



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO  
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO  
CENTRO DE ENGENHARIA  
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

HEITOR LUIGI BATISTA

**TÍTULO: DESENVOLVIMENTO DE UM MODELO NUMÉRICO PARA  
AVALIAÇÃO DO TEMPO EM SUSPENSÃO DE PARTÍCULAS DE AEROSSOL EM  
UMA SALA DE AULA.**

MOSSORÓ

2020

HEITOR LUIGI BATISTA

**TÍTULO: DESENVOLVIMENTO DE UM MODELO NUMÉRICO PARA  
AVALIAÇÃO DO TEMPO EM SUSPENSÃO DE PARTÍCULAS DE AEROSSOL EM  
UMA SALA DE AULA.**

Monografia apresentada a Universidade  
Federal Rural do Semi-Árido como requisito  
para obtenção do título de Bacharel em  
Engenharia mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Victor Wagner Freire de  
Azevedo.

MOSSORÓ

2020

©Todos os direitos estão reservados à Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996, e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tornar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata, exceto as pesquisas que estejam vinculadas ao processo de patenteamento. Esta investigação será base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) seja devidamente citado e mencionado os seus créditos bibliográficos.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
Biblioteca Central Orlando Teixeira (BCOT)  
Setor de Informação e Referência (SIR)

|  |
|--|
|  |
|--|

Bibliotecário-Documentalista  
Nome do profissional, Bib. Me. (CRB-15/10.000)

## **DEDICATÓRIA**

Dedico este trabalho a toda minha família. Em especial aos meus pais, Elilson Batista e Sandra Batista e ao meu irmão Pablo Batista, que me apoiaram e me deram forças.

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente agradeço aos meus pais, Elilson José Batista e Sandra Maria Batista, por todos os ensinamentos e por toda paciência quando mais precisei, me dando todo suporte e amor necessário para correr atrás dos meus sonhos.

A toda minha família, em especial ao meu irmão Pablo Einstein Batista e minha avó Maria do Socorro Batista, que me encorajaram e me apoiaram a todo o tempo e que nos momentos difíceis me serviram de força motriz.

A minha namorada Amanda Maia Fernandes de Oliveira, por toda compreensão, incentivo e companheirismo e por me ajudar a enxergar tudo que sou capaz.

A todos os professores ao decorrer do curso, em especial Victor Wagner Freire de Azevedo, pelos ensinamentos, orientação, conselhos e amizade.

Aos amigos que conquistei ao longo dessa jornada, que foram um dos bens mais preciosos que adquiri ao longo da vida acadêmica. Quem tem amigos tem tudo. E meu muito obrigado a própria universidade, UFERSA, por toda estrutura disponibilizada para que tudo isso fosse possível.

*“Se você puder chegar através da neve, da tempestade e da chuva, saberá que poderá chegar quando brilhar o sol e tudo estará bem.”*

**Malcom X**

## RESUMO

A Covid-19 é uma doença com elevado grau de contágio causada pelo vírus Sars-CoV-2. Dentre as formas de propagação do vírus e possível contágio, destaca-se o aerossol originado pelo fenômeno da tosse ou espirro de uma pessoa infectada. Como estudos experimentais são limitados, considerando o alto grau de contágio da doença, a modelagem numérica do problema de escoamento de aerossol é a melhor alternativa para estudo desse fenômeno. Com base nisso, o presente trabalho propõe uma abordagem numérica para estudar o comportamento das partículas de aerossol expelidas por pessoas em um ambiente de sala de aula, onde fatores como ventilação, temperatura, proximidade entre pessoas, objetos e geometria do ambiente influenciam diretamente a propagação e deposição do particulado. O modelo foi desenvolvido no pacote comercial Ansys Fluent utilizando uma abordagem Euler-Lagrange, para modelar um ambiente de sala de aula com injeção de partículas de aerossol originadas por fenômenos de tosse, espirro ou fala. Com os resultados obtidos, pode-se observar e analisar o comportamento do aerossol expelido em sala de aula, como distância máxima percorrida, tempo de suspensão no ar e influência do fluxo de ar em sala de aula, e assim retirar parâmetros comportamentais das partículas expelidas, que podem ser de grande ajuda no quesito prevenção da propagação do vírus em ambiente fechado.

