

Fluxo de ar e elevadores

Principais informações referentes a um estudo sobre o fluxo de ar realizado para avaliar o risco relativo de exposição à COVID-19 nos passageiros em um elevador

OTIS

Sumário executivo

Os elevadores possuem um papel essencial na mobilidade das pessoas em todo o mundo, todos os dias. No entanto, a pandemia global de COVID-19 gerou algumas preocupações em torno do risco relativo de infecção em espaços compartilhados, incluindo elevadores. No início da pandemia, publicações leigas e científicas começaram a levantar questões sobre as viagens de elevador, com base no entendimento de que a transmissão pelo ar é um meio crítico de propagação da doença e, ao menos em parte, na percepção equivocada de que as cabinas dos elevadores são espaços vedados, com fluxo de ar limitado.

Na verdade, elevadores são espaços bem ventilados. Regulamentos determinam que os elevadores tenham aberturas para ventilação. Juntamente com os ventiladores frequentemente presentes nos elevadores, essas aberturas proporcionam um alto nível de troca de ar.

O tempo de exposição ao ar e a outras pessoas em um elevador também é limitado em razão da breve duração da viagem de elevador – menos de dois minutos em média para os edifícios mais altos e cerca de 30 segundos para muitas viagens. Embora essa informação e uma análise simples sugiram que a transmissão aérea de aerossóis e partículas em elevadores seja muito menor se comparada a vários outros espaços comuns, isso não leva em conta a dinâmica de situações específicas, como fluxo de passageiros, taxas de ventilação, tamanhos de cabina e estratégias de prevenção, incluindo máscaras e purificação do ar.

Cada cenário entre as viagens de elevador é diferente, com diversas variáveis que são importantes para a movimentação de pessoas, do ar e dos elevadores. Para compreender o impacto dessas dinâmicas e apresentar aos nossos clientes e aos usuários de elevadores informações e soluções baseadas na ciência, a Otis encomendou um estudo de três meses sobre o fluxo de ar em elevadores. O estudo se concentrou em entender o risco relativo de exposição à COVID-19 em elevadores. Nossa proposta é responder a perguntas relacionadas ao modo com o qual as estratégias de prevenção afetam o uso de elevadores em comparação com outras situações comuns. Mais especificamente, a equipe de pesquisa realizou esse estudo para:

- Avaliar o risco de transmissão de partículas suspensas no ar infectadas com SARS-CoV-2 (o vírus que causa a COVID-19) ao viajar de elevador
- Estudar diferentes parâmetros no projeto de elevadores – incluindo a velocidade do ventilador – que podem ter um grande impacto no risco de exposição
- Identificar o impacto das estratégias e métodos de prevenção
- Comparar o risco de exposição de um elevador com outros espaços fechados, como um escritório ou ônibus urbano



A pesquisa foi liderada pelo Dr. Qingyan (Yan) Chen, Professor de Engenharia Mecânica da James G. Dwyer, na Universidade de Purdue, amplamente reconhecido por sua pesquisa sobre a propagação de doenças infecciosas

através de sistemas internos de ar e formas de prevenção. Dr. Chen e sua equipe trabalharam em conjunto com a equipe da Otis.

A pesquisa utilizou modelagem multizonas de última geração para simular o fluxo de ar entre zonas da estrutura externa de um edifício e fluidodinâmica computacional para simular a dispersão de partículas em uma viagem de elevador com duração de dois minutos, comparado ao tempo em outros espaços comuns.

Para a viagem de elevador, modelamos diversos cenários, incluindo a dispersão de partículas quando as portas se abrem, e os passageiros entram e saem do elevador.

Considerando o que já sabemos sobre o projeto e a operação de elevadores, os resultados do estudo demonstram que viajar de elevador é uma atividade de risco relativamente baixo. A pesquisa indicou que quanto mais elevado o nível de troca

de ar, como o que é fornecido pelos ventiladores de elevador de maior vazão, menor é o risco de exposição. Ao considerar os riscos relativos entre atividades comuns em ambientes fechados, o estudo descobriu que a viagem de elevador equivale a um curto período de tempo em um escritório ou ônibus. No entanto, quando consideramos a permanência média mais prolongada ônibus ou escritórios, em relação a uma viagem de elevador, vemos um risco de exposição relativa consideravelmente menor em um elevador.

Além disso, ficou demonstrado que estratégias de mitigação reduzem ainda mais o risco. O uso adequado da máscara reduziu o risco potencial pela metade, a purificação do ar por meio da tecnologia NPBI (Needlepoint Bipolar Ionization) diminuiu o risco em 20-30% e as duas estratégias combinadas resultaram em 60-65% de redução na exposição relativa.* Embora os cálculos em si não mudem, os resultados variam de acordo com o tempo de viagem e das posições dos passageiros no elevador.

Este estudo e seus resultados são apenas parte do compromisso da Otis em manter os passageiros de elevadores bem informados durante a pandemia de COVID-19 e também no futuro.

Continuamos a apresentar orientações de comportamento e soluções tecnológicas multifacetadas a nossos clientes, nos dedicando à busca de mais pesquisas para aprimorar nossa compreensão coletiva do risco.

O uso adequado da máscara reduziu a exposição potencial pela metade, a purificação do ar por meio da tecnologia NPBI (Needlepoint Bipolar Ionization) diminuiu o risco em 20-30% e as duas estratégias combinadas resultaram em 60-65% de redução no risco.*

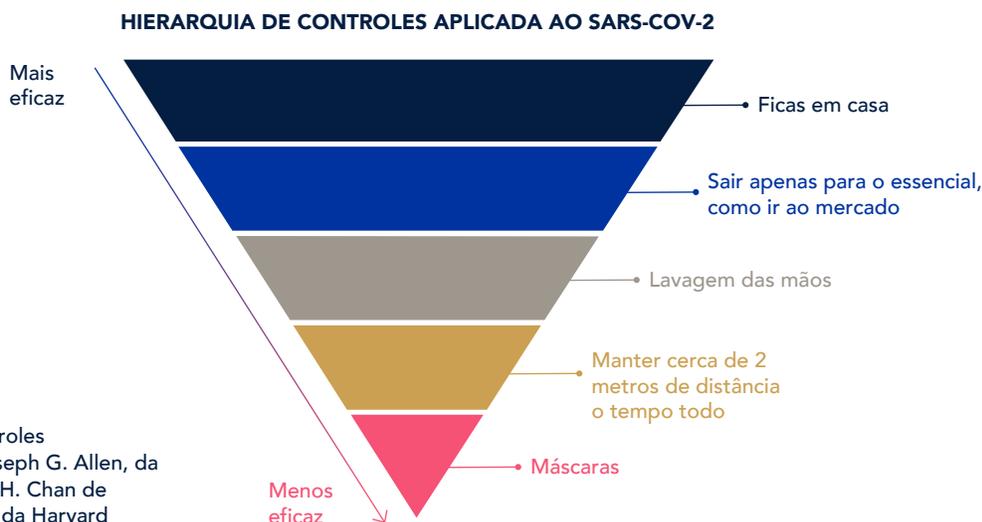
Para detalhes sobre a comparação e mais informações, consulte a página 16

Avaliação de risco e do novo coronavírus

Enquanto o mundo segue enfrentando a pandemia de COVID-19 e as sociedades buscam formas de retomar aspectos do cotidiano, especialistas de todas as áreas reconhecem que não há uma solução definitiva. É preciso uma abordagem voltada para o risco e fundamentada em ciência para recomendar medidas de controle adequadas para cada situação (Defile, 2020). O nível de risco varia de acordo com a **intensidade, frequência e duração da exposição**. Assim, o nível de exposição por via aérea ou contato físico pode ser diferente para cada aplicação. Não é possível comparar com facilidade todas as aplicações sem fazer uso de uma combinação de técnicas e áreas diferentes.



Por meio de uma abordagem com base em risco, somos capazes de determinar e priorizar elementos de uma estratégia multifacetada, que engloba recomendações de comportamento e soluções tecnológicas com níveis variados de eficácia e interferência.



Adaptado da estrutura de controles originalmente proposta por Joseph G. Allen, da Faculdade de Saúde Pública T. H. Chan de Harvard, e John D. Macomber, da Harvard Business School

Estes princípios gerais são aplicáveis aos elevadores. Ao abordar as preocupações associadas ao risco relativo de exposição em elevadores, é preciso equilibrar diversos fatores e cenários, a fim de obter resultados e soluções positivas para nossos clientes e passageiros. Devemos considerar a dinâmica do elevador, do ambiente do edifício e também do comportamento das pessoas. É essencial compreender o risco relativo e saber como integrar diferentes métodos e soluções de controle.

Comportamento



Distanciamento físico e orientação



Trabalho virtual e remoto

Tecnologia



Tecnologia sem contato



Comunicado aos passageiros



Saneamento e higiene



Monitoramento e rastreamento

Analisando as respostas à atual pandemia, estas soluções concentram-se em quatro principais áreas:

- Movimentação de pessoas e elevadores
- Orientação para uma viagem segura
- Mitigação da exposição ao risco
- Soluções tecnológicas avançadas

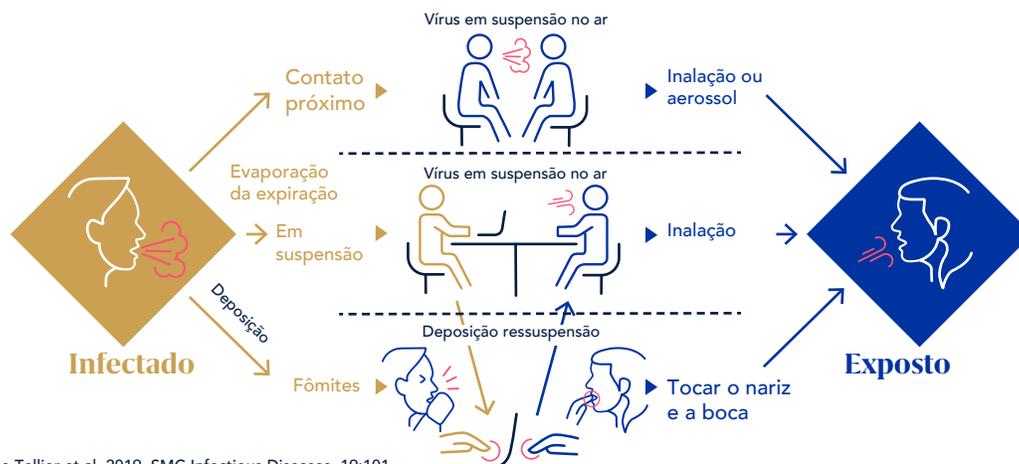
Considerações adicionais contemplam o movimento vertical do elevador, a abertura e o fechamento de portas e o movimento das pessoas que entram e saem do elevador, tudo com um volume de compartimento bem pequeno. Além disso, é preciso examinar esses fatores à luz do que a ciência nos diz sobre como a COVID-19 circula pelo ar.

