VENTILAÇÃO NATURAL COMO INSTRUMENTO NA REDUÇÃO DO RISCO DE PROPAGAÇÃO DA COVID-19: ESTUDO DE CASO EM SALAS DE AULA

Pedro Henrique Bruder Decker (1); Camila Gregório Atem (2)
(1) Bacharel, engenheiro civil, pedroh.b.decker@uel.br, Universidade Estadual de Londrina, Rua Goiás 1121, Londrina-PR, +5543996109260
(2) Doutora, arquiteta, camila.atem@uel.br, Universidade Estadual de Londrina, Rodovia Celso Garcia Cid, PR-445, Km 380 – Campus Universitário, Londrina-PR, +5543988486422

RESUMO
A pandemia de Coronavírus gerou a necessidade da instauração de medidas de isolamento social ao redor do mundo. Neste contexto os mais diversos estabelecimentos foram fechados, sendo instituições de ensino, locais onde há concentração corriqueira de estudantes, uma das atividades mais afetadas. Este trabalho busca verificar as condições sanitárias de salas de aula com base em suas taxas de ventilação, bem como estabelecer parâmetros de reocupação seguros em relação à transmissão da COVID-19. Dada a escala global das interdições de escolas, há grande volume de recintos a serem avaliados, destarte, a valia de ferramenta que permita apreciação breve das condições de aeração natural de cada sala. Para tal foi desenvolvida uma planilha de cálculo simplificada para estimar as taxas de ventilação de recintos fechados, que leva em consideração características da edificação, de seu entorno e sua localização geográfica. A segurança sanitária de ocupação de salas de aula do Centro de Tecnologia e Urbanismo da Universidade Estadual de Londrina foi avaliada a partir dessas taxas, adotando parâmetros de rugosidade do terreno e intensidade do ar pessimistas. A probabilidade de contágio da doença foi estimada para cada sala de aula considerando sua ocupação máxima original, bem como para lotação reduzida, conforme metodologia proposta por Jimenez (2020). Os ambientes também foram classificados de acordo com seus números de troca de ar por hora, em faixas propostas por Allen et al (2020). Para algumas das salas avaliadas a redução da ocupação máxima somente considerando distanciamento social de 2 metros é incapaz de manter as taxas de ventilação em níveis adequados para reduzir o risco de disseminação da doença.

Palavras-chave: coronavírus, transmissão viral, ventilação, ventilação natural, escolas.

ABSTRACT
The Coronavirus pandemic created the need for social isolation measures around the world. In this context, the most diverse establishments were closed, being educational institutions, places where there is a common concentration of students, one of the most affected activities. This paper seeks to verify the sanitary conditions of classrooms based on their ventilation rates, as well as to establish safe reoccupation parameters in relation to the transmission of COVID-19. Given the global scale of school interdictions, there is a large volume of rooms to be assessed, therefore, there is a utility for a tool that allows a brief assessment of the natural ventilation conditions of each room. For this purpose, a simplified spreadsheet was developed, which considers the characteristics of the building, its surroundings, and its geographic location. Based on these ventilation rates, and on hygienic ventilation parameters obtained in the literature, the maximum occupancy of each classroom of the Technology and Urbanism Center at the State University of Londrina was calculated, adopting pessimistic parameters of terrain roughness and wind speed. The probability of contagion of the disease was estimated for each classroom considering its original maximum occupation, as well as for reduced capacity, according to the methodology proposed by Jimenez (2020). The rooms were also classified according to their numbers of air changes per hour, in ranges proposed by Allen et al (2020). For some of the rooms evaluated, the reduction in maximum occupancy only considering a social distance of 2 meters is unable to maintain ventilation rates at adequate levels to reduce the risk of spreading the disease.

Keywords: Coronavirus, Viral Transmission, Ventilation, Natural Ventilation, Schools.

1. INTRODUÇÃO

A COVID-19 foi reportada pela primeira vez na província de Wuhan na China em dezembro de 2019. De acordo com dados da Organização Mundial da Saúde (2020a) em poucos dias após a notificação de um surto de pneumonia pela Comissão Municipal de Saúde de Wuhan, o vírus já havia se espalhado por diversos países do sudeste asiático.

A disseminação da doença ocorre com extrema facilidade em ambientes fechados e com concentração de pessoas. Isso levou países do mundo todo a paralisar total ou parcialmente atividades que gerem aglomeração de pessoas. Comércios, restaurantes, academias, indústrias, instituições de ensino são apenas alguns dos afetados. Neste contexto, um ano após o fechamento destes estabelecimentos, a comunidade científica ainda vem buscando respostas acerca da possibilidade da reocupação segura desses ambientes.

O contágio pode se dar por contato direto com as gotículas, contato com superfícies contaminadas (como levar a mão à boca ou olhos após tocar numa maçaneta infectada) ou por contato com partículas de vírus presentes em micro gotículas, os aerossóis, em suspensão no ar (OMS, 2020b). Mesmo indivíduos assintomáticos transmitem a doença, o que dificulta sua contenção isolando somente indivíduos contaminados. Manter condutas de isolamento social, como fechamento do comércio, restaurantes, e instituições de ensino são eficazes em reduzir a velocidade de propagação da doença (LI et al., 2020).

Jones et al. (2020) indicam que a má ventilação tem relação com o aumento da probabilidade de disseminação do vírus Sars-Cov-2. A relevância higiênica da ventilação é conhecida na comunidade acadêmica. Para Etheridge e Sandberg (1996), seu propósito geral em edifícios é fornecer ar fresco para a respiração, tanto por diluição quanto por retirada dos contaminantes nele presentes. Dessa forma, o uso de estratégias de ventilação em ambientes fechados pode ser grande aliado no combate da pandemia, estimulando a renovação do ar e reduzindo a probabilidade de contato com o vírus.

Este artigo dará atenção à ambientes escolares. No Brasil o fechamento dos estabelecimentos de ensino ocorreu por volta de março de 2020, com estados e municípios estabelecendo medidas regionais. No Paraná o fechamento das escolas e universidades públicas ocorreu por decreto governamental no dia 20 de março (FILLIPIN, 2020). De acordo com levantamento realizado pelo DataSenado, no Brasil em 2020 dos 56 milhões de estudantes matriculados na educação básica e superior, 19,5 milhões tiveram aulas suspensas, e 32,4 milhões passaram a ter aulas remotas (CHAGAS, 2020). O sistema de Educação a Distância implementado sofre críticas, e a falta de acessibilidade à internet e aparelhos capazes de acessá-la é impedimento para a continuação dos estudos para alunos de baixa renda. Em maio de 2021 a retomada parcial das aulas presencias já havia ocorrido em parte dos estados do país com restrições, resta, porém, longo caminho até a retomada da normalidade.