**Palavras-chave:** Covid-19, Aerossol, Euler-Lagrange.

## **ABSTRACT**

Covid-19 is a highly contagious disease caused by the Sars-CoV-2 virus. Among the ways of virus spreading and possible contagion, the aerosol originated by the phenomenon of coughing or sneezing of an infected person stands out. As experimental studies are limited, considering the high contagiousness of the disease, numerical modeling of the aerosol flow problem is one of the best alternatives for studying this phenomenon. Based on this, the present work proposes a numerical approach to study the behavior of aerosol particles expelled by people in a classroom environment, where factors such as ventilation, temperature, proximity between people, objects and geometry of the environment directly influence the propagation and deposition of the particulate. The model was developed following an Euler-Lagrange approach in commercial software Ansys Fluent to model a classroom environment with particle injection originated from coughing, sneeze or talking events. With the obtained results, it is possible to observe and analyze the behavior of the aerosol expelled in the classroom, such as maximum distance covered, length of suspension in the air and influence of the air flow in the classroom and thus obtain behavioral parameters of the expelled particles, which can be of great help in terms of preventing the virus spreading in a closed environment.

**Keywords:** Covid-19, Aerosol, Euler-Lagrange.



## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 – Abordagens para sistemas particulados. (a) Representação microscópica; (b) Representação mesoscópica com fluido contínuo e partículas discretas; (c) Representação mesoscópica com fluido e partícula como fase contínua com interface; (d) Macroscópica com escoamento contínuo unidimensional..... | 21 |
| Figura 2 – Transferência de calor, massa e momento entre as fases discreta e contínua. ....                                                                                                                                                                                                                     | 26 |
| Figura 3 – Modelo de testes 1.....                                                                                                                                                                                                                                                                              | 29 |
| Figura 4 – Modelo de testes 2.....                                                                                                                                                                                                                                                                              | 30 |
| Figura 5 – Representação tridimensional de sala de aula. ....                                                                                                                                                                                                                                                   | 31 |
| Figura 6 – Modelo de sala de aula simplificado utilizado em simulação.....                                                                                                                                                                                                                                      | 32 |
| Figura 7 – Malha principal .....                                                                                                                                                                                                                                                                                | 32 |
| Figura 8 – Concentração de partículas ao longo do tempo, após injeção de fala, em um plano horizontal a 1 metro do solo: (a) 20 segundos; (b) 60 segundos; (c) 80 segundos; (d) 120 segundos. ....                                                                                                              | 34 |
| Figura 9 – Concentração de partículas ao longo do tempo, após injeção de tosse, em um plano horizontal a 1 metro do solo: (a) 20 segundos; (b) 60 segundos; (c) 80 segundos; (d) 120 segundos. ....                                                                                                             | 35 |
| Figura 10 – Concentração de partículas ao longo do tempo, após injeção de espirro, em um plano horizontal a 1 metro do solo: (a) 20 segundos; (b) 60 segundos; (c) 80 segundos; (d) 120 segundos. ....                                                                                                          | 36 |

## LISTA DE GRÁFICOS

|                                                                          |    |
|--------------------------------------------------------------------------|----|
| Gráfico 1 – Concentração média de massa de partículas após fala. ....    | 37 |
| Gráfico 2 – Concentração média de massa de partículas após tosse. ....   | 37 |
| Gráfico 3 – Concentração média de massa de partículas após espirro. .... | 38 |