ANÁLISE DA TRANSMISSÃO DA COVID-19

A Organização Mundial da Saúde (OMS), os Centros de Controle e Prevenção de Doenças (CDC) e outros especialistas alertam para diversas formas de transmissão para o novo coronavírus (SARS-CoV-2), causador da COVID-19.

A ciência e as evidências mais recentes parecem indicar que a transmissão por via aérea pode ser mais preocupante do que a transmissão por superfícies (OMS e Mandavilli, 2020).

Com a crescente ênfase na transmissão aérea, o foco na qualidade do ar interior e no fluxo de ar continua se intensificar.



Adaptado de Tellier et al. 2019. SMC Infectious Diseases, 19:101

A transmissão aérea, seja por meio de gotículas grandes ou pequenos aerossóis, depende do tamanho das partículas e da quantidade inalada. Diferentes quantidades de partículas são exaladas em situações distintas. A respiração espalha partículas menores do que as expelidas ao falar e em menor quantidade; a fala, por sua vez, pode espalhar partículas maiores do que a tosse. A quantidade de tempo utilizada para respirar, tossir ou falar é importante, assim como a distância e o tempo de permanência próximo a um indivíduo e o fluxo do ar, que indica como as partículas se movimentam no espaço. A intensidade da expiração, o tempo de permanência próximo a um indivíduo infectado e a frequência do contato podem contribuir para o risco relativo de propagação da infecção.*

Não se trata apenas da quantidade de partículas no ar, mas do impacto do seu deslocamento e se elas serão inaladas e depositadas nas partes superior ou inferior dos pulmões. Podemos modelar as partículas e o ar, mas também temos que considerar a dose acumulada relativa de partículas de um indivíduo em diferentes cenários. Não é o bastante estudar somente o fluxo de ar.

Entender a concentração e distribuição das partículas possivelmente infectadas de forma dinâmica, em momentos e situações diferentes, resulta em uma avaliação mais precisa do risco. Muitas análises rápidas podem avaliar o ar perfeitamente misturado, simplificando a situação. Contudo, analisar em conjunto o movimento do ar, das pessoas e do elevador nos fornece mais detalhes. Para uma análise completa, trabalhos adicionais podem incluir um estudo detalhado da transmissão por superfícies ou fômites.

Há várias formas de analisar a transmissão aérea e a propagação do vírus utilizando técnicas de medicina e saúde pública, engenharia, matemática e estatística, análise de redes e muitas outras áreas.

Tipo de expiração	Diâmetro da gotícula (µm)	Número de gotículas
Tosse	13.5	947-2085 partículas por tosse
Fala	16	112-6720 partículas ao falar (contagem 1 - 100)
Respiração	0.4	525 por respiração

Com base em Chao et al. 2008. Aerosol Science 40:122-133

*Um estudo recente mostrou que a concentração do vírus é diferente em partículas de tamanhos variados. Por exemplo, as concentrações de vírus normalmente são mais altas nas partículas finas geradas nos pulmões e na garganta, que podem ser expelidas pela tosse. Por outro lado, as partículas geradas pela fala são essencialmente compostas por saliva, que pode conter um teor menor de vírus.

Entendendo os elevadores

Ao examinar o risco relativo de exposição à COVID-19 em elevadores, a ciência que aborda transmissão aérea de partículas indica que o foco está no fluxo de ar. Apesar de relativamente pequenas, as cabinas de elevadores modernos são espaços bem ventilados, com sistemas que circulam o ar com frequência.



Regulamentos determinam que são **necessárias aberturas para ventilação em todos os elevadores**



O **tempo de exposição é mínimo** devido ao curto de viagem na cabina



Elevadores tem **alto nível de troca de ar, o que reduz os níveis de exposição**

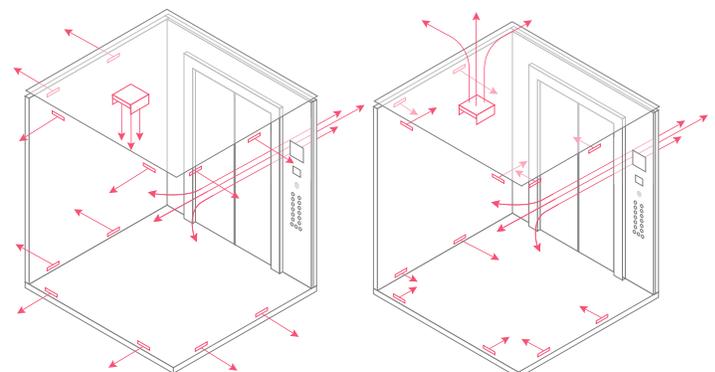
Os elevadores seguem normas rígidas de ventilação. Elas determinam que são necessárias aberturas para convecção natural, e a maioria dos elevadores conta com ventiladores ou pode ser facilmente adaptada para sua instalação. Os ventiladores nos elevadores geralmente são projetados para fornecer uma troca de ar por minuto – ou 60 trocas de ar por hora. As trocas de ar por hora (ACH) medem o volume de ar adicionado ou removido de um espaço ao longo de uma hora, dividido pelo volume do espaço. Valores mais altos correspondem a uma melhor ventilação.

Pelo código de elevadores norte-americano, as cabinas devem ter 3,5% da área da plataforma como aberturas de ventilação destinadas à convecção (American Society of Mechanical

Engineers, 2019). O código europeu EN81-1, aplicado em grande parte do mundo, exige 2,0% de ventilação, o que ainda representa uma abertura significativa, independentemente da configuração da cabina (British Standards Institution, 2014).

O SISTEMA DENTRO DO SISTEMA

Ao considerar uma viagem de elevador, levamos em conta o ar e o espaço disponível para o passageiro na própria cabina, a caixa por onde passa o elevador, bem como as outras áreas do edifício onde há movimentação de pessoas. As aberturas para o ventilador e ao redor das portas podem ser incluídas no cálculo. Elas funcionam como entradas e saídas para transferência convectiva do fluxo de ar passivo e auxiliam quando há ventilação mais ativa. Dependendo da complexidade do edifício, é preciso considerar fatores adicionais, incluindo pressurização, questões relativas à incêndios e sistemas de climatização mais sofisticados, bem como o movimento do ar entre o elevador e o saguão ou andares nas diferentes paradas.



Conf. de entradas

Conf. de exaustão

Visão geral do estudo

O conhecimento sobre os sistemas, ventilação e projeto dos elevadores, bem como sobre a natureza da COVID-19, sugere que o risco relativo de exposição nos elevadores é menor em comparação com muitos outros espaços comuns. No entanto, isso não leva em conta a dinâmica de situações específicas, incluindo o fluxo de passageiros, taxas de ventilação, tamanhos de cabina e estratégias de prevenção, como máscaras e purificação do ar.

Para entender o verdadeiro impacto dessa dinâmica, a Otis recrutou uma equipe da Universidade de Purdue para conduzir um estudo com o objetivo de entender a exposição relativa à COVID-19 em elevadores. O estudo se concentrou no fluxo de ar e investigou o impacto de taxas e tipos de ventilação, tecnologias de purificação e intervenções, incluindo o uso máscaras em elevadores.



Taxa de ventilação



Tipo de ventilação e a direção em que o ventilador sopra



Configuração da cabina, considerando os tamanhos de cabina mais populares com algumas variações



Impacto do uso adequado de máscaras



Impacto de tecnologias de purificação, especificamente, a NPBI (Needlepoint Bipolar Ionization)

INTRODUÇÃO À MODELAGEM DO FLUXO DE AR

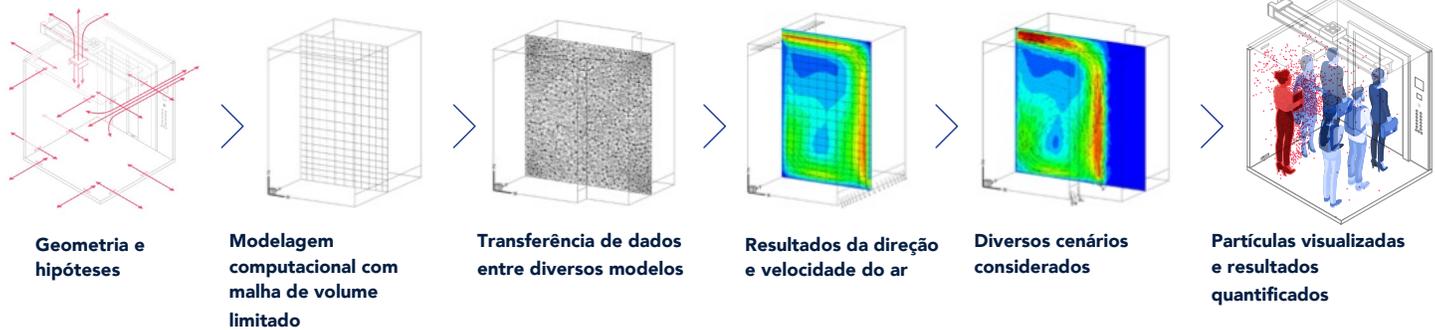
O fluxo de ar é algo complexo. Ele pode ser modelado em computador e com uma medição real do fluxo de ar em um experimento. Para estudar rapidamente diversos cenários e variáveis, a modelagem computacional é frequentemente recomendada. Os métodos de modelagem computacional e simulação numérica aplicados neste estudo estão na vanguarda dos mais recentes avanços científicos.

Para um único espaço fechado, a fluidodinâmica computacional (CFD) é a ferramenta mais poderosa de modelagem do ar e de contaminantes. A CFD tem sido amplamente utilizada por sua capacidade de

fornecer resultados informativos e precisos sobre o transporte transiente de partículas em ambientes fechados. Há duas etapas na modelagem CFD para o transporte de contaminantes: a modelagem do ar e de partículas.

Para obter informações sobre a distribuição do fluxo de ar, a CFD resolve numericamente um conjunto de equações diferenciais parciais de conservação da massa, momento (equações de Navier-Stokes), quantidades energia e turbulência.

O resultado inclui as distribuições de velocidade do ar, pressão, temperatura, parâmetros de turbulência e concentração de contaminantes.



Para simular melhor o ambiente do elevador, usamos um modelo multizonas, que é aplicado a diversas salas conectadas com aberturas, como portas, janelas e rachaduras. Os modelos multizonas também consideram que cada zona é um espaço bem misturado. Embora a hipótese de concentração uniforme de contaminantes do ar em uma zona não seja válida, ela é o bastante para simular o fluxo de ar por rachaduras entre a cabina do elevador e a caixa, e entre a caixa e os saguões. Isso porque as incertezas nesses grandes espaços são muito altas. O fluxo de ar por pequenas aberturas é mais importante do que a uniformidade na distribuição da concentração do vírus.