Instituições de ensino são locais especialmente propensos à propagação de doenças contagiosas, haja vista os altos índices de ocupação e baixos níveis de ventilação comumente reportados (SAMÚDIO et al., 2006). Foi desenvolvido um estudo de caso para salas de aula do Centro de Tecnologia e Urbanismo (CTU) da Universidade Estadual de Londrina (UEL), com simulação de suas taxas de ventilação por meio de planilha de cálculo elaborada pelo autor com base em método algébrico proposto pela literatura.

2. OBJETIVO

O presente artigo visa analisar a ventilação natural de salas de aula do Centro de Tecnologia e Urbanismo da Universidade Estadual de Londrina, de forma a avaliar a segurança da reocupação de ambientes de ensino no contexto da pandemia de COVID-19 a partir de suas taxas de ventilação. A partir desta análise foram feitas sugestões para redução de riscos na reocupação dos estabelecimentos de ensino e no projeto de salas de aula.

3. MÉTODO

A determinação precisa das taxas de ventilação de ambientes fechados depende de ensaios realizados in loco, com utilização de equipamentos de medição como medidores de concentração de CO2 e anemômetros, nem sempre disponíveis. Além disso, considerando o comportamento estocástico dos ventos, idealmente as medições deveriam ocorrer para diferentes condições meteorológicas. A realização desse tipo de estudo individualizado para cada uma das milhares de salas de aula do país é inviável em termo de custos, disponibilidade de equipamentos e tempo hábil.

Propõe-se, portanto, a utilização de método simplificado para a avaliação da ventilação dos ambientes, que possa ser aplicado com relativa facilidade em grande escala. Para tal, aplicou-se a metodologia proposta por Lamberts, Dutra e Pereira (2013) - que leva em conta a posição geográfica da edificação, suas

características geométricas e a rugosidade da vizinhança - para a elaboração uma planilha que possibilita a estimativa ágil das taxas de ventilação de ambientes a partir de dados de obtenção trivial.

3.1. Caracterização do ambiente para estudo de caso

O objeto de estudo de caso foi o Centro de Tecnologia e Urbanismo da Universidade Estadual de Londrina. O edifício, situado nas coordenadas S23°19'35.9" W51°11'54.0", dentro do campus da UEL é composto por térreo e mais dois pavimentos, com área construída de 5.836,52 metros quadrados.

O edifício é composto por dois blocos com ligação central, em formato de H. As plantas baixas do térreo e primeiro pavimento estão apresentadas nas Figura 1 a seguir, com divisão dos ambientes conforme legenda. O segundo pavimento é similar, diferindo somente quanto a divisão entre as salas.

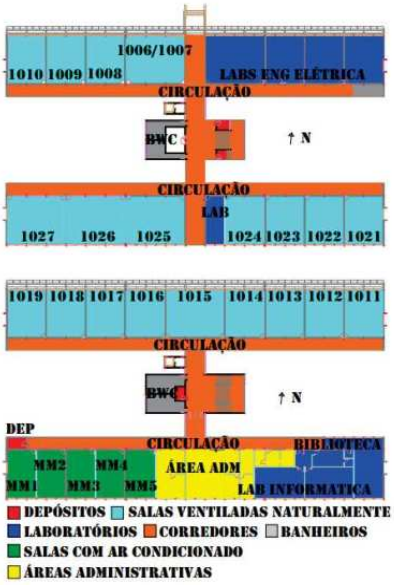

Figura 1 - Planta baixa esquematizada do térreo e primeiro pavimento do CTU

Existem 11 salas de aula ventiladas naturalmente no pavimento térreo, além de laboratórios, banheiros e depósitos. No primeiro pavimento existem 9 salas de aula ventiladas naturalmente, além de 5 salas Multimeios (que possuem ar condicionado), secretarias, laboratórios de informática, a biblioteca do curso de Arquitetura, banheiros e depósitos. No segundo pavimento encontram-se no bloco Norte 6 salas Multimeios, secretarias, laboratórios, e no bloco Sul salas de permanência dos docentes.

Foram avaliadas neste estudo as condições de ventilação das salas de aula, incluindo aquelas que possuem sistema de ar condicionado, já que também contam com a possibilidade de ventilação natural. As taxas de ventilação dos laboratórios de informática também foram estimadas.



Figura 3 – Interior da sala 1014

As salas de aula foram projetadas para proporcionar ventilação cruzada, possuindo janelas basculantes junto à parede do corredor, onde se localizam as portas, e esquadrias do tipo máximo-ar e basculantes nas paredes voltadas para o lado externo, conforme ilustra a figura 3, registrada na sala 1014.

As esquadrias máximo-ar da fachada Norte possuem abertura de aproximadamente 40º, enquanto todas as outras, inclusive basculantes, possuem abertura de cerca de 30º.

A imagem de satélite apresentada na Figura 4 permite observar obstáculos ao redor da edificação, que possuem influência nas condições de ventilação do edifício. Há nas fachadas Norte, Sul e Oeste concentração densa de árvores de grande porte, cobertura vegetal típica da mata atlântica. Na fachada leste há presença de árvores de pequeno porte e arbustos.



Figura 4 –CTU e arredores (GOOGLE, 2021)

3.2. Obtenção de dados meteorológicos

Foram utilizados dados coletados na estação meteorológica do IAPAR (latitude: 23°21’34.3” S; longitude: 51°09’53.1” W e altitude: 585m) distando 5 quilômetros em linha reta do CTU (latitude: 23°19'35.9" S; longitude 51°11'54.0" W). Com base em dados das normais climatológicas de 1976 a 2019, a direção predominante dos ventos para a região é Leste, com intensidade média de 2,6 m/s (IAPAR, 2019).

3.3. Desenvolvimento e aplicação da planilha de cálculo

Esta subseção apresenta a sequência de cálculo do modelo proposto para estimação das taxas de renovação de ar de um ambiente ventilado naturalmente, bem como o procedimento pelo qual se deu sua aplicação.