## SUMÁRIO

|                                                                                    |           |
|------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>LISTA DE GRÁFICOS .....</b>                                                     | <b>11</b> |
| <b>1. INTRODUÇÃO.....</b>                                                          | <b>14</b> |
| <b>2. OBJETIVOS DO TRABALHO.....</b>                                               | <b>15</b> |
| 2.1 OBJETIVO GERAL.....                                                            | 15        |
| 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....                                                    | 15        |
| <b>3. REVISÃO DA LITERATURA RECENTE .....</b>                                      | <b>15</b> |
| <b>4. REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>                                                | <b>18</b> |
| 4.1 SARS-CoV-2 (COVID-19) .....                                                    | 18        |
| <b>4.1.1 Partículas Expiratórias .....</b>                                         | <b>19</b> |
| <b>4.1.2 Suspensão e Deposição de Partículas Aerossol .....</b>                    | <b>20</b> |
| <b>5. SISTEMAS PARTICULADOS .....</b>                                              | <b>21</b> |
| <b>6. MODELAGEM MATEMÁTICA DO ESCOAMENTO MULTIFÁSICO LÍQUIDO-<br/>GASOSO. ....</b> | <b>22</b> |
| 6.1 escoamento Euler-Lagrange.....                                                 | 22        |
| 6.2 Fração volumétrica .....                                                       | 23        |
| 6.3 Número de Stokes.....                                                          | 23        |
| 6.4 Equações de movimento para partícula. ....                                     | 24        |
| 6.5 Forças Adicionais. ....                                                        | 24        |
| 6.5.1 Forças com referenciais móveis. ....                                         | 25        |
| 6.6 Two-Way Coupling. ....                                                         | 25        |
| 6.7 Colisão e Coalescência de Gotículas. ....                                      | 26        |
| 6.8. Modelagem de Turbulência.....                                                 | 27        |
| <b>6.8.1 Modelo <math>k - \varepsilon</math>. ....</b>                             | <b>27</b> |
| <b>6.8.2 Modelo Multifásico de Turbulência.....</b>                                | <b>28</b> |
| <b>7. DOMÍNIO DE CÁLCULO E CONDIÇÕES DE CONTORNO.....</b>                          | <b>29</b> |
| 7.1 Geometria e Condições de Contorno.....                                         | 29        |
| 7.2 Injeção de Partículas.....                                                     | 33        |

|                                      |           |
|--------------------------------------|-----------|
| <b>8. RESULTADOS .....</b>           | <b>33</b> |
| <b>9. CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b> | <b>39</b> |
| <b>REFERÊNCIAS .....</b>             | <b>40</b> |

## 1. INTRODUÇÃO

A atual pandemia de COVID-19 foi reconhecida pela Organização Mundial Da Saúde (OMS) em 11 de março de 2020 (OMS, 2020a). Esta é a maior crise de saúde pública em um século e causou perturbações sociais, econômicas e educacionais a bilhões de pessoas no mundo (INTERNATIONAL COMMISSION ON THE FUTURES OF EDUCATION, 2020).

Pesquisas sugerem que há dois grupos de maior risco: idosos e pessoas com condições médicas pré-existentes como diabetes, hipertensão, asma e obesidade. Porém, todas as pessoas podem se contagiar com a doença com um quadro clínico mais grave ou sendo assintomático, servindo assim como vetor de disseminação do vírus; devendo todos se proteger para, assim, proteger os outros ao seu redor (ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE, 2020a).

Devido estas circunstâncias, a Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA) suspendeu, por tempo indeterminado, as atividades presenciais e congelou o calendário acadêmico da graduação e outros serviços da instituição em 17 de março de 2020 para conter o avanço da doença (UFERSA, 2020).

A *International Commission on the Futures of Education* (2020) afirma que com escolas e universidades fechadas na maioria dos países do mundo, a mudança para o ensino remoto on-line pode exacerbar as desigualdades sociais. De forma a subsidiar tomadas de decisões quanto a uma volta às aulas presenciais, o presente trabalho visa estudar uma das principais formas de contágio, que se trata das partículas respiratórias exaladas através de processos como tosse, espirro, fala, bocejo, dentre outros; em que tais gotículas podem ter tamanho suficiente para transportar o vírus e propagar a doença.

A simulação numérica vem sendo utilizada cada vez mais no ambiente estudantil justamente para facilitar a visualização de determinadas situações sem ser necessária a realização de experimentos práticos. Com a utilização do software comercial Ansys Fluent, foi simulado o possível comportamento das partículas de aerossol expelidas por pessoas em um ambiente de sala de aula, em que fatores como ventilação, temperatura, proximidade das pessoas, objetos no ambiente e até mesmo a própria geometria influenciam diretamente a propagação e deposição do particulado (VUORINENA *et al.*, 2020).

Os resultados aqui obtidos não somente podem definir até onde é seguro estar próximo de outras pessoas em sala de aula para evitar a inalação do ar com gotículas de saliva, mas também servem para demonstrar onde as partículas se depositam, podendo assim abrir discussão sobre a frequência de manutenção da limpeza dos objetos em sala de aula e higiene pessoal dos alunos e professores. Sabe-se que o COVID-19 tem diferentes tempos de vida

dependendo do material em que se encontra, como polímeros, aço inox, papel, madeira (AEROSOL AND SURFACE STABILITY OF SARS-COV-2 AS COMPARED WITH SARS-COV-1, 2020).