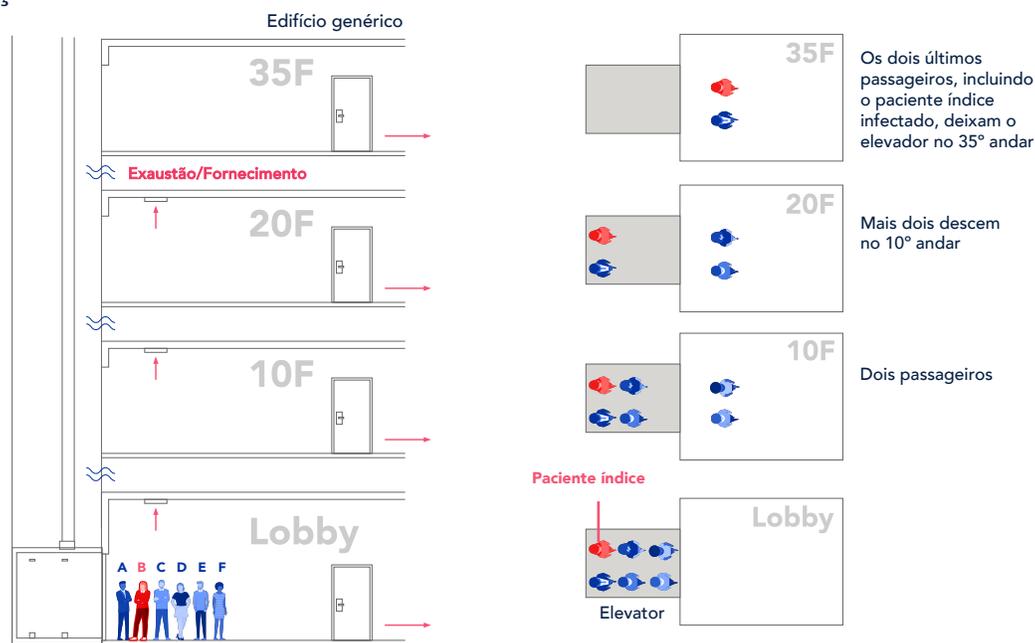
Os modelos de Navier-Stokes com média de Reynolds (RANS) são os modelos de CFD mais populares. Os modelos RANS solucionam as variáveis médias do ar, como velocidade e temperatura do ar, entre outros, e modelam as propriedades de turbulência ao resolver equações de transporte de turbulência. Para modelagem do fluxo de ar interior, Zhang et al. (2007) recomendou o modelo RNG $k-\epsilon$, após revisão e comparação com muitos modelos.

Este foi o modelo selecionado para o presente estudo.

Embora a pesquisa não inclua medições experimentais, a técnica de simulação numérica teve base em ferramentas validadas. Por exemplo, utilizamos o modelo Lagrangeano em CFD para simular a dispersão de partículas em uma sala limpa (Murakami et al., 1992). Também comparamos as distribuições das concentrações de partículas simuladas e medidas. Os resultados do cálculo Lagrangeano basearam-se em um tamanho de amostra (isto é, o número de trajetórias) de 100.000. Os resultados estão em razoável acordo com os dados de experimentos. O método Lagrangeano de rastreamento de partículas pode introduzir incerteza aos cálculos de concentração de partículas. Quando o número de partículas é baixo, a concentração de partículas prevista pode não ser estável devido aos fatores aleatórios usados no modelo. Isso pôde ser observado nos resultados obtidos neste projeto.

METODOLOGIA DO ESTUDO DE MODELAGEM

Usando a modelagem computacional multizonas e os métodos de simulação numérica descritos anteriormente, o estudo examinou o risco de exposição potencial, simulando diversas experiências de viagens de elevador. Para considerar todo o processo ao viajar de elevador, utilizamos o cenário de uma viagem de elevador em um edifício comercial de 35 andares. Entre os seis passageiros, dois saíram do elevador no 10º andar, outros dois desembarcaram no 20º andar e os outros dois no 35º. Um dos dois passageiros que saíram do elevador no 35º andar era um paciente índice, indicado pela cor vermelha no quadro abaixo. A viagem mais longa durou cerca de dois minutos. Esse edifício e viagem de elevador representativos nos permitiram isolar variáveis e determinar que os detalhes exatos relativos à velocidade ou trajeto do elevador não eram tão importantes quanto o tempo total em cada espaço.



Essa investigação usou o modelo multizonas, ContamW, para simular o fluxo de ar por rachaduras entre a cabina e caixa de corrida do elevador, bem como entre a caixa e os saguões. Os resultados da modelagem multizonas do fluxo de ar foram usados como parte das condições limite de termofluidos para simulações detalhadas da transmissão de partículas virais da COVID-19 na viagem de elevador. As simulações detalhadas utilizaram a técnica de CFD descrita, juntamente com o método Lagrangeano para dispersão de partículas.

As simulações de viagem de dois minutos foram subdivididas em oito casos, para considerar as mudanças nos domínios de fluxo durante a viagem. As distribuições de partículas e do fluxo de ar do caso acima foram usadas como condições iniciais para o caso atual, visando garantir uma transferência suave de dados e obter simulações precisas da transmissão de partículas na viagem de elevador. A CFD utilizada foram equações de Navier-Stokes com média de Reynolds, com modelo de turbulência RNG k-ε elaborado no software ANSYS Fluent. O ANSYS Fluent é um dos códigos CFD mais sofisticados disponíveis, muito utilizado para simulações computacionais avançada.

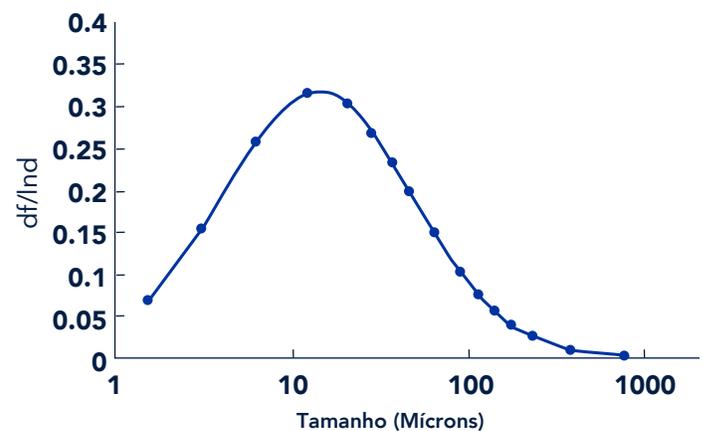
Essa investigação considerou principalmente as transmissões de partículas suspensas no ar geradas pela respiração do paciente índice. Cada ciclo respiratório durou quatro segundos e gerou 525 partículas com diâmetro médio de 0,4 µm. A pesquisa também estudou um caso de tosse, com o paciente índice tossindo uma vez ao entrar no elevador.

Também foi estudado o impacto de diferentes parâmetros de projeto do elevador na transmissão de partículas:

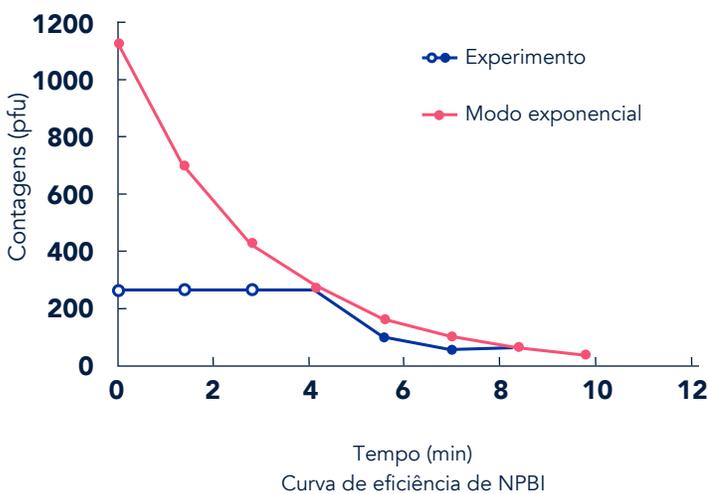
- Taxa de ventilação de 350 cfm, 150 cfm e 55 cfm e taxa de infiltração de 36 cfm
- Ar ventilado para dentro e para fora
- Cabina de elevador larga e cabina funda

Como o estudo utilizou o número ou a massa de partículas inaladas por passageiros expostos como critério de avaliação, não foi possível demonstrar o risco absoluto. Assim, comparamos o nível de exposição às partículas na viagem de elevador com os níveis em um escritório e um ônibus.

O estudo investigou fontes de partículas geradas por um paciente índice por meio da respiração e tosse. Para a respiração, a simulação numérica utilizou um diâmetro médio de partícula de 0,4 µm, com 525 partículas por ciclo respiratório. Cada ciclo respiratório durou quatro segundos. Para tosse, o estudo usou 16 tamanhos e quantidades de partículas diferentes, conforme indicado na figura a seguir (Chao et al., 2009). O número total de partículas por tosse foi de 1.951. Além disso, as condições limite de fluxo para respiração pelo nariz e tosse pela boca utilizadas foram de Gupta et al. (2011).



Distribuição do tamanho das partículas da tosse, retirado do estudo de Chao et al (2009)



MODELAGEM DA PURIFICAÇÃO DE AR

Para estimar a dose acumulada de partículas por cada pessoa exposta, a investigação desenvolveu uma função definida pelo usuário (UDF), com o objetivo de calcular as quantidades de partículas acumuladas por meio de equações para a massa de partículas acumuladas na zona de respiração de cada pessoa, resultantes da simulação de CFD. A zona de respiração era um espaço esférico centrado no nariz de cada indivíduo, com um raio de 0,2 metros.

Além da dose acumulada de partículas para vários cenários de passageiros e fluxo de ar, o estudo também utilizou modelagem para simular o impacto da tecnologia NPBI (Needlepoint Bipolar Ionization) como estratégia de purificação do ar. Uma UDF semelhante foi desenvolvida para modelar o efeito da purificação do ar.

Resultados do estudo

Os resultados do estudo demonstram que viajar de elevador é uma atividade de risco relativamente baixo. O alto nível de troca de ar no elevador reduz o risco de exposição, que equivale a um curto período de tempo em um escritório ou ônibus. Estratégias de prevenção, incluindo máscaras e purificação de ar pela tecnologia NPBI, evidenciaram uma redução adicional no risco.