Em primeiro momento foi estimado o fluxo de ar das salas de aula utilizando como referência meteorológica vento com velocidade de 1,0 m/s, vindo da direção predominante (Leste). Foi feita uma redução da intensidade em relação ao valor médio registrado pelo IAPAR. Não seria prudente considerar a

manutenção da velocidade média ao longo de todo o dia, já que há grandes variações da intensidade do vento ao longo do tempo (TROEN e PETERSEN, 1989). A fim de simular situações otimistas e pessimistas, foram realizados cálculos também para velocidade externa do vento de 1,5 m/s e 2,0 m/s.

Para adoção da intensidade do vento nos cálculos, realizou-se correção de acordo com a altura dos ambientes envolvidos, bem como com a rugosidade do terreno do campo de estudo e de tomada de dados. Dados de estações meteorológicas são coletados em campos abertos, a uma altura padrão de 10 metros do solo, situação distinta da realidade da edificação. A correção foi feita conforme proposto por Bittencourt e Cândido (2005), de acordo com a equação 1 a seguir.

$$\frac{V}{V_M} = k \times z^a$$

Equação 1

Onde:
V é a velocidade do vento corrigida para a altura da abertura de entrada [m/s];
V_M é a velocidade do vento na altura padrão de 10m [m/s];
z é altura da abertura de entrada [m];
e k e a são coeficientes adimensionais de correção de acordo com a rugosidade do terreno.

A planilha desenvolvida permitiu a seleção de uma entre quatro condições usuais de localização da edificação, de acordo com a tabela 1.

Tabela 1 – Coeficientes para correção da velocidade do vento devido à rugosidade do terreno (adaptado de LAMBERTS, DUTRA e PEREIRA, 2013)

Localização da Edificação	k	a
campo aberto plano	0,86	0,17
campo com algumas barreiras	0,52	0,2
ambiente urbano	0,35	0,25
centro da cidade	0,21	0,33

Para o estudo foi adotada situação pessimista, de centro da cidade, considerando a densa presença de árvores ao redor da edificação, e em prol da segurança.

O mecanismo primário para a ventilação cruzada são as diferenças de pressão geradas pela ação do vento entre as fachadas onde estão localizadas as aberturas de entrada e saída de ar do recinto.

Esse fator foi considerado no roteiro de cálculo previsto por Lamberts, Dutra e Pereira (2013) a partir do coeficiente de pressão do vento (ΔC_{pl}), estimado de acordo com o ângulo de incidência do vento com abertura de entrada de ar na edificação (θ), medido em planta, conforme a tabela 2 a seguir

Tabela 2 – ΔCpl para casas em campo aberto (adaptado de LAMBERTS, DUTRA e PEREIRA, 2013).

Ângulo de incidência (θ)	Diferença entre os coeficientes de pressão do vento (ΔCpl)
0 ≤ θ ≤ 30°	1,2
30° < θ ≤ 90°	0,1 + 0,0183*(90-θ)

O valor de θ é zero quando o vento incide ortogonalmente à abertura de entrada, e 90º quando é paralelo. Seu valor em graus é uma das entradas necessárias para a simulação das taxas de ventilação realizada pela planilha. Naturalmente, essa característica das aberturas varia conforme a direção do vento. Em primeira análise, foi utilizada como referência a direção dominante. A influência da direção do vento foi verificada a partir de simulações para diferentes inclinações. Foi utilizada simulação computacional com auxílio do software Fluxovento como forma de auxílio na tomada de decisão do ângulo de incidência a se considerar para as análises. Foram realizados cálculos para inclinações de 45º, 60º, 75º e 87º.

Para a aplicação dos coeficientes na estimação do fluxo de ar do recinto também foi necessário realizar correção do ΔC_{pl} em função da ocupação dos lotes lindeiros. O método algébrico propõe redução de 40% no valor caso haja edificações há cerca de "duas casas" de distância, e de 70% caso edifícios vizinhos estejam locados a "uma casa" de distância. Ressalta-se que se trata de método aproximado, de forma a tornar esse tipo de classificação qualitativa aceitável.

Para o estudo de caso, novamente de forma pessimista, pelos motivos já apresentados, foi considerada distância de "uma casa", apesar de não existirem edifícios próximos. Também foi realizada essa consideração devido ao formato do prédio, já que um bloco pode atuar como obstáculo para o outro. O modelo de cálculo utiliza como parâmetros áreas úteis de entrada ($A_{útil,entrada}$ [m²]) e saída ($A_{útil,saída}$ [m²]), obtidas a partir da correção da área total das aberturas de acordo com o tipo de esquadria instalada. A planilha apresenta campos de entrada para as áreas totais das aberturas de entrada e saída, e seus respectivos tipos de esquadria, calculando seu porcentual de aproveitamento de acordo com os valores sugeridos por Lamberts, Dutra e Pereira (2013). O valor considerado é de 50% para esquadrias de correr e tipo guilhotina, 100% para esquadrias de abrir e igual a 1 menos o cosseno do ângulo de abertura para esquadrias basculantes e maxim-ar.

Quando não havia aberturas em fachadas opostas, promovendo o fenômeno da ventilação cruzada, as áreas foram computadas todas como áreas de entrada. Nesta situação o cálculo do fluxo de ar no ambiente foi realizado de acordo com a equação 2 a seguir.

$$Q = 0{,}025 \times \sum_{i=1}^{n} A_{\text{útil},entrada\ \ i} \times V$$

Equação 2

Onde:
Q é o fluxo de vento no ambiente [m³/s];

Para situações onde havia aberturas de entrada e saída promovendo o fenômeno da ventilação cruzada, calculou-se a área efetiva para aberturas em série (A_{ef} [m²]) antes de se proceder à determinação do fluxo. Esse processo se deu de forma automática pela planilha, de acordo com a equação 3 proposta por Lamberts, Dutra e Pereira (2013) e Frota e Schiffer (2001).

$$\frac{1}{(A_{ef})^2} = \frac{1}{(\sum_{i=1}^{n} A_{\text{útil},entrada\ \ i})^2} + \frac{1}{(\sum_{i=1}^{n} A_{\text{útil},saída\ i})^2}$$

Equação 3

Onde:
c_a é o coeficiente adimensional de perda de carga por ação dos ventos;
ΔC_p é a diferença entre os coeficientes de pressão das aberturas de entrada e saída corrigidos.