Chao *et al.* (2008) diz que de acordo com o tempo de duração de um diálogo e/ou a forma que com que as partículas podem ser expelidas como tosse, bocejo ou espirro, o número de partículas expiratórias no ar aumenta consideravelmente, e isto também deve ser considerado quando se fala em retorno de aulas presenciais, pois dependendo do número de alunos em uma sala de aula, o tempo de duração de cada aula pode ser reduzido. E essas são somente algumas das possíveis discussões sobre o retorno seguro para as salas de aula. Este projeto de conclusão de curso não visa dar soluções imediatas e sim dados qualitativos para auxiliar tais tomadas de decisão.

## **2. OBJETIVOS DO TRABALHO**

### **2.1 OBJETIVO GERAL**

Desenvolvimento de um modelo numérico para analisar o escoamento de aerossóis em um ambiente de sala de aula na UFERSA, considerando fatores como a ventilação do ambiente na dispersão dessas partículas.

### **2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Elaborar um modelo simplificado para estudo do escoamento de aerossóis em um ambiente fechado;
- Estudar a influência da ventilação na dispersão das partículas considerando diferentes velocidades de injeção das partículas;
- Elaborar medidas preventivas para o ambiente fechado com base nos resultados obtidos.

## **3. REVISÃO DA LITERATURA RECENTE**

Existem muitas vias para a disseminação de infecções virais ou bacterianas e, segundo Morawska (2005), dentre as mais significativas está o transporte aéreo de tais microorganismos. Os agentes infectantes podem ser transportados por correntes de ar quando são gerados materiais particulados em forma aerossol durante tosse, espirro, fala, vômito, dentre outras

maneiras. O fator que mais influencia a disseminação e deposição destas partículas é o seu diâmetro, em que o tamanho da gota também influi diretamente na quantidade de microorganismos que nela podem habitar e sendo assim no quão infecciosa pode ser essa nuvem de particulado. Propriedades físicas do ambiente como temperatura, umidade e fluxo do ar também influenciam a distância que o aerossol pode alcançar (MORAWSKA, 2005).

No trabalho de Aliabadi, Rogak, Green e Bartlett (2010) também averiguou-se que o tamanho da gotícula influencia fortemente em seu comportamento no escoamento, onde gotas com maior volume tem um maior momento inicial e percorrem uma distância axial superior as outras gotas em relação ao ponto de injeção e também se precipitam mais rapidamente devido à gravidade, enquanto gotículas menores ficam suspensas por mais tempo no ar próximas à posição vertical de origem.

Por meio de simulações numéricas em dinâmica dos fluidos computacional (CFD), Vuorinen *et al.* (2020) averiguaram que para a faixa de tamanho típica das gotículas originadas da fala e tosse, com diâmetro aproximado de até 20  $\mu\text{m}$ , o tempo de permanência no ar pode chegar até 1 hora e alcançar uma distância de 10 m dependendo das condições do ambiente, podendo assim serem inaladas durante este período e infectando o indivíduo. Além disso, o tempo suficiente para se inalar o aerossol pode variar desde entre 1 segundo e 1 minuto até 1 hora, dependendo da situação, de acordo com testes realizados. Pode-se supor que grande parte da população de infectados pelo Covid-19 pode ter obtido o vírus por meio de inalação de material particulado (VUORINENA *et al.*, 2020).

Milhões de pessoas em todo mundo foram afetadas direta e indiretamente pela pandemia do Covid-19, seja contraindo a doença ou sofrendo as consequências do isolamento social, que vão desde a problemas financeiros até psicológicos. Pelo fato de que o Sars-CoV-2 é transmitido principalmente por meio de exalações das vias aéreas de pessoas infectadas, os sistemas de ventilação, resfriamento e aquecimento de ambientes podem desempenhar um papel no aumento ou na redução da propagação da infecção em ambientes internos (BORRO *et al.*, 2020). Em seu artigo, Borro *et al.* (2020) realizaram um estudo sobre a influência de tais sistemas em um Hospital Estadual para crianças, onde ao analisar diferentes ambientes do hospital, constatou-se que fluxos de ar podem aumentar consideravelmente a difusão das gotículas em um ambiente durante um evento de tosse. Ao mesmo tempo, os resultados mostraram que, ao se utilizar sistemas de ventilação de exaustão, a concentração de contaminantes no ar diminui consideravelmente, principalmente se forem instalados sistemas individuais de exaustão em leitos, onde forem obtidos os melhores resultados em relação à diminuição do risco de contágio.