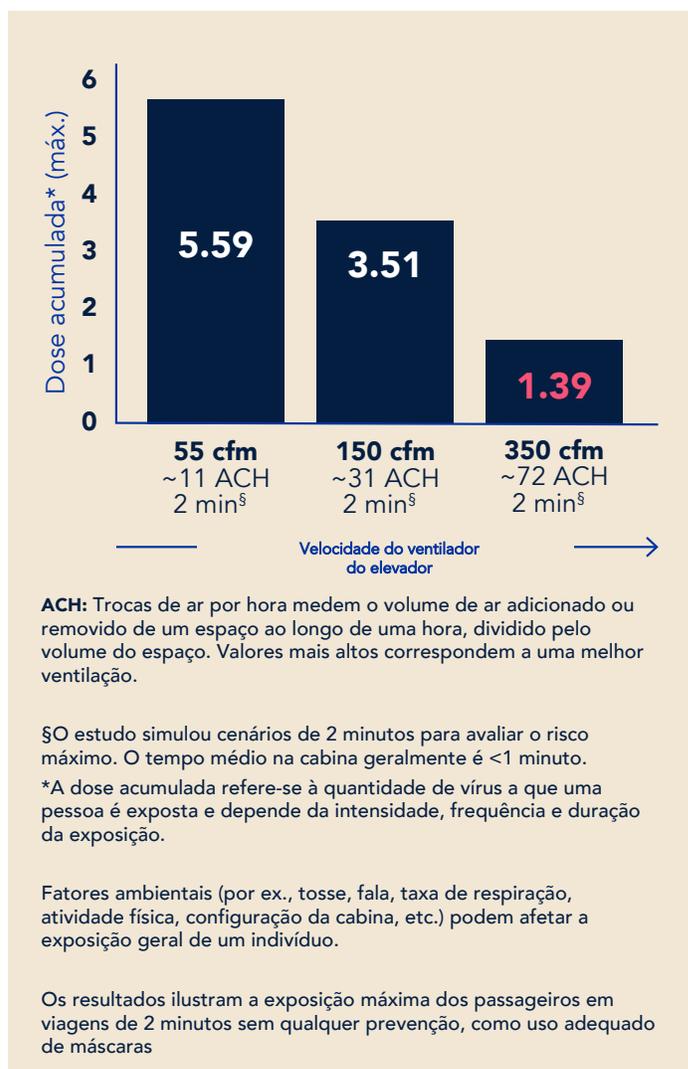
VENTILAÇÃO E EXPOSIÇÃO

Devido à curta duração da viagem, elevadores com altas taxas de ventilação apresentaram um risco de exposição menor. Embora a respiração gerasse partículas continuamente, estas tinham menor número e tamanho do que as partículas expelidas na tosse. A dose de massa de partículas acumuladas dos passageiros expostos para o caso da tosse pode ser até 6 ordens de grandeza maior do que para o caso da respiração.

Quanto mais alta for a taxa de ventilação, menor pode ser a dose acumulada. Mas isso nem sempre se confirma, já que em alguns casos distribuições não uniformes de partículas podem levar a uma dose mais alta, mesmo com uma taxa de ventilação mais alta. Uma cabina funda pode aprisionar partículas no interior do elevador. A direção do fornecimento de ar também teve impacto na dispersão das partículas na cabina do elevador.

A exposição às partículas no saguão do 1º andar foi baixa neste caso, porque a ventilação do sistema HVAC e as plumas térmicas dos passageiros causaram a dispersão das partículas. A movimentação dos passageiros também poderia arrastar algumas partículas.

As distribuições de partículas na cabina do elevador eram distintamente não uniformes. A pessoa posicionada à frente do paciente índice teve a maior exposição, e a pessoa que ficou ao lado do paciente índice teve a maior dose acumulada de partículas devido à exposição mais prolongada.



COMPARAÇÕES COM OUTRAS ATIVIDADES

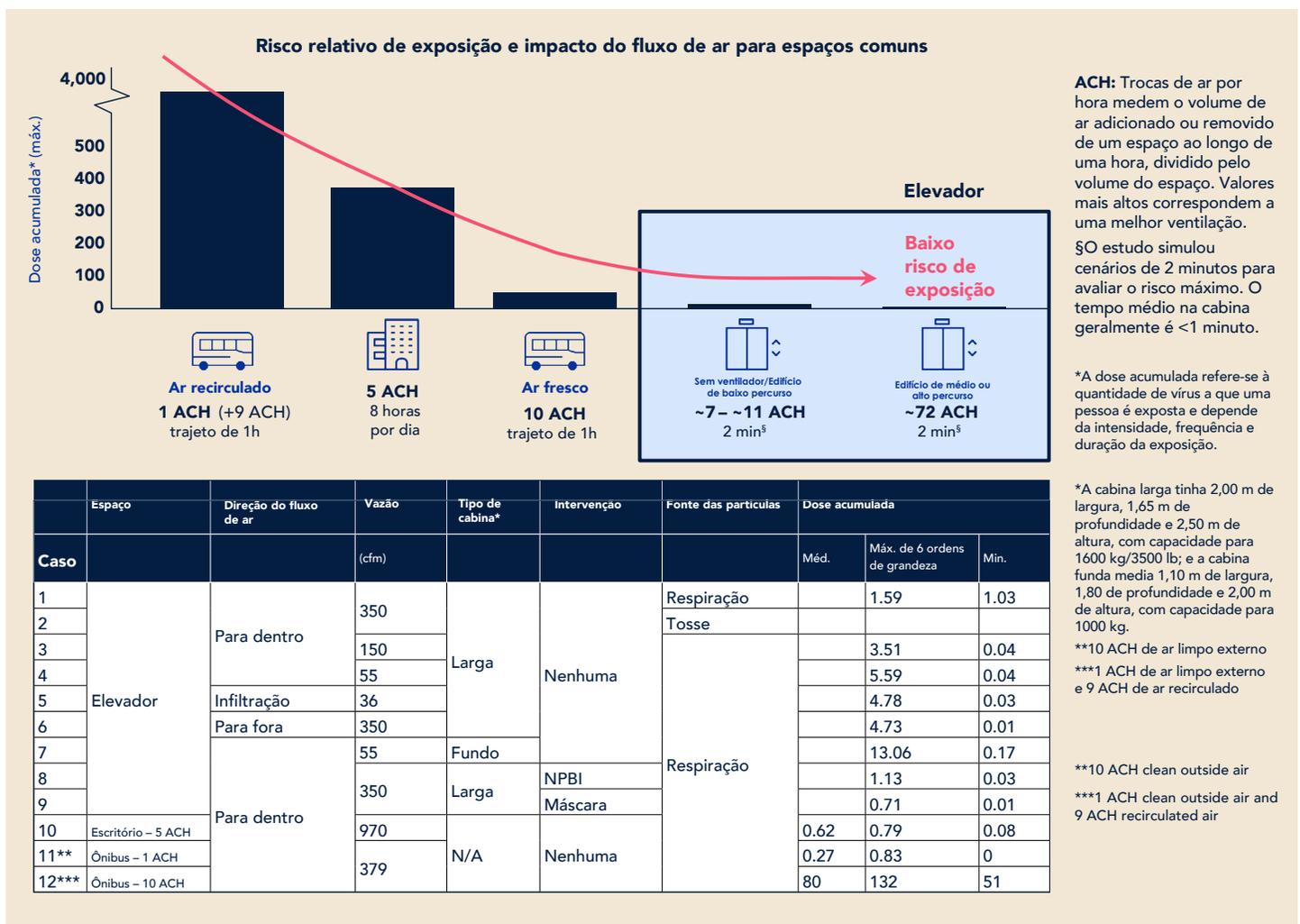
Para entender melhor a verdadeira natureza do risco em um elevador, o estudo comparou os resultados quantitativos de dose acumulada em cenários no elevador com os de outros espaços comuns e atividades associadas ao trabalho no escritório. Mais especificamente, examinamos um ônibus com níveis variados de qualidade do ar e um escritório. O foco da análise foi o risco associado ao fluxo de ar, tendo identificado a troca de ar como um fator essencial.

A dose acumulada de partículas em um elevador bem ventilado, com um fluxo de 350 cfm, foi equivalente a permanecer apenas quatro minutos em um escritório com fornecimento de ar limpo com 5 ACH.

Mesmo para um elevador mal ventilado, com fluxo de ar de 55 cfm, a dose durante a viagem foi a mesma obtida com uma permanência de 15 minutos no escritório.

O ônibus com 10 ACH de ar externo apresentou risco relativamente baixo, mas o ônibus com 90% de ar recirculado apresentou risco mais de 25 vezes superior ao do elevador.

Quando comparamos a duração dessas atividades, os elevadores tornam-se um risco significativamente menor. Como já foi observado, a viagem média de elevador dura menos de dois minutos. Uma jornada de oito horas em um escritório ou uma hora em um ônibus produziram doses acumuladas exponencialmente mais altas.



Além dos resultados quantitativos, as comparações qualitativas podem nos dar uma noção melhor do risco relativo de exposição ao andar de elevador. A tabela a seguir nos dá uma ideia geral da classificação do risco relativo de uma viagem de elevador com e sem medidas preventivas em um espectro de outras atividades. Vale notar, no entanto, que é difícil fazer comparações quantitativas com muitos cenários diferentes.

Mesmo em simulações controladas por computador, pode haver muitas variáveis, e tanto ambientes naturais quanto espaços construídos possuem muita variação, principalmente quando associados ao comportamento humano. O risco de jantar em um restaurante, por exemplo, varia de acordo com o número de pessoas presentes, a proximidade, o tempo de permanência no espaço e uma série de outros fatores. Da mesma forma, o risco associado a outras atividades em ambientes internos se estende pelo espectro, devido às variáveis relacionadas ao próprio ambiente e também ao comportamento de seus ocupantes.

Ainda assim, com o que aprendemos, podemos classificar os elevadores de modo geral em um risco relativo de exposição de baixo a médio, categoria normalmente segura, equivalente à estadia em um quarto de hotel ou um jantar ao ar livre, dependendo dos fatores já mencionados.



A variação de intensidade, frequência e duração da exposição contribuiu para a classificação das atividades em diferentes graus de exposição, ainda que dentro de uma mesma categoria.

Adaptado da estrutura originalmente proposta por Julie Marcus em Harvard e Eleanor Murray na Universidade de Boston

O risco de exposição em elevadores pode ser reduzido a partir do uso adequado de máscara, soluções de purificação de ar (como NPBI), distanciamento social, etc.

ESTRATÉGIAS DE MITIGAÇÃO

Embora os resultados do estudo demonstrem que elevadores estão entre os espaços internos com menor risco para a infecção por COVID-19, quaisquer métodos de mitigação devem ser considerados. Esta investigação considerou dois métodos de intervenção: uso de máscaras cirúrgicas e NPBI (Needlepoint Bipolar Ionization).