Na sequência o cálculo do fluxo da ventilação foi realizado de acordo com Frota e Schiffer (2001), seguindo a equação 4.

$$Q = c_a \times A_{ef} \times V \times \sqrt{\Delta C_p}$$

Equação 4

O valor de c_a foi adotado como igual a 0,6, seguindo Lamberts, Dutra e Pereira (2013) e Frota e Schiffer (2001). No estudo de Jones et. al (2016) foi utilizado coeficiente 0,62. Trata-se de coeficiente empírico, que varia de acordo com as características geométricas da abertura, e, portanto, tratado de forma aproximada.

Calculado o fluxo de ventilação do ambiente, sua taxa de ventilação por pessoa - "[...] o valor da ventilação que realmente importa para a transmissão da doença" (JIMENEZ 2020, tradução nossa) - foi obtida simplesmente pela divisão do fluxo pelo número de ocupantes do ambiente.

A avaliação da ocupação máxima do ambiente foi feita a partir do critério recomendado pela resolução da RE/ANVISA nº9 para ambientes climatizados, de 27 m³/h por pessoa. Trata-se de um parâmetro elaborado originalmente visando a manutenção ventilação higiênica em ambientes climatizados artificialmente (ANVISA, 2003). A ordem de grandeza desse parâmetro está em consonância com recomendações da norma ANSI/ASHRAE 62.1 (2013).

A classificação da segurança de ocupação dos ambientes foi realizada conforme cinco faixas propostas por Allen et al. (2020), avaliando a ventilação de ruim a ideal. Para tanto se fez necessário determinar o número de trocas de ar por hora do ambiente, obtido com a divisão do fluxo de ar por seu volume. A classificação dos ambientes foi realizada considerando a intensidade média do vento externo de 1,0 m/s.

O presente estudo também aplicou os resultados de taxa de ventilação obtidos para simular a probabilidade de contágio de COVID-19, com base em ferramenta desenvolvida por Jimenez (2020).

O instrumento desenvolvido pelo professor da Universidade do Colorado-Boulder considera vários parâmetros, como taxas de respiração, uso e eficiência de máscaras, taxa de decaimento, deposição e emissão do vírus, entre outros. É importante ressaltar que a taxa de ventilação é somente um deles. Como a determinação dos outros parâmetros envolvidos no cálculo da probabilidade de contaminação foge ao escopo deste trabalho, foram os valores adotados por Jimenez (2020) para a avaliação de salas de aula. Os valores adotados consideram que todos os integrantes utilizam máscaras simples de tecido.

O parâmetro referente ao número de partículas infecciosas expelidas por um indivíduo varia de acordo com a atividade do indivíduo. Foi adotado o valor de 25 quanta/hora, que considera que o infectado é o professor.

Para cada sala de aula foram inseridas na planilha as dimensões (área e volume) e número de trocas de ar por hora, calculados pelo método algébrico para ângulo de incidência de 45º e intensidade de 1,0 m/s. Foram realizados cálculos para a ocupação máxima original das salas de aula, bem como para a ocupação reduzida, considerando tanto taxa mínima de ventilação de 27 m³/h por pessoa, quanto distanciamento social mínimo de 2 metros, parâmetro recomendado pela secretaria de saúde do governo do Paraná na resolução SESA Nº 632/2020 (Paraná, 2020).

A duração de cada aula foi adotada como 50 minutos. A ferramenta permite avaliar a probabilidade de contágio de pelo menos um indivíduo para um evento único considerando a presença de uma pessoa infectada. Essa avaliação é mais indicada para avaliar surtos conhecidos.

Para estimar o risco geral de contaminação em ambientes de ensino, é mais indicado inferir o número provável de infectados num evento (como uma aula) a partir da prevalência da COVID-19 na população. Foi aplicada prevalência de 1,32%, indicando a probabilidade de cada indivíduo estar infectado, valor estimado para o dia 9 de novembro de 2020, considerando números de todo o Brasil (GU, 2020). Ressalta-se há grande variação da prevalência em função da região e do tempo. Também foram obtidos valores para a probabilidade de contágio após a repetição do evento por 100 vezes, o que corresponderia a cerca de um mês com cinco aulas durante os dias da semana.

4. RESULTADOS

Os resultados deste trabalho foram divididos em três tópicos apresentados a seguir: modelo algébrico, ocupação máxima e probabilidade de contágio.

4.1. Modelo algébrico

O modelo de cálculo automatizado pela planilha desenvolvida pelo autor foi aplicado para 30 salas de aula do Centro de Tecnologia e Urbanismo da Universidade Estadual de Londrina, incluindo o laboratório de informática. Devido similaridade do layout dos ambientes, são 13 diferentes situações para aplicação do método proposto. Os dados geométricos dos treze diferentes layouts de sala de aula estão compilados na Tabela 3.

Tabela 3 – Caracterização geométrica das salas de aula

Salas	Layout	Pavimento	Área do ambiente (m²)	Volume do Ambiente (m³)	Área útil das entradas de ar (m²)	Área útil das saídas de ar (m²)	Área equivalente de abertura (m²)	Altura da abertura de entrada (m)
1006/7	A	1º	85,3	276,4	3,46	4,08	2,64	1,10
1008	B	1º	70,4	228,1	2,31	2,28	1,62	1,10
1009/10	C	1º	70,4	228,1	2,31	2,28	1,62	1,10
1021	D	1º	70,1	227,2	2,28	1,32	1,14	2,10
1022 / 1023	E	1º	70,4	228,1	2,28	1,32	1,14	2,10
1024	F	1º	72,5	234,8	2,28	1,32	1,14	2,10
1025 / 1026 / 1027	G	1º	108,4	351,2	4,28	1,98	1,80	2,10
MM2 / MM3 / MM4 / MM5	H	2º	52,5	169,9	2,15	0,66	0,63	5,45
1011 / 1012 / 1013 / 1014 / 1016 / 1017 / 1018 / 1019	I	2º	63,9	226,6	2,31	2,28	1,62	4,43
1015	J	2º	106,3	344,5	3,46	4,10	2,65	4,45
Laboratório de informática	K	2º	56,7	183,8	3,36	1,65	1,28	3,35
MM6 / MM7 / MM8 / MM9 / MM10	L	3º	52,0	168,4	1,73	2,13	1,34	7,80
MM11	M	3º	52,5	169,9	1,73	1,68	1,21	7,80

Dentre os ambientes analisados, o único com abertura intermediária foi o laboratório de informática, com área de 2,52 m². Todas as outras salas são ambientes de câmara única. As salas Multimeios 2, 3, 4 e 5 foram construídas com menos esquadrias do que o previsto em projeto. Essas foram as salas de aula com menor valor para área equivalente, com 0,63m², enquanto a média para os 30 ambientes foi de 1,44 m².

Devido às características geométricas da edificação, foi considerado que todas as salas têm as aberturas de entrada de ar sujeitas à mesma inclinação para um mesmo vento. Como o modelo de cálculo estima o ΔC_{pl} partir dessa inclinação, todas as salas estarão sujeitas aos mesmos coeficientes de pressão.

A Figura 5 apresenta simulação do caminho percorrido pelo ar no pavimento térreo do CTU, realizada com auxílio do software Fluxovento.

A simulação mostra ângulos de incidência do vento nas aberturas maiores que os medidos diretamente em planta. A inclinação entre a fachada Norte do edifício e a direção Leste é de aproximadamente 87º, porém a simulação indica valores mais próximos de 45º. Como se trata de simulação simples, bidimensional, os resultados devem ser interpretados com cautela. Avaliou-se que a utilização da inclinação medida em planta poderia subestimar o fluxo de ventilação do ambiente.

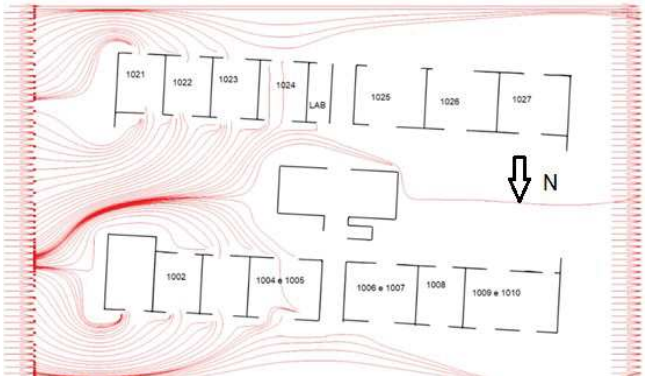

Figura 5 – Simulação do fluxo de ar no CTU para vento Leste

Sendo assim, inicialmente foi adotada inclinação de 45º entre aberturas de entrada e o vento para aplicação do modelo de cálculo (90º significa fluxo paralelo, 0º, perpendicular). Na sequência os mesmos cálculos foram realizados para outras inclinações e intensidades do vento. Foram simuladas situações mais pessimistas, com inclinações maiores (45º, 60º, 75º e 87º), e situações mais otimistas, com valores mais altos para a intensidade do vento (1,0 m/s, 1,5 m/s e 2,0 m/s).

Neste primeiro momento são apresentados valores considerando o uso da estratégia de ventilação cruzada. A figura 6 compila os resultados encontrados para o fluxo de ar em m³/h considerando a inclinação de 45º. A figura 7 apresenta os valores de fluxo de ar para inclinação de 60º. De forma análoga, as figuras 8 e 9 apresentam, respectivamente, resultados para incidência de 75º e 87º.

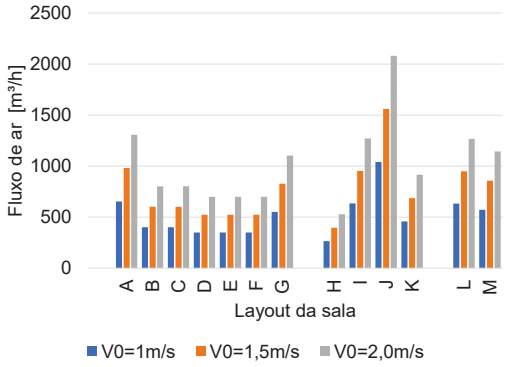

Figura 6 – Fluxo de ar para vento incidente a 45º

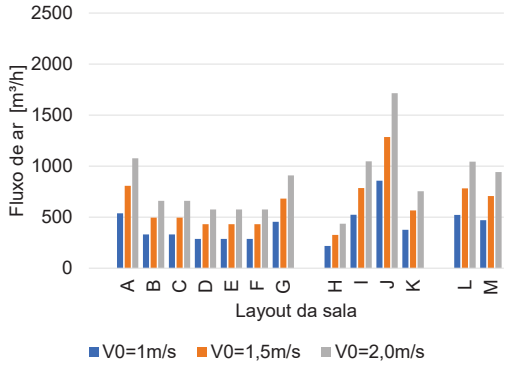

Figura 7 – Fluxo de ar para vento incidente a 60º

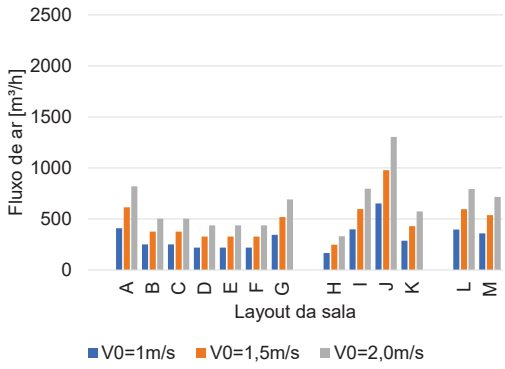

Figura 8 – Fluxo de ar para vento incidente a 75º

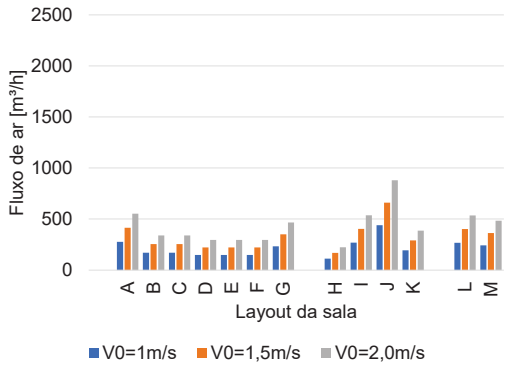

Figura 9 – Fluxo de ar para vento incidente a 87º

As salas de aula estão divididas de acordo com o pavimento em que se encontram, separadas por espaço nos gráficos.

O formato dos gráficos é o mesmo para as diferentes incidências de vento simuladas, indicando que a proporção entre as taxas de ventilação para cada sala analisada se mantém constante. Isso ocorre devido às características geométricas da edificação e a ao modelo de cálculo utilizado, pois para uma mesma inclinação, todas as salas apresentarão mesmo ΔC_p.

Como, para uma mesma velocidade corrigida do vento, os demais termos da equação 4 se mantém constantes para cada sala de aula, observa-se similaridade ente os gráficos, tendo somente sua intensidade alterada, sem modificação das proporções. Para inclinação de 45º, ΔC_p assume valor 0,28; para 60º, 0,19; para 75º, 0,11 e para 87º, somente 0,05. A relação do fluxo de ar com a intensidade do vento também é diretamente proporcional, o que pode igualmente ser observado nas figuras 6 a 9. O número de trocas de ar por hora de cada recinto também é diretamente proporcional ao valor de ΔC_p em situação com ventilação cruzada. Sendo assim, da mesma forma que o fluxo, seu valor é influenciado pelo ângulo θ e a intensidade do vento. A figura 10 apresenta o número de trocas de ar por hora para diferentes inclinações, para intensidade do vento de 1,0 m/s. Foram adotados os resultados gerados pela menor intensidade do vento externo a 10 metros de altura simulada para a classificação dos ambientes de acordo com as faixas propostas por Allen *et al.* (2020).

Mesmo considerando o ângulo de incidência mais otimista, 45º, somente salas de aula do terceiro pavimento apresentaram classificação de segurança "Mínima"). Todas as demais foram classificadas como "Ruim". Para a velocidade e 1,0 m/s nenhum ambiente teve classificação "Boa", "Ideal" nem "Excelente". O número de trocas de ar por hora é diretamente proporcional à velocidade considerada para seu cálculo.

A análise da figura 10 revela que salas do primeiro pavimento possuem os piores índices de segurança, enquanto as do terceiro pavimento possuem taxas de renovação de ar superiores. Isso se deu devido à

diferença da altura das aberturas. Quanto mais elevada a sala de aula, maior a velocidade do vento corrigida, gerando assim melhores taxas de ventilação. A figura 11 apresenta os resultados para o fluxo de ar calculado para ventilação unilateral.

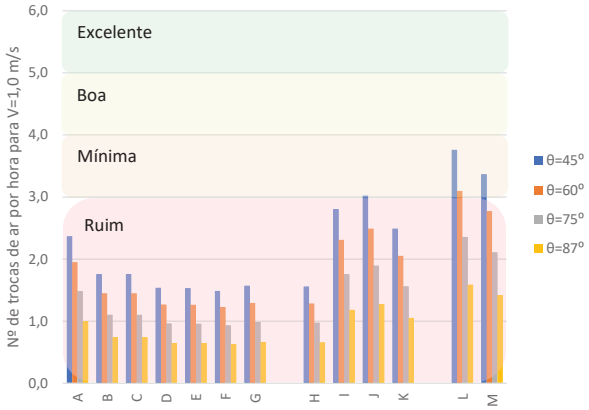

Figura 10 – Número de trocas de ar por hora para V=1,0m/s

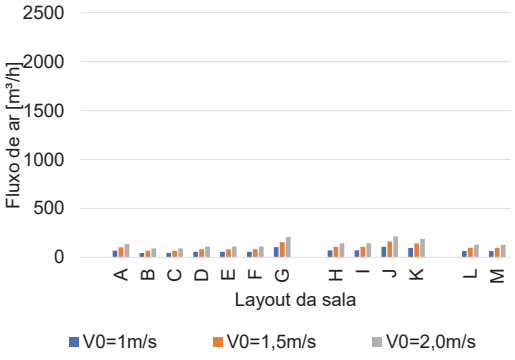

Figura 11 – Fluxo de ar para ventilação unilateral

O ângulo de incidência não afeta os resultados no caso da ventilação unilateral. A magnitude do fluxo de ar é bastante inferior quando em comparação com a ventilação cruzada. Para salas de aula localizadas no terceiro pavimento, a diferença chega a ser de 9,8 vezes, quando comparado com o fluxo proporcionado por ventilação cruzada para inclinação de 45º. Mesmo considerando a incidência mais pessimista (87º), a ventilação cruzada proporciona maiores taxas de ventilação do que a unilateral.

A diferença é tamanha que sequer foram considerados os cenários de ventilação unilateral para projetar a ocupação máxima das salas de aula, apresentada no tópico a seguir, já que as taxas encontradas permitiriam alocar somente entre 2 e 3 pessoas respeitando o fluxo de ar estabelecido por pessoa.

4.2. Ocupação máxima

A figura 12 a seguir apresenta a ocupação máxima registrada para cada sala de aula avaliada, tanto considerando somente a ventilação, como também considerando distanciamento social mínimo de 2 metros entre os ocupantes.

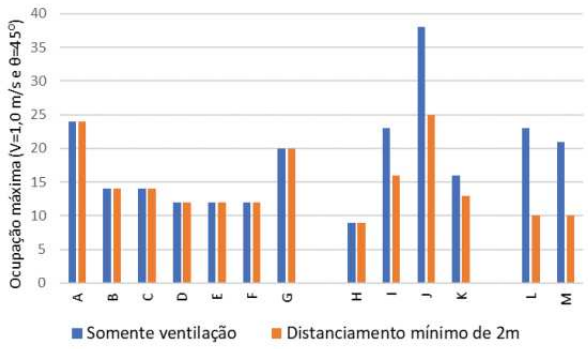

Figura 12 – Ocupação máxima das salas de aula do CTU

A sala com maior ocupação do pavimento térreo é a 1006, que comportaria 24 alunos de forma a manter taxa de ventilação de 27 m³/h por pessoa. Em todas as salas do térreo o fator limitante para a ocupação das salas é taxa de ventilação, sendo possível posicionar as cadeiras respeitando distanciamento de 2 metros.

No primeiro pavimento destaca-se a baixa lotação prevista para as salas Multimeios 2, 3, 4 e 5 (layout H), somente 9 ocupantes. Já a sala 1015 (J) comportaria até 38 pessoas considerando somente as taxas de ventilação. Não seria possível, porém, alocar esse número de cadeiras no ambiente de forma a manter o distanciamento social, quando o limite seria 25.

As demais salas do bloco Norte do segundo pavimento (I) também não comportariam as 23 pessoas previstas considerando as taxas de ventilação. A máxima ocupação possível considerando distanciamento seria de 16 indivíduos. O distanciamento também é fator limitante para as salas do laboratório de informática (K), que teria capacidade para 13 indivíduos cada.

As salas localizadas no segundo pavimento estão sujeitas a maiores velocidades de ar na altura de suas aberturas. O layout L comporta um máximo de 23 pessoas considerando as taxas de ventilação, porém somente 10 mantendo distanciamento. A ocupação máxima considerando distanciamento foi retirada de pesquisas realizadas pelo projeto de extensão com título “Ventilação Natural em Salas de Aula Pós Pandemia” (ATEM et al., 2020).

Verifica-se que para algumas salas de aula o fator limitante é a ventilação, enquanto para outras o fator limitante é a manutenção do distanciamento social de 2 metros entre as cadeiras, considerando o professor.

Na maior parte das salas do CTU, somente a manutenção de distância de 2 metros entre as cadeiras seria suficiente para manter as taxas de ventilação por pessoa acima de 27 m³/h, com exceção de algumas

salas do primeiro pavimento, que são menos ventiladas. Ressalta-se que todas as salas verificadas possuem grandes áreas de abertura, e mesmo assim a ventilação é o parâmetro mais restritivo em alguns casos, sendo assim, verifica-se a importância de estudar as condições de ventilação de cada ambiente de forma individual.

4.3. Probabilidade de contágio.

Os resultados para a probabilidade de contágio após um, e após cem eventos, obtidos a partir da aplicação do método proposto por Jimenez (2020) estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 04 – Avaliação quantitativa da probabilidade infecção por COVID-19 nas salas de aula do CTU

Salas	Probabilidade de infecção de uma pessoa para ocupação original			Probabilidade de infecção de uma pessoa para ocupação reduzida, considerando taxa de ventilação mínima de 27 m³/h por pessoa e distanciamento de 2m			Redução da probabilidade de infecção uma pessoa
	Número de ocupantes	Após uma aula de 50 minutos	Após 100 aulas de 50 minutos	Número de ocupantes	Após uma aula de 50 minutos	Após 100 aulas de 50 minutos	
1006/7	31	0,11%	10,17%	24	0,08%	7,89%	1,29
1008	61	0,29%	25,16%	14	0,06%	6,09%	4,13
1009 / 1010	26	0,12%	11,38%	14	0,06%	6,09%	1,87
1021	61	0,31%	26,54%	12	0,06%	5,50%	4,83
1022 / 1023	61	0,31%	26,45%	12	0,06%	5,48%	4,83
1024	61	0,30%	25,80%	12	0,05%	5,32%	4,85
1025 a 1027	31	0,10%	9,32%	20	0,06%	6,01%	1,55
MM2 / MM3 / MM4 / MM5	31	0,20%	18,29%	9	0,05%	5,24%	3,49
1011, 1016 a 1019	61	0,24%	21,67%	16	0,06%	5,92%	3,66
1012 / 1013	41	0,16%	15,03%	16	0,06%	5,92%	2,54
1014	33	0,13%	12,21%	16	0,06%	5,92%	2,06
1015	41	0,10%	9,85%	25	0,06%	6,03%	1,63
Lab. Inf.	26	0,13%	12,36%	13	0,06%	6,14%	2,01
MM6 a MM10	31	0,14%	13,11%	10	0,04%	4,13%	3,18
MM11	31	0,15%	13,74%	10	0,04%	4,34%	3,17

A sala que apresentava maior probabilidade de contágio considerando sua ocupação original é a 1021, 60 alunos mais professor, com 26,54% de chances de uma pessoa ser infectada após 100 eventos. A sala de ocupação mais segura serias salas 1025, 1026 e 1027, com lotação original de 31 pessoas. Essas salas possuem grandes pranchetas para desenho, possuindo baixa capacidade e grande volume, o que explica a probabilidade de contaminação de 9,32%.

Após a redução do número de ocupantes, utilizando os valores encontrados anteriormente, a probabilidade de contágio foi reduzida entre 1,29 e 4,85 vezes, com média de 3,01. Após a redução a sala que apresentaria maior probabilidade de contaminação de pelo menos um indivíduo após 100 eventos é a 1006/7 (sala única), de 7,89%. O risco médio entre todas as salas de aula seria de 5,74%. Apesar de em primeiro momento os valores não pareceram tão alarmantes, esses resultados implicam em risco de morte cerca de 10 vezes superiores em relação à acidentes de trânsito no trajeto até o evento, informação também obtida pela aplicação da planilha de Jimenez (2020).

5. CONCLUSÕES

A partir dos dados obtidos para o fluxo de ar nas salas de aula do Centro de Tecnologia e Urbanismo da Universidade Estadual de Londrina conclui-se que é necessário limitar a ocupação máxima dos ambientes para reduzir as chances de contaminação por COVID-19 em cenário de volta as aulas anterior à imunização em massa da população.

A sistematização através de uma planilha do modelo de cálculo algébrico é proposta como forma de avaliação simples e rápida das condições de ventilação do ambiente. É preciso ressaltar que o resultado para o fluxo de ar obtido possui baixa precisão inerente à metodologia, que aplica fórmulas com coeficientes aproximados. Dessa forma, deve-se ter cuidado com a tomada de decisões baseadas nesses dados. Recomenda-se adotar parâmetros de rugosidade superestimados, bem como reduzir intensidade média do vento, em prol da segurança.

As taxas de ventilação podem ser fator limitante para determinar a ocupação máxima de salas de aula. Verificou-se que manter distanciamento de 2 metros entre os ocupantes das salas de aula não foi suficiente para manter as taxas de ventilação acima do parâmetro adotado de 27 m³/h por pessoa para algumas salas.

Somente a situação considerando ventilação cruzada gerou ocupações razoáveis das salas de aula. As projeções de fluxo de ar para a ventilação unilateral são muito inferiores, com resultado até 10 vezes menor para algumas salas. Fica claro que salas de aula ventiladas naturalmente de forma unilateral não são seguras em relação à propagação da COVID-19, nem atendem às taxas mínimas de ventilação recomendadas pela literatura.

Sempre que possível devem ser mantidas abertas todas as portas e esquadrias do ambiente, de forma a maximizar as áreas de abertura para a ventilação. Janelas basculantes e do tipo máximo-ar devem ser abertas

em sua inclinação máxima. Recomenda-se fortemente a retirada de cortinas de qualquer tipo que possam obstruir a passagem do ar, bem como outros eventuais obstáculos, como telas de projetor e armários.

A tipologia das esquadrias também exerce grande influência sobre os resultados. As salas de aula do CTU possuem janelas de grandes dimensões, porém possuem baixos ângulos de abertura. As janelas máximo-ar abrem somente entre 30º e 40º, enquanto as basculantes abrem todas somente cerca de 30º. Essa inclinação baixa reduz muito a área útil das aberturas. Uma medida relativamente simples para melhorar as condições de ventilação em novos edifícios, é utilizar esquadrias com melhor aproveitamento.

A comparação dos resultados obtidos para a probabilidade de contágio considerando a ocupação original do ambiente e a ocupação proposta por este estudo indica que há redução significativa do risco de contaminação após ser adotada restrição. Mesmo empregando ventilação cruzada, salas de aula originalmente com capacidade para 61 ocupantes chegaram a ter ocupação reduzida para 12 pessoas.

Ainda que todos os cuidados sejam mantidos, a partir de dados de compilados em 131 países, Li et al. (2020, p. 7) apontam que o fechamento de instituições de ensino como medida de combate à COVID-19 reduz em 15% a transmissão (medida pelo valor de R), e o relaxamento da medida e reabertura das escolas aumenta em 24% após 28 dias. Sendo assim, não se recomenda a retomada das aulas presenciais até a contenção da pandemia.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLEN, Joseph *et al.* **5-step guide to checking ventilation rates in classrooms**. [S.L.]: Harvard T.H. Chan School of Public Health, 2020. 46 slides, color.

ANSI/ASHRAE. **STANDARD 62.1-2013**: Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality. Atlanta: ASHRAE, 2013. 58 p.

ANVISA. **Resolução RE/ANVISA nº 09 de 16 de janeiro de 2003.** [S.L.]: Ministério da saúde, 2003. Disponível em: https://tinyurl.com/yxlngzxa. Acesso em 18 nov. 2020.

ATEM, C. et al. **Ventilação Natural em Salas de Aula Pós Pandemia**. (Projeto de Extensão). Londrina: Universidade Estadual de Londrina. 2020.

BITTENCOURT, Leonardo; CÂNDIDO, Christina. **Introdução à ventilação natural**. 2. ed. Maceió: EDUFAL, 2005. 147 p.

CHAGAS, Elisa. **DataSenado**: quase 20 milhões de alunos deixaram de ter aulas durante pandemia. quase 20 milhões de alunos deixaram de ter aulas durante pandemia. 2020. Disponível em: https://bit.ly/3i8ECbE. Acesso em: 01 jun. 2021.

ETHERIDGE, D. W.; SANDBERG, M. **Building Ventilation**: Theory and Measurement. 1. ed. Chichester: John Wiley & Sons, 1996. 754 p.

FILLIPIN, Natalia. **Coronavírus**: Governo do Paraná determina suspensão das aulas de escolas e universidades públicas a partir de sexta-feira (20), mar. 2020. Disponível em: https://glo.bo/2SlyqCd. Acesso em: 14 out. 2020.

FROTA, Anésia; SCHIFFER, Sueli. **Manual de conforto térmico**: arquitetura, urbanismo. 5. ed. São Paulo: Studio Nobel, 2001. 224 p.

GU, Youyang. **COVID-19 Projections**. 2020. Disponível em: https://covid19-projections.com/brazil. Acesso em: 11 dez. 2020.

IAPAR; MORAIS, Heverly (ed.). **Re: Fw: Solicitação de acesso a dados meteorológicos para estudo científico relacionado à COVID-19**. Destinatário: Pedro Henrique Bruder Decker. Londrina, 28 jan. 2021. 3 mensagens eletrônicas.

IAPAR. **Normais climatológicas de Londrina no período de 1976 a 2019**. Londrina: IAPAR, 2019.

JIMENEZ, Jose**. COVID-19 Aerosol Transmission Estimator**, 27 out 2020. Disponível em: https://tinyurl.com/covid-estimator. Versão 3.4.19. Acesso em: 18 nov. 2020.

JONES, Benjamin M. *et al*. A review of ventilation opening area terminology. **Energy and Buildings**, [S.L.], v. 118, p. 249-258, abr. 2016.

JONES, Nicholas R et al. Two metres or one: what is the evidence for physical distancing in COVID-19? **The BMJ**, [S.L.], v. 3223, n. 370, p. 1-6, 25 ago. 2020.

LAMBERTS, Roberto; DUTRA, Luciano; PEREIRA, Fernando. **Eficiência energética na arquitetura**. 3. ed. Rio de Janeiro: Eletrobras, 2013. p. 173-192.

LI, You *et al.* The temporal association of introducing and lifting non-pharmaceutical interventions with the time-varying reproduction number (R) of SARS-CoV-2: a modelling study across 131 countries. **The Lancet Infectious Diseases**, [S.L.], n. 1473-3099, p. 1-10, out. 2020.

LONDRINA. Secretaria Municipal de Saúde. **Boletim Coronavírus COVID-19**: 31/01/2021. 31/01/2021. 2021. Disponível em: https://bit.ly/34J7hw0. Acesso em: 31 jan. 2021.

ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE. **Transmission of SARS-CoV-2 – implications for infection prevention precautions:** Scientific brief, jul. 2020b. Disponível em: https://www.who.int/publications/i/item/modes-of-transmission-of-virus-causing-covid-19-implications-for-ipc-precaution-recommendations. Acesso em: 15 out. 2020.

ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE. **Timeline of WHO's response to COVID-19**, 2020a. Disponível em: https://www.who.int/news/item/ 29-06-2020-covidtimeline. Acesso em 14 out. 2020.

PARANÁ (Estado). **Resolução SESA N° 276/2017**: Altera o Art. 09 e os anexos, I e II da Resolução SESA n° 604/2015 que trata o Incentivo Financeiro para Aquisição de Equipamentos para as Unidades de Atenção Primária, do Programa de Qualificação da Atenção Primária — APSUS, na modalidade fundo a fundo. Curitiba, 16 jan. 2003.

PARANÁ (Estado). **Resolução SESA N° 632/2020**: Dispões obre medidas complementares de controle sanitário a serem adotadas para o enfrentamento da COVID-19. Curitiba, 5 maio 2020.

SAMÚDIO, M. J. *et al.* A Detailed Indoor Air Study in a School of Porto. In: INTERNATIONAL CONFERENCE AND EXHIBITION ON HEALTHY BUILDINGS, 8., 2006, Lisboa. **Proceedings [...]**. Lisboa: International Society of Indoor Air Quality and Climate, 2006. p. 345-349.

TROEN, L.; PETERSEN, L. **European Wind Atlas**. Roskilde: Risø National Laboratory, 1989.