A dinâmica computacional de fluidos pode fornecer um bom custo-benefício em relação ao estudo de partículas aerossóis e recebeu um amplo desenvolvimento nos últimos anos, onde algumas simulações apresentam resultados promissores que capturam as principais características do fluxo dos fenômenos neles estudados (LU, 1999). Apresenta, assim, certa vantagem em relação aos experimentos práticos, em que um mesmo ambiente de simulação pode-se repetir inúmeras vezes um mesmo procedimento dentro das mesmas condições de contorno, sem esperar grandes variações e sem desperdício de material e equipamento. Vale salientar que a realização de experimentos ainda se faz necessário para validação dos modelos numéricos, uma vez que eles apresentam aproximações dos fenômenos reais.

Em Celline (2017) é realizado um estudo sobre a influência de uma ventilação personalizada dentro de uma cabine de aeronave, onde constata-se por meios experimentais práticos e revisões de literatura que a incidência de partículas expiratória é uma das maiores causas de propagação de vírus e bactérias, gerando tanto contaminação direta quanto indireta. No decorrer do trabalho, viu-se que tanto a forma de ventilação, temperatura e umidade do ar dentro de uma cabine de aeronave podem facilitar ou dificultar a disseminação das partículas e, ao realizar-se os experimentos de forma mais próxima possível da realidade de um voo, tentou-se ajustar tais condições para, além de diminuir o risco de contaminação, não influenciar negativamente no conforto térmico dos passageiros. Os ensaios foram conduzidos em um mock-up de 12 lugares simulando o interior de uma aeronave, onde foram colocados 2 geradores de partículas para simular o ambiente e testar o sistema de ventilação personalizado. O sistema, dependendo do local onde foi instalado, conseguiu reduzir aproximadamente entre 40% e 65% das partículas expiratórias, gerando assim um resultado satisfatório.

Oliveira e Hallak (2020) realizaram por meio de modelagem computacional, no Software Ansys AIM Academic, um estudo sobre a trajetória das gotículas de saliva humana durante determinadas atividades físicas. Foram determinados 3 casos de estudo, que são, um corpo humano parado em pé, um com velocidade de caminhada de 1,2 m/s, e outro com velocidade de corrida de 4 m/s, cujas simulações foram realizadas com parâmetros próximos à realidade e obtiveram-se resultados próximos do esperado, de acordo com o referencial teórico. No caso do corpo parado, as partículas chegaram a uma distância de até 4 m e, nos casos de corrida e caminhada, foram identificadas partículas em todo o domínio, no qual conclui-se que os distanciamentos recomendados para os casos de caminhada leve e corrida são, respectivamente, 5 e 10 metros. Quanto maior a velocidade do corpo mais as partículas se distanciam da origem, podendo infectar pessoas a uma distância maior. Notou-se também que indivíduos que estejam



em altura abaixo da fonte do particulado estão mais propensos a receber diretamente as partículas, devendo assim ter um cuidado maior com crianças.

#### **4. REFERENCIAL TEÓRICO**

##### **4.1 SARS-COV-2 (COVID-19)**

De acordo com a OMS (2020b), COVID-19 é uma doença infecciosa causada por um novo coronavírus. Ambas, a doença e o vírus, eram desconhecidos até antes de um surto em Wuhan, China. Atualmente, no momento de publicação desta monografia, a doença é considerada uma pandemia.

A maioria das pessoas apresenta melhora desta doença sem intervenção médica, porém 1/5 dos infectados podem desenvolver complicações, principalmente as pessoas no grupo de risco (idosos e pessoas com complicações médicas preexistentes). Entretanto, qualquer pessoa pode ficar severamente doente por COVID-19 (OMS 2020b).

O vírus se espalha de uma pessoa para outra principalmente através de gotículas expelidas pelo nariz ou boca de pessoas contaminadas quando elas tosse, espirram ou falam. Por esse motivo, a OMS (2020b) recomenda que as pessoas mantenham-se a pelo menos 1 m de distância umas das outras e que façam o uso de máscaras em certas situações para que evitem respirar estas gotículas.

Além disso, estas gotículas podem cair sobre superfícies e objetos. Quando pessoas têm contato com essas superfícies e depois tocam seus olhos, boca ou nariz, elas podem infectar-se. Por isso também é importante lavar regularmente as mãos com água e sabão ou usar produtos para higienizar mãos à base de álcool (OMS 2020b).

O objetivo geral da OMS quanto ao surto de coronavírus é controlar a situação suprimindo a transmissão do vírus, prevenindo assim mais mortes e enfermidades (ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE, 2020b). Segundo a *World Health Organization* (2020), como a transmissão pode ocorrer em diferentes circunstâncias, seja por aspiração de aerossóis contaminados ou por fômites (superfícies contaminadas), a OMS recomenda um abrangente conjunto de medidas de prevenção, além de incentivar os estudos de caso para investigar diferentes situações de transmissão. Resumidamente as medidas são:

- Identificar os casos suspeitos o mais breve possível e isolar eles e todas os contatos próximos, pois são possíveis infectados.

- Utilizar máscaras em ambientes públicos, evitar locais fechados, aglomerações e contato físico.
- Sempre higienizar as mãos, lavando-as, e quando não for possível fazer desinfecção com álcool 70°.

#### **4.1.1 Partículas Expiratórias**

Segundo Morawska (2005), a causa mais comum de contração de doenças infecciosas em locais fechados são os vírus, principalmente os relacionados a problemas respiratórios e gastrointestinais. A cada dia milhões de pessoas sofrem com infecções virais, que vão desde um resfriado comum ou uma gripe, até casos mais complexos e recentes como o coronavírus. E isso influencia não somente a economia mundial devido aos gastos médicos e custos de perda de renda devido a faltas no trabalho, mas também afeta gravemente na qualidade de vida das pessoas e em como elas podem interagir entre si, pois em alguns casos a única maneira de se lutar contra um vírus é somente o isolamento e/ou distanciamento social.

As pessoas são as principais fontes de contaminação de um ambiente fechado, como uma sala de aula ou um escritório, com vírus e bactérias durante processos expiratórios como tosse, fala, espirro, soluço e bocejo que emitem gotículas pequenas o suficiente para ficarem suspensas no ar ou se depositarem sobre alguma superfície (CELLINE, 2017).

De acordo com Morawska (2005), existem diversas vias de contaminação viral, mas as principais são humano-humano, que incluem contato direto com a pessoa infectada, como abraços ou beijos e contato indireto, através de um objeto intermediário, contaminado previamente pelas mãos do infectado ou algum de seus processos expiratórios. A outra forma mais comum é a transmissão via ar, que pode ser desde contato com gotículas expiratórias no ar, até flocos de pele e fungos.

O grau de periculosidade de um vírus ou bactéria é controlado por alguns fatores como, o tipo de vírus e seu risco biológico, modo como ele é expelido do corpo, distribuição e tamanho da gotícula aerossol quando ela sai do corpo, níveis de concentração, padrão de circulação do ar, umidade, temperatura, incidência de luz solar, oxigenação, entre outros fatores físicos (MORAWSKA, 2005).

#### 4.1.2 Suspensão e Deposição de Partículas Aerossol

Como descrito em Tang, Y. e Guo, B (2011), um aerossol é uma suspensão de partículas sólidas ou líquidas em um gás, sendo que os aerossóis estão presentes naturalmente na atmosfera, proveniente de vulcões, rios, mares, tempestades de poeira, incêndios, dentre outras fontes naturais; inclusive os seres humanos, sendo gerados por fenômenos de tosse, espirro, fala, dentre outros. O aerossol é comumente utilizado como forma de entrega de drogas para tratamentos terapêuticos, ou também pode ser encontrado como subproduto da queima de combustíveis fósseis, os quais afetam diretamente a atmosfera, alterando a visibilidade e o clima, e prejudicando a saúde humana quando inalado, além de ser uma das principais vias de transporte de microorganismos danosos a saúde humana. Portanto, um conhecimento sobre as propriedades do aerossol se faz necessário para saber trabalhar com ele.

As partículas expelidas por um ser humano podem ter um diâmetro que varia de 5 a 2000  $\mu\text{m}$  e dependendo da ação em que ocorre a injeção dessas partículas no ambiente, como tosse, espirro e fala, a faixa de diâmetro médio pode variar (ALIABADI; ROGAK; GREEN; BARTLETT, 2010). Segundo Chao *et al.* (2008), a velocidade média do ar que sai durante a tosse é 11,7 m/s e na fala é 3,9 m/s, o diâmetro geométrico da gotículas é de 13  $\mu\text{m}$  aproximadamente na tosse e 16  $\mu\text{m}$  durante a fala, e o número total de partículas varia de 947 a 2085 por tosse e 112 a 6720 durante a fala (depende do tempo e da intensidade de cada ato). Já a concentração de gotículas no ar para a tosse é entre 2,4 a 5,2  $\text{cm}^{-3}$  e 0,004 até 0,223  $\text{cm}^{-3}$  durante a fala. De acordo com Duguid (1946), partículas desse tamanho podem ser facilmente aspiradas pelas pessoas, pois ficam suspensas no ar.

Morawska (2005) expõe que uma vez dispersas no ar, partículas expiratórias podem vir a sofrer mudanças físicas e/ou químicas, podendo alterar composição, densidade, tamanho e comportamento do aerossol. Uma alteração bastante comum é a coagulação de partículas, que ocorre quando duas ou mais se colidem e somam seus volumes, podendo ou não precipitar e se depositarem em superfícies.

O Artigo “Aerosol And Surface Stability Of Sars-Cov-2 As Compared With Sars-Cov-1” (2020) faz um estudo comparativo entre o vírus Sars-Cov-2 (Covid-19) e o Sars-Cov-1. Esse estudo traz o tempo médio de vida do vírus causador da Covid-19 em diferentes situações, mostrando que ele permanece ativo em aerossóis suspensos no ar por pelo menos 3 horas, em uma superfície de aço inoxidável durante 48 horas, em plásticos por 72 horas, em superfícies de cobre por volta de 4 horas e em papelão o tempo de vida durou em torno de 24 horas. Tais informações são de extrema importância para o estudo do comportamento do vírus em

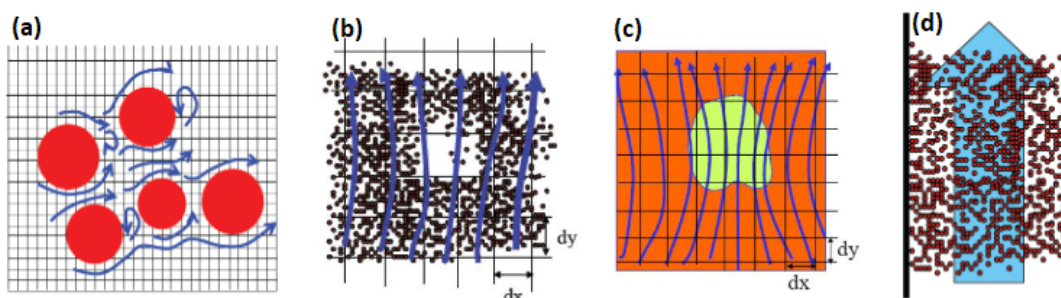
ambientes de trabalho, acadêmicos e nas residências, pois são materiais amplamente utilizados nessas localidades.

## 5. SISTEMAS PARTICULADOS

Lai (2013) expõe em sua dissertação que dentro do regime de transporte de partículas existem diferentes maneiras de se analisar um padrão de escoamento particulado e a escolha correta de qual utilizar faz grande diferença na forma de análise e nos resultados obtidos. Podemos observar na Figura 1 as escalas macroscópica, mesoscópica e microscópica que se diferem da seguinte maneira:

- Macroscópica: O escoamento como um todo é considerado uma única fase, e a influência das partículas representa-se pelas propriedades médias no meio fluido.
- Microscópica: Proporciona a solução e a visualização da interface partícula-fluido, pois considera as forças e efeitos sobre cada partícula individualmente.
- Mesoscópica: