderia, no entanto, ser muito limitado;
- A potência elétrica necessária para o funcionamento dos ventiladores no poço pode:
 - Levar a altas dimensões e custos de cabos, se a subestação elétrica mais próxima estiver localizada na estação;
 - Demandar a construção de subestações elétricas nos poços (soluções recomendadas, consideradas as potências previsíveis de 700 a 1.200 kW em função da geometria do poço). Nesse caso, os poços devem ser dimensionados para abrigar as salas técnicas correspondentes.



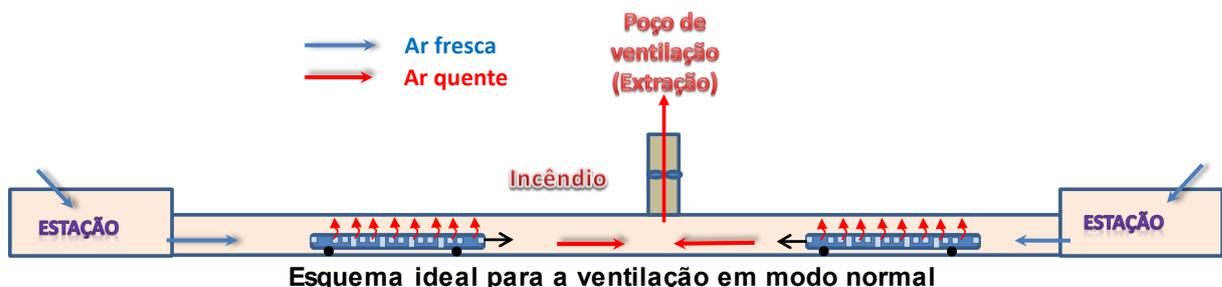
d.2) Sistema de ventilação em modo normal

No caso dos túneis monotubos de tráfego bidirecional, os efeitos pistão induzidos pelos trens tendem em geral a se compensarem entre as duas vias de circulação. Nesse caso, portanto, é geralmente difícil contar com uma ventilação baseada em poços de descompressão sem ventilação mecânica cujas exalações de ar fresco e resíduos de ar quente seriam produzidos somente pela circulação dos trens.

Deve-se então instalar um ventilador mecânico para fazer a ventilação desses túneis em modo normal, cujo objetivo principal é manter condições de temperatura compatíveis com o funcionamento do material rodante.

O esquema de ventilação mais apropriado nesse caso é aquele baseado numa ventilação por extração num poço intermediário. Essa configuração permite colocar todo o túnel em depressão. O ar fresco chega às estações, e o ar quente produzido pelo calor dissipado pelo material rodante é totalmente drenado para esse poço intermediário.

Essa solução permite então limitar a propagação do ar quente produzido no túnel para as estações adjacentes e reduzir, assim, o impacto dos túneis no conforto térmico na estação. Tal solução também é compatível com o sistema de ventilação de exaustão proposto nesse estágio dos estudos.





Deve-se notar que depois deverão ser realizados estudos térmicos com a finalidade de fazer uma avaliação correta das vazões de ventilação necessárias para cumprir os objetivos de temperatura.

e) Exemplos de poços de evacuação/ventilação

Nesse estágio do projeto, a solução proposta para este estudo reside principalmente na construção de poços nos trechos entre as estações, com dupla funcionalidade evacuação/ventilação, para a maior parte deles.

Segundo os dados e hipóteses atuais do projeto, a vazão de ventilação exigida em regime de exaustão (vazão dimensionante) seria da ordem de 250 m³/s em cada poço.

As figuras, a seguir, trazem alguns exemplos de poços de evacuação/ventilação em projetos similares.



Prefeitura Municipal de Curitiba

Secretaria Municipal de
Planejamento e Administração

Rua Solimões, 160
Fone: 3350-9022
80.510.140
São Francisco
Curitiba - PR
www.curitiba.pr.gov.br