O estudo selecionou máscaras cirúrgicas como exemplo para analisar o impacto das máscaras na dose acumulada de pessoas expostas. Estabelecemos que a eficiência de filtração das partículas exaladas

pelo paciente índice foi a mesma das partículas inaladas pelos passageiros expostos. Esta investigação utilizou uma eficiência de filtração média de 33% para a máscara cirúrgica, de acordo com Bowen (2010). Os resultados indicam que se todos os passageiros usarem máscaras cirúrgicas, pode haver uma redução de até 50% na dose. O estudo considerou que o paciente índice tossiria uma vez ao entrar no elevador. Isso faria com que outros passageiros inalassem uma massa de partículas cerca de 6 ordens de magnitude maior do que se o paciente índice mantivesse a respiração contínua durante toda a viagem.

Diferentes cenários para pessoas usando máscara cirúrgica

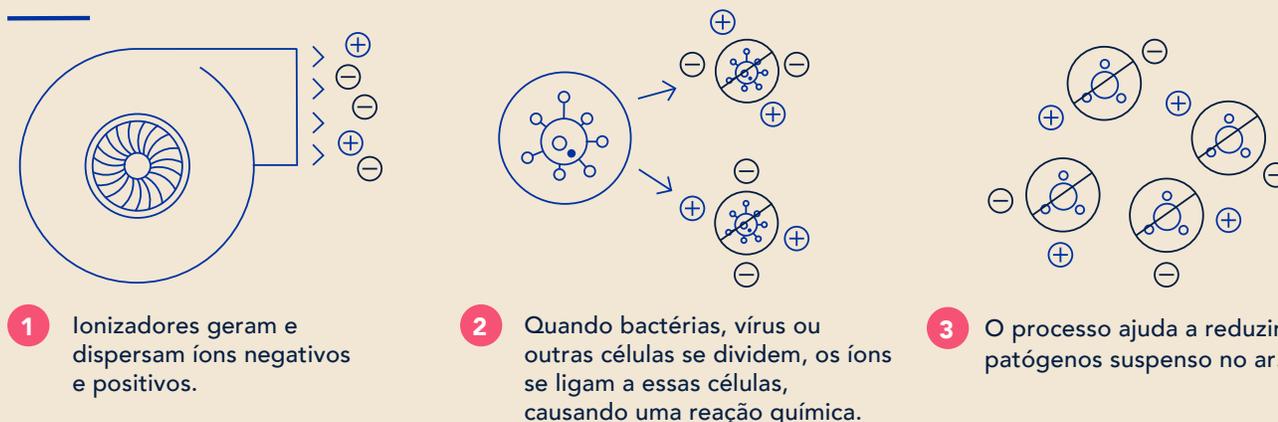
Diferentes cenários	Paciente índice A	Outras pessoas B, C, D, E, F
Cenário 1	 Sem máscara	 Sem máscara
Cenário 2	 Máscara cirúrgica	 Sem máscara
Cenário 3	 Sem máscara	 Máscara cirúrgica
Cenário 4	 Máscara cirúrgica	 Máscara cirúrgica

Doses acumuladas para diferentes cenários com uso de máscara

Eficiência de filtração	Outras pessoas B, C, D, E, F
  Cenário 1	0.0%
  Cenário 2	33.3%
  Cenário 3	33.3%
  Cenário 4	55.5%

Também examinamos o impacto do método NPBI (Needlepoint Bipolar Ionization) de purificação do ar da cabina. Essa tecnologia, empregada para melhorar a qualidade do ar e reduzir a intensidade da exposição, conta com anos de pesquisa e resultados de testes comprovando sua segurança e eficácia. O método emite partículas carregadas positiva e negativamente que se ligam e desativam substâncias nocivas, como bactérias, alérgenos, mofo, vírus, compostos orgânicos voláteis (COVs) e outras partículas (Essien, 2017 e Hagbom, 2015).

COMO FUNCIONA



Para mais detalhes sobre a tecnologia NPBI e outras soluções de purificação de ar, consulte nosso resumo técnico "Air purification in elevators today" – disponível em [otis.com](https://www.otis.com)

Essa reação química esgota a capacidade de atuação de vírus e bactérias, causando estresse oxidativo em seu interior, e leva à destruição física de sua camada externa, efetivamente inativando esses organismos. O material particulado pode ser removido ao se ligar aos íons do ar, o que faz com que fique ionizado e, por sua vez, atraia outras partículas carregadas, aumentando assim a taxa de sedimentação gravitacional (Kim, 2017).

Nossa modelagem indicou que o uso da NPBI reduz entre 20 a 30% a exposição ao risco, dependendo da duração da viagem e das posições dos passageiros no interior do elevador. Além disso, a NPBI associada ao uso adequado de máscaras por todos os passageiros resultou em uma redução de 60 a 65% no risco relativo.



Principais conclusões

Esta investigação usou uma combinação de CFD e modelo multizonas para estudar a transmissão de partículas de COVID-19 suspensas no ar ao viajar de elevador em um edifício comercial de 35 andares. A CFD simulou a dispersão das partículas suspensas no ar exaladas por um paciente índice por meio da respiração durante a viagem de elevador. O modelo multizonas foi utilizado para calcular o fluxo de ar entre os andares e a caixa do elevador e também o fluxo de ar que entra e sai do elevador por rachaduras e pequenas aberturas. O estudo calculou a dose acumulada dos passageiros expostos ao andar de elevador com o paciente índice em diferentes condições, como diferentes taxas de ventilação, métodos de fornecimento de ar, geometrias de cabina e métodos de intervenção.



As soluções de purificação reduzem **entre 20 a 30%** a exposição



O uso adequado da máscara por todos os passageiros associado à NPBI **pode reduzir entre 60 e 65%** a exposição relativa



Elevadores têm **alto nível de troca de ar**, o que **reduz os níveis de exposição**



Viajar de elevador **não representa um risco maior de exposição do que um curto período de tempo em um escritório ou ônibus**



O uso adequado da máscara **reduz em 50%** a exposição

Os métodos de intervenção analisados foram o uso de máscaras cirúrgicas pelos passageiros e o uso da tecnologia NPBI no elevador.

A investigação também estudou um caso em que um paciente índice tossiu uma única vez ao entrar no elevador. Para fins de comparação, também calculamos a dose acumulada para a permanência de oito horas em um escritório com suprimento de ar limpo de 5 ACH e uma viagem de uma hora em dois tipos de ônibus: um com fornecimento de ar limpo com 10 ACH e outro com fornecimento de ar com 10 ACH, sendo 90% do ar recirculado. O estudo produziu as seguintes conclusões:

- Devido à curta duração da viagem, elevadores com altas taxas de ventilação apresentaram risco baixo de exposição. Para o caso de referência, com uma taxa de ventilação de 350 cfm, a maior dose acumulada de partículas de uma pessoa exposta próxima ao paciente índice foi de 1,59.

- Devido à característica de distribuição não uniforme das partículas na cabina do elevador, a dose acumulada não foi inversamente proporcional à taxa de ventilação. A dose foi afetada pela posição dos passageiros em relação ao paciente índice. Também descobrimos que uma cabina funda poderia aprisionar as partículas no interior do elevador e que a direção do fornecimento de ar tem impacto na dispersão das partículas na cabina.

- A dose em um elevador bem ventilado, com fluxo de 350 cfm, foi equivalente a uma permanência de quatro minutos no escritório com fornecimento de ar limpo com 5 ACH. Mesmo para um elevador mal ventilado, com fluxo de ar de 55 cfm, a dose durante a viagem foi a mesma obtida com uma permanência de 15 minutos no escritório. O ônibus com 10 ACH de ar externo estava bem limpo, mas o ônibus com 90% de ar recirculado estava 25 vezes mais sujo que o elevador.
- Métodos de intervenção podem reduzir ainda mais a exposição. Por exemplo, o uso da tecnologia NPBI pode reduzir a exposição em mais 20 a 30%, dependendo do tempo de viagem e da posição do passageiro.
- Se todos os passageiros usarem máscaras cirúrgicas, pode haver uma redução de até 50% na dose. O estudo considerou que o paciente índice tossiria uma vez ao entrar no elevador. Isso faria com que outros passageiros inalassem uma massa de partículas cerca de 6 ordens de magnitude maior do que se o paciente índice mantivesse a respiração contínua durante toda a viagem.
- A NPBI associada ao uso adequado de máscaras por todos os passageiros pode reduzir ainda mais a exposição, em 60-65%.

LIMITAÇÕES

A investigação teve as seguintes limitações:

- Como era muito difícil fazer a simulação numérica de todo o processo, o estudo dividiu o processo em oito casos e transferiu os dados após a simulação de cada caso. Como a malha para cada caso não pode ser exatamente a mesma, alguns erros podem ter sido incluídos.
- Como precisávamos simular pessoas caminhando, o uso do formato real de uma pessoa exigiria recursos enormes de computação. Além disso, Nielson (2003) descobriu que não há grande diferença na transferência de calor e fluxo entre os formatos real e simplificado de pessoas. Portanto, o estudo usou uma coluna retangular para simular uma pessoa.
- Consideramos que o sistema de climatização no saguão do 1º andar forneceria ar fresco pelo teto e que o saguão era conectado a outros espaços. Por isso, as saídas de ar foram alocadas nas duas paredes de conexão. Para o caso específico que simulamos, todas as partículas do paciente índice se moveram para cima e depois para outros espaços. A exposição de todos os outros passageiros foi quase zero. Isso nem sempre reflete a realidade, mesmo que o tempo de espera de 30 segundos tenha sido relativamente longo. Não se deve negligenciar o impacto da exposição nos passageiros.
- Este estudo utilizou um cluster de computadores para realizar as simulações de CFD. Cada simulação usou dois nós com 24 núcleos de processador em cada nó, em CPUs Skylake a 2,60 GHz. A memória era de 96 GB por nó. Cada caso exigiu de cerca de 12 horas de computação em média. Isso significa que cada teste subdividido em oito casos precisou de quase 100 horas de computação. Foi um esforço computacional considerável.

OUTRAS ÁREAS DE ESTUDO

O projeto foi a primeira fase do estudo sobre elevadores iniciado pela Otis. Após mais de três meses de investigação por dois pós-doutores, este projeto atingiu seus objetivos. Contudo, a equipe de pesquisa e o comitê de revisão ad hoc recomendaram um estudo mais aprofundado nas áreas a seguir, em um futuro próximo.

- Validar dos resultados da simulação é fundamental. No entanto, em razão da curta duração deste projeto, realizamos apenas simulações numéricas para as distribuições de partículas com base em nossa experiência prévia. É preciso fazer a validação experimental dos resultados numéricos.
- A investigação considerou dois métodos de intervenção: Desinfecção por NPBI e o uso de máscaras. Outros métodos como oxidação fotocatalítica, desinfecção ultravioleta, filtros HEPA, etc., devem ser examinados.
- Este estudo considerou apenas o cenário com respiração e tosse. Mas o diâmetro geométrico, o tamanho e a quantidade de partículas geradas ao respirar, tossir, falar e espirrar são diferentes. A massa de partículas grandes projetadas ao falar, tossir e espirrar pode ser maior do que a da respiração em várias ordens de grandeza. É importante melhorar o desenho do caso de referência, para que seja possível determinar as doses acumuladas de massa. Trabalhando com epidemiologistas e toxicologistas, seria possível determinar uma probabilidade de risco de infecção mais definitiva.
- Este projeto concentrou-se principalmente em partículas suspensas no ar, identificadas pela OMS, CDC e outros especialistas como a causa mais provável do risco de infecção. Entretanto, há outros possíveis meios de transmissão que não modelamos no estudo.

Por exemplo, como os espaços dos elevadores são muito pequenos, gotículas grandes podem se espalhar para a zona de respiração por meio de contato direto ou serem projetadas por um impulso. Esse ponto requer estudos adicionais.

- É essencial considerar o impacto de diferentes distanciamentos sociais, principalmente o lado para o qual os passageiros estão voltados, em diferentes capacidades de carga. O estudo constatou a importância das posições nas cabinas normal e funda.
- Além disso, não se deve negligenciar o contato com fômites nos elevadores. Nossas simulações podem determinar a deposição de partículas em diferentes superfícies, como teclados numéricos e corrimãos de elevadores. É preciso estudar se a deposição de partículas seria uma preocupação em relação à transmissão por contatos com fômites.
- Nosso estudo considerou uma cabina de elevador em condições limpas. Em elevadores usados com frequência, a cabina pode conter o vírus da COVID-19. Seria oportuno estudar se as cabinas devem ser desinfetadas antes do próximo serviço e quanto tempo leva para ventilar a cabina em condições aceitáveis.
- O estudo atual considerou tempos padrão de fechamento/abertura das portas. São necessários estudos adicionais sobre a troca de ar quando as portas se abrem, incluindo o tempo de abertura. Estes estudos podem incluir o impacto de pequenas diferenças de pressão entre a cabina e a área de parada, em comparação com o arrasto causado pelos passageiros. Também seria possível examinar se é melhor fazer um trajeto direto até o destino (menos tempo) ou parar periodicamente e ter mais ventilação caso haja uma pessoa infectada a bordo.

Made to move you™

Este estudo e seus resultados são apenas parte de nosso compromisso de fornecer aos passageiros informações fundamentadas em ciência, para ajudá-los a tomar decisões embasadas em relação aos elevadores durante a pandemia de COVID-19 e também no futuro. A Otis vem prestando suporte aos clientes desde o início da pandemia, com recursos e orientações de comportamento e também com novas soluções e tecnologias. Continuaremos inovando e trazendo pesquisas que ajudem o mundo a avançar com segurança.

Acesse [otis.com](https://www.otis.com) para solicitar o documento técnico completo e ter acesso a outros materiais relacionados ao estudo, bem como soluções e estratégias para reforçar a segurança dos passageiros.

Sobre a equipe

A pesquisa foi liderada pelo Dr. Qingyan (Yan) Chen da Universidade de Purdue, juntamente com dois candidatos a pesquisador pós-doutorando. A equipe trabalhou em estreita colaboração com especialistas técnicos da Otis para viabilizar o estudo, alcançar todos os objetivos traçados e comunicar claramente os resultados.

Dr. Qingyan (Yan) Chen é Professor de Engenharia Mecânica da James G. Dwyer, na Universidade de Purdue, e Editor-Chefe da publicação Building and Environment. Ele é amplamente reconhecido por sua pesquisa sobre a propagação de doenças infecciosas através de sistemas de ar interno e formas de prevenção.

Chen se formou Bacharel em Engenharia em 1983 e obteve o diploma de Mestrado em Engenharia em 1985 pela Universidade de Tsinghua, na China, seguido de Doutorado pela Universidade de Tecnologia de Delft (TU Delft), na Holanda, em 1988. Ele conduziu sua pesquisa de pós-doutorado como cientista pesquisador no Instituto Federal Suíço de Tecnologia de Zurique (ETH-Zurique) e trabalhou como gerente de projetos para a TNO na Holanda. Antes de ingressar na Universidade de Purdue, Chen foi membro do corpo docente da TU Delft e do Instituto de Tecnologia de Massachusetts (MIT). Chen conta com nomeações paralelas em outras universidades na Austrália, Europa e China.

Seus tópicos de pesquisa atuais incluem ambientes internos, cabinas de aeronave e projeto e análise de construção com eficiência energética, saúde e sustentabilidade. Ele já publicou três livros e mais de 470 artigos em periódicos e conferências, e foi convidado a ministrar mais de 170 palestras em todo o mundo. Nos últimos anos, Chen recebeu diversos prêmios por trabalhos técnicos e banners e o prêmio Distinguished and Exceptional Service Awards da Sociedade Norte-Americana de Engenheiros de Aquecimento, Refrigeração e Ar-condicionado (ASHRAE). Ele também é membro da ASHRAE e da Sociedade Internacional de Qualidade do Ar Interior. Antes de se tornar o Editor-Chefe da Building and Environment, atuou como editor associado da HVAC&R Research e foi membro de conselhos editoriais de seis outras publicações.

Dra. Sumei Liu é pesquisadora pós-doutoranda na Universidade de Tianjin, na China. Sua tese de doutorado desenvolveu modelos avançados para simulação precisa do fluxo de ar em uma comunidade de edifícios. Liu recebeu o título de Bacharel em Ciências pela Universidade de Hunan, na China, e trabalhou como engenheira consultora no Built Environment Group, em Tianjin, na China, antes de seu doutorado na Universidade de Tianjin. Ela passou um tempo na Universidade de Purdue como pesquisadora convidada e pesquisadora pós-doutoranda.

Dr. Xingwang Zhao é Bacharel em Ciências pela Universidade de Chongqing, na China, e Doutor pela Universidade de Tianjin.

Foi pesquisador visitante e pós-doutorando na Universidade de Purdue antes de ingressar na Southeast University, na China, para seu segundo projeto de pós-doutorado. Entre suas pesquisas está o estudo e projeto de conforto térmico e qualidade do ar em ambientes internos por meio do método adjunto – técnica de otimização que pesquisa condições limites de acordo com o objetivo do projeto do ambiente interno.

Stephen R. Nichols é engenheiro de sistemas com foco em desenvolvimento de produtos, arquitetura, inovação e estratégia. Nichols se interessa pela simplicidade de sistemas complexos, bem como pela interseção entre experiências humanas e o design voltado para pessoas, com tecnologia de transporte vertical, construção de ecossistemas e ambientes urbanos. Ele pode ser encontrado no centro de engenharia e sede global da Otis, em Farmington, Connecticut. Duas vezes ex-aluno da National Academy of Engineering Frontiers of Engineering e contemplado com o leitorado de Gilbreth, em 2019, Nichols se formou em engenharia mecânica pela Universidade Tufts e pelo Instituto Politécnico Rensselaer (RPI) e é certificado em engenharia de sistemas pelo MIT. Desde março de 2020, ele é líder de pesquisa, desenvolvimento e integração da força-tarefa multifuncional global para resposta à pandemia da Otis, conduzindo os principais esforços de inovação rápida voltada ao cliente, desenvolvimento de tecnologias e produtos, pesquisas, estratégias e parcerias.

Dr. James T. Auxier lidera o desenvolvimento de tecnologia global da Otis com foco em tendências emergentes de tecnologia, necessidades de negócios e áreas estratégicas de desenvolvimento tecnológico. Possui experiência nas indústrias de sistemas de construção, aeroespacial e de dispositivos médicos, bem como extensa parceria com universidades e experiência em pesquisa, incluindo 15 anos dedicados ao desenvolvimento de tecnologia aerotérmica. Formado em engenharia biomédica pela Universidade de Yale, Auxier tem mestrado em engenharia mecânica pela Universidade de Stanford e doutorado em engenharia biomédica pela Universidade de Kentucky.

Tricia Derwinski tem mais de 30 anos de experiência com a Otis no desenvolvimento de sistemas, subsistemas e componentes. Suas especialidades incluem projeto, integração e desenvolvimento de invólucros de cabina e tetos estruturais, ventilação forçada e natural. Derwinski foi engenheira-chefe na modernização dos elevadores do Empire State Building, bem como a líder de sistemas em diversos edifícios icônicos e grandes projetos por todo o mundo. Ela é Bacharel em Engenharia Civil pela Universidade de Washington e Mestre em Engenharia Mecânica pela Universidade de Connecticut. Ela é membro de longa data do Comitê de Normas de Desempenho da National Elevator Industry, Inc. (NEII) e do Comitê de Normas Internacionais A17 da Sociedade Norte-Americana de Engenheiros Mecânicos (ASME), participando também de diversos esforços junto à ISO relacionados à qualidade de elevadores e escadas rolantes.

Dr. Murilo Bonilha é o Diretor de Arquitetura de Sistemas, Inovação e Modelagem da Otis. Antes de ingressar na Otis em dezembro de 2019, Bonilha trabalhou na United Technologies Corporation (UTC), onde teve uma carreira diversificada, que incluiu gestão de engenharia e modelagem baseada em física, entre outras funções, com atribuições de liderança internacional em Xangai, na China, e Cork, na Irlanda. Bonilha é Doutor em Acústica e Vibração pela

Universidade de Southampton, Inglaterra, e Mestre em Arquitetura e Engenharia de Sistemas pela Universidade do Sul da Califórnia, em Los Angeles; é Mestre em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal de Santa Catarina e Bacharel em Arquitetura e Engenharia Naval pela Universidade de São Paulo, Brasil.

Agradecimento

A equipe de pesquisa gostaria de agradecer aos diversos colaboradores que ajudaram neste trabalho e seguem apoiando nossos esforços contínuos. Especificamente, a equipe agradece àqueles que ajudaram a revisar o trabalho, incluindo os professores Richard Corsi da Universidade Estadual de Portland, Darby Jack da Universidade de Columbia, Yuguo Li da Universidade de Hong Kong, Faye McNeill da Universidade de Columbia e Elliott Gall da Universidade Estadual de Portland. Suas críticas e recomendações foram visionárias e aprimorarão muito a próxima fase deste estudo. Também somos gratos a Rob Wheeler, Steve Kempf e Richard Pierce da Otis, que forneceram assistência adicional durante todo o processo.

Bibliografia

Allen J G, Macomber J D. "What Makes an Office Building 'Healthy.'" Harvard Business Review, April 29, 2020. See: <https://hbr.org/2020/04/what-makes-an-office-building-healthy>

Allen J G. "Research: Stale Office Air Is Making You Less Productive." Harvard Business Review, March 21, 2017. See <https://hbr.org/2017/03/research-stale-office-air-is-making-you-less-productive>

American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. ASHRAE Handbook - HVAC Applications (SI). Atlanta, Georgia, USA. 2007.

American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers Position Document on Filtration and Air Cleaning reaffirmed by Technology Council on January 13, 2018, after initial publication on January 29, 2015. See: <https://www.ashrae.org/file%20library/about/position%20documents/filtration-and-air-cleaning-pd.pdf>

American Society of Mechanical Engineers. A17.1/CSA B44 Handbook on Safety Code for Elevators and Escalators.

Axley J. "Multizone Airflow Modeling in Buildings: History and Theory." HVAC&R Research, 13:907-928. 2007.

Bae S, Shin H, Koo H, Lee S, Yang J, Yon D. "Asymptomatic Transmission of SARS-CoV-2 on Evacuation Flight." Emerging Infectious Diseases, 26(11):2705-2708. 2020.

Blocken B. 2020. <https://www.youtube.com/watch?v=MvLYHSODHVo>

Bolster D T, Linden P F. "Particle Transport in Low-Energy Ventilation Systems: Part 2: Transients and Experiments." Indoor Air, 19:130-144. 2009.

Buonanno G, Stabile L, Morawska L. "Estimation of Airborne Viral Emission: Quanta Emission Rate of SARS-CoV-2 for Infection Risk Assessment." Environment International, 141. 2020.

Centers for Disease Control and Prevention. 2019. <https://www.cdc.gov/coronavirus/2019-ncov/faq.html#Spread>.

Centers for Disease Control and Prevention DC/National Institute for Occupational Safety and Health. "Environmental Control for Tuberculosis: Basic Upper-Room Ultraviolet Germicidal Irradiation Guidelines for Healthcare Settings." Publication No. 2009-105. 2009.

Chao C Y H, Wan M P. "A Study of the Dispersion of Expiratory Aerosols in Unidirectional Downward and Ceiling-Return Type Airflows Using a Multiphase Approach." Indoor Air, 16:296-312. 2006.

Chao C Y H, Wan M P, Morawska L, Johnson G R, Ristovski Z D, Hargreaves M, Mengersen K, Corbett S, Li Y, Xie X, Katoshevski D. "Characterization of Expiration Air Jets and Particle Size Distributions Immediately at the Mouth Opening." Journal of Aerosol Science, 40(2):122-133. 2009.

Chen C, Lin C H, Jiang Z, Chen Q. "Simplified Models for Exhaled Airflow From a Cough With the Mouth Covered." Indoor Air, 24(6):580-591. 2014.

Chen C, Zhao B, Cui W, Dong L, An N, Ouyang X. "The Effectiveness of an Air Cleaner in Controlling Particle/Aerosol Particle Dispersion Emitted From a Patient's Mouth in the Indoor Environment of Dental Clinics." Journal of the Royal Society Interface, 7:1105-1118. 2010.

Chen C, Zhao B, Yang X, Li Y. "Role of Two-Way Airflow Owing to Temperature Difference in Severe Acute Respiratory Syndrome Transmission: Revisiting the Largest Nosocomial Severe Acute Respiratory Syndrome Outbreak in Hong Kong." Journal of the Royal Society Interface, 8:699-710. 2011.

Chen J, He H, Cheng W, Liu Y, Sun Z, Chai C, Kong Q, Sun W, Zhang J, Guo S, Shi X, Wang J, Chen E, Chen Z. "Potential Transmission of SARS-CoV-2 on a Flight From Singapore to Hangzhou, China: An Epidemiological Investigation." Travel Medicine and Infectious Disease, 36:101816. 2020.

Chen Q. "Ventilation Performance Prediction for Buildings: A Method Overview and Recent Applications." Building and Environment, 44:848-858. 2009.

Chen Q, Zhao S L, Liu S. "Evaluation of COVID-19 Infection Risk When Taking Elevators." Otis Elevator Company. December 2020.

Cheng V C, Wong S C, Chuang V W, So S Y, Chen J H, Sridhar S, To K K, Chan J F, Hung I F, Ho P L, Yuen K Y. "The Role of Community-Wide Wearing of Face Mask for Control of Coronavirus Disease 2019 (COVID-19) Epidemic Due To SARS-CoV-2." Journal of Infection. 2020.

Chin A W H, Poon L L M. "Stability of SARS-CoV-2 in Different Environmental Conditions." The Lancet Microbe, 1(1):p. e10. 2020.

Choi E M, Chu D, Cheng P, Tsang D, Peiris M, Bausch D G, Poon L L, Watson-Jones D. "In-Flight Transmission of SARS-CoV-2." *Emerging Infectious Diseases*, 26(11):2713-2716. 2020.

Choudhury D. "Introduction to the Renormalization Group Method and Turbulence Modeling." Canonsburg, Fluent Inc. Technical Memorandum TM-107. 1993.

Dai H, Zhao B. "Association of Infected Probability of COVID-19 With Ventilation Rates in Confined Spaces: A Wells-Riley Equation Based Investigation." 2020.

Darnell M E, Subbarao K, Feinstone S M, Taylor D R. "Inactivation of the Coronavirus That Induces Severe Acute Respiratory Syndrome SARS-CoV." *Journal of Virology, Methods* 121, 85-91. 2004.

Defile N C, Allen J G, Scheepers P, Levy J. "The COVID-19 Pandemic: A Moment for Exposure Science." *Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology*, April 29, 2020. See: <https://www.nature.com/articles/s41370-020-0225-3>

Derwinski T. "Safety Chain: A Look at Safety Systems in a Modern High-Rise Elevator in Light of 2018 Chicago Incident." *Elevator World*, June 2019. See: www.elevatorworld.com

FUJITEC company. 2008. http://www.fujitec.com.ar/english/IHO_ionful.html.

GAMBIT CFD Preprocessor. User's Guide. Lebanon, NH: Fluent Inc. 1998.

Gao N, Niu J. "Modeling Particle Dispersion and Deposition in Indoor Environments." *Atmospheric Environment*, 41:3862-3876. 2007.

Gao X, Li Y, Xu P, Cowling B J. "Evaluation of Intervention Strategies in Schools Including Ventilation for Influenza Transmission Control." *Building Simulation*, 5:29-37. 2012.

Gupta J K, Lin C H, Chen Q. "Characterizing Exhaled Airflow From Breathing and Talking." *Indoor Air*, 20:31-39. 2010.

Gupta J K, Lin C H, Chen Q. "Transport of Expiratory Particles in an Aircraft Cabin." *Indoor Air*, 21:3-11. 2011.

Hang J, Li Y, Jin R. "The Influence of Human Walking on the Flow and Airborne Transmission in a Six-Bed Isolation Room: Tracer Gas Simulation." *Building and Environment*, 77:119-134. 2014.

Hagbom M, Nordgren J, Nybom R, Hedlund K O, Wigzell H, Svensson L. "Ionizing Air Affects Influenza Virus Infectivity and Prevents Airborne-Transmission." *Scientific Reports*, 5:11431. 2015.

Hoehl S, Karaca O, Kohmer N, Westhaus S, Graf J, Goetsch U, Ciesek S. "Assessment of SARS-CoV-2 Transmission on an International Flight and Among a Tourist Group." *Journal of the American Medical Association, JAMA Network Open*, 3(8):e2018044. 2020.

Hyun J, Lee S G, Hwang J. "Application of Corona Discharge-Generated Air Ions for Filtration of Aerosolized Virus and Inactivation of Filtered Virus." *Journal of Aerosol Science*. 2017.

iF World Design Guide. <https://ifworlddesignguide.com/entry/76697-mive>

Jones R M, Masago Y, Bartrand T, Nicas M, Rose J B. "Characterizing the Risk of Infection From Mycobacterium Tuberculosis in Commercial Passenger Aircraft Using Quantitative Microbial Risk Assessment." *Risk Analysis*, 29:355-365. 2009.

Khanh N C, Thai P Q, Quach H L, Thi N A H, Dinh P C, Duong T N, Mai L T Q, Nghia N D, Tu T A, Quang L N, Quang T D, Nguyen T T, Vogt F, Anh D D. "Transmission of SARS-CoV-2 During Long-Haul Flight." *Emerging Infectious Diseases*, 26(11):2617-2624. 2020.

Ko G, Thompson K M, Nardell E A. "Estimation of Tuberculosis Risk on a Commercial Airliner." *Risk Analysis*, 24:379-88. 2004.

Kratzel A, Todt D, V'kovski P, Steiner S, Gultom M L, Thao T T N, Ebert N, Holwerda M, Steinmann J, Niemeyer D, Dijkman R, Kampf G, Drosten C, Steinmann E, Thiel V, Pfaender S. "Efficient Inactivation of SARS-CoV-2 by WHO-Recommended Hand Rub Formulations and Alcohols." *bioRxiv*. 2020.

Kujundzic E, Hernandez M, Miller S L. "Ultraviolet Germicidal Irradiation Inactivation of Airborne Fungal Spores and Bacteria in Upper-Room Air and HVAC In-Duct Configurations." *Journal of Environmental Engineering Science*, 6:1-9. 2007.

Launder B E, Spalding D B. "The Numerical Computation of Turbulent Flows." *Computer Methods in Applied Mechanics and Energy*, 3:269-289. 1974.

Li X, Niu J, Gao N. "Spatial Distribution of Human Respiratory Particle Residuals and Exposure Risk for the Co-Occupant Under Different Ventilation Methods." *HVAC&R Research*, 17:432-445. 2011.

Li X, Niu J, Gao N. "Co-Occupant's Exposure of Expiratory Particles — Effects of Mouth Coverings." *HVAC&R Research*, 18:575-587. 2013.

Li Y, Qian H, Hang J, Chen X, Hong L, Liang P, Li J, Xiao S, Wei J, Liu L, Kang M. "Evidence for Probable Aerosol Transmission of SARS-CoV-2 in a Poorly Ventilated Restaurant." *medRxiv*, 04.16.20067728. 2020.

Liu X, Wu J, Liu M, Dai Y, Zhou D, Li W, Lv P, Zhou N, Wu P. "Presymptomatic Transmission of COVID-19 in a Cluster of Cases Occurred in Confined Space: A Case Report." 2020.

Lim T, Cho J, Kim B S. "Predictions and Measurements of the Stack Effect on Indoor Airborne Virus Transmission in a High-Rise Hospital Building." *Building and Environment*, 46:2413-2424. 2011.

Lopez G, Northrop A. "How To Weigh the Risk of Going Out in the Coronavirus Pandemic, in One Chart." *Vox*. July 3, 2020. <https://www.vox.com/2020/5/22/21266756/coronavirus-pandemic-covid-risks-social-distancing-chart>

Mandavilli A. "239 Experts With One Big Claim: The Coronavirus Is Airborne." *The New York Times*, July 4, 2020. See: <https://www.nytimes.com/2020/07/04/health/239-experts-with-one-big-claim-the-coronavirus-is-airborne.html>

Marr L, Corsi R. "SARS-CoV-2 in Indoor Air: Principles and Scenarios." *Indoor Air Quality Science and Technology* webinar presented by the United States Environmental Protection Agency, July 16, 2020. See: <https://www.epa.gov/indoor-air-quality-iaq/indoor-air-quality-science-and-technology>

Mazumdar S, Poussou S, Lin C H, Isukapalli S S, Plesniak M W, Chen Q. "The Impact of Scaling and Body Movement on Contaminant Transport in Airliner Cabins." *Atmospheric Environment*, 45(33):6019-6028. 2011.

Mazumdar S, Chen Q. 2009. "A One-Dimensional Analytical Model for Airborne Contaminant Transport in Airliner Cabins." *Indoor Air*, 19(1):3-13. 2009.

Mazumdar S, Long Z, Chen Q. "A Coupled CFD and Analytical Model to Simulate Airborne Contaminant Transmission in Cabins." *Indoor and Built Environment*, 23:946-954. 2014.

McDevitt J J, Lai K M, Rudnick S N, Houseman E A, First M W, Milton D K. "Characterization of UVC Light Sensitivity of Vaccinia Virus." *Applied and Environmental Microbiology*, 73:5760-5766. 2007.

McDevitt J J, Rudnick S N, Radonovich L J. "Aerosol Susceptibility of Influenza Virus to UV-C Light." *Applied and Environmental Microbiology*, 78:1666-1669. 2012.

McLean R. "The Mechanism of Spread of Asian Influenza: General Discussion." *The American Review of Respiratory Disease*, 83:36-38. 1961.

Megri A C, Haghghi F. "Zonal Modeling for Simulating Indoor Environment of Buildings: Review, Recent Developments, and Applications." *HVAC&R Research*, 13:887-905. 2007.

Mitchell B W, King D J. "Effect of Negative Air Ionization on Airborne Transmission of Newcastle Disease Virus[J]." *Avian Diseases*, 38(4):725-732. 1994.

Morawska L, Tang J W, Bahnfleth W, Bluysen P M, Boerstra A, Buonanno G, Cao J, Dancer S, Floto A, Franchimon F, Haworth C, Hogeling J, Isaxon C, Jimenez J L, Kurnitski J, Li Y, Loomans M, Marks J, Marr L C, Mazzarella L, Melikov A K, Miller S, Milton K D, Nazaroff W, Nielsen P V, Noakes C, Peccia J, Querol X, Sekhar C, Seppänen O, Tanabe S-I, Tellier R, Tham K K, Wargocki P, Wierzbicka A, Yao M. "How Can Airborne Transmission of COVID-19 Indoors Be Minimised?" *Environment International*, 142:105832. 2020.

Murakami S, Kato S, Nagano S, Tanaka S. Diffusion Characteristics of Airborne Particles with Gravitational Settling in a Convection-Dominant Indoor Flow Field. *ASHRAE Transactions*, 98(1):82-97. 1992.

National Academies of Sciences, Engineering and Medicine. "Does Ultraviolet (UV) Light Kill the Coronavirus?" Based on Science, published on April 22, 2020. See: <https://www.nationalacademies.org/based-on-science/covid-19-does-ultraviolet-light-kill-the-coronavirus>

Nichols S, Auxier J. "Airflow and Elevators: Highlights of an Airflow Study Conducted to Determine the Relative Risk of COVID-19 Transmission Among Elevator Passengers." *Otis Elevator Company*. January 2021.

Nielsen P V. "Benchmark Test for a Computer Simulated Person." *Indoor Air* 14.7. 2003:144-156.

Noakes C J, Khan M A I, Gilkeson C A. "Modeling Infection Risk and Energy Use of Upper-Room Ultraviolet Germicidal Irradiation Systems in Multi-Room Environments." *Science and Technology for the Built Environment*, 21:99-111. 2015.

Poussou S B, Mazumdar S, Plesniak M W, Sojka P E, Chen Q. 2010. "Flow and Contaminant Transport in an Airliner Cabin Induced by a Moving Body: Model Experiments and CFD Prediction." *Atmospheric Environment*, 44(24):2830-2839.

Public Health Agency of Canada. "Prevention and Control for Health Care Settings: Canadian Pandemic Influenza Preparedness: Planning Guidance for the Health Sector." See: <https://www.canada.ca/en/public-health/services/flu-influenza/canadian-pandemic-influenza-preparedness-planning-guidance-health-sector/prevention-and-control-of-influenza-during-a-pandemic-for-all-healthcare-settings.html>

Shao S, Zhou D, He R, et al. "Risk Assessment of Airborne Transmission of COVID-19 by Asymptomatic Individuals Under Different Practical Settings." *Journal of Aerosol Science*, 151:105661. 2021.

Singh N, Kaczmarczyk S, Ehrl T. An Analysis of Airflow Effects in Lift Systems. The 7th Symposium of Lift and Escalator Technologies, Northampton University, UK. 2017.

Speake H, Phillips A, Chong T, Sikazwe C, Levy A, Lang J, Scalley B, Speers D J, Smith D W, Effler P, McEvoy S P. "Flight-Associated Transmission of Severe Acute Respiratory Syndrome Coronavirus 2 Corroborated by Whole-Genome Sequencing." *Emerging Infectious Diseases*, 26(12):2872-2880. 2020.

Smagorinsky J. "General Circulation Experiments with the Primitive Equations I: The Basic Experiment." *Monthly Weather Review*, 91:99-164. 1963.

Song D, Lim H. "Application of the Mechanical Ventilation in Elevator Shaft Space to Mitigate Stack Effect Under Operation Stage in High-Rise Buildings." *Indoor and Built Environment*, 23(1):81-91. 2014.

Song F, Zhao B, Yang X, Jiang Y, Gopal V, Dobbs G, Sahm M. "A New Approach on Zonal Modeling of Indoor Environment with Mechanical Ventilation." *Building and Environment*, 43:278-286. 2008.

United States Environmental Protection Agency. "Coronavirus Cases Trigger EPA Rapid Response." Released January 29, 2020. See: <https://www.epa.gov/pesticides/coronavirus-cases-trigger-epa-rapid-response>

Walker C M, Ko G. "Effect of Ultraviolet Germicidal Irradiation on Viral Aerosols." *Environmental Science & Technology*, 41:5460-5465. 2007.

Walkinshaw D S. "Germs, Flying and the Truth." *ASHRAE Journal*, 52:70-73. 2010.

Wang J, Chow T T. "Influence of Human Movement on the Transport of Airborne Infectious Particles in Hospital." *Journal of Building Performance Simulation*, 8(4):205-215. 2015.

Wang L, Dols W S, Chen Q. "Using CFD Capabilities of CONTAM 3.0 for Simulating Airflow and Contaminant Transport In and Around Buildings." *HVAC&R Research*, 16(6):749-763. 2010.

World Health Organization. Scientific brief: "Transmission of SARS-CoV-2: Implications for Infection Prevention Precautions." July 9, 2020. See: <https://www.who.int/publications/i/item/modes-of-transmission-of-virus-causing-covid-19-implications-for-ipc-precaution-recommendations>

Xie C, Zhao H, Li K, Zhang Z, Lu X, Peng H, Wang D, Chen J, Zhang X, Wu D, Gu Y, Yuan J, Zhang L, Lu, J. "The Evidence of Indirect Transmission of SARS-CoV-2 Reported in Guangzhou, China." *BMC Public Health*, 20(1):1-9. 2020.

Xu P, Kujundzic E, Peccia J, Schafer M P, Moss G, Hernandez M, Miller S L. "Impact of Environmental Factors on Efficacy of Upper-Room Air Ultraviolet Germicidal Irradiation for Inactivating Airborne Mycobacteria." *Environmental Science and Technology*, 39(24):9656-9664. 2005.

Xu P, Peccia J, Fabian P, Martyny J W, Fennelly K P, Hernandez M, Miller S L. "Efficacy of Ultraviolet Germicidal Irradiation of Upper-Room Air in Inactivating Airborne Bacterial Spores and Mycobacteria in Full-Scale Studies." *Atmospheric Environment*, 37:405-419. 2003.

Yakhot V, Orszag SA. "Renormalization Group Analysis of Turbulence." *Journal of Scientific Computing*, 1:3-51. 1986.

Young L, Wormser G. "The Resurgence of Tuberculosis." *Scandinavian Journal of Infectious Diseases, Supplement*, 93:9-19.

You R, Lin C H, Wei D, Chen Q. "Evaluating the Commercial Airliner Cabin Environment with Different Air Distribution Systems." *Indoor Air*, 29(5):840-853. 2019.

Yu L, Peel G K, Cheema F H, Lawrence W S, Bukreyeva N, Jinks C W, Peel J E, Peterson J W, Paessler S, Hourani M, Ren Z. "Catching and Killing of Airborne SARS-CoV-2 to Control Spread of COVID-19 by a Heated Air Disinfection System." *Materials Today Physics*, 15:100249. 2020.

Zhang L, Li Y. "Dispersion of Coughed Particles in a Fully Occupied High-Speed Rail Cabin." *Building and Environment*, 47:58-66. 2012.

Zhang R, Li Y, Zhang A L, Wang Y, Molina M J. "Identifying Airborne Transmission as the Dominant Route for the Spread of COVID-19." *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2020.

Zhang Z, Zhai Z Q, Zhang W, Chen Q. "Evaluation of Various Turbulence Models in Predicting Airflow and Turbulence in Enclosed Environments by CFD: Part 2 - Comparison with Experimental Data from Literature." *HVAC&R Research*, 13:871-886. 2007.

Zhou Y, Shen J. "Experimental and Numerical Study on the Transport of Droplet Aerosols Generated by Occupants in a Fever Clinic." *Building and Environment*, 187. 2020.

Zemouri C, Awad S F, Volgenant C M C, Crielaard W, Laheij A M G A, de Soet J J. "Modeling of the Transmission of Coronaviruses, Measles Virus, Influenza Virus, Mycobacterium Tuberculosis, and Legionella Pneumophila in Dental Clinics." *Journal of Dental Research*, (9):002203452094028. 2020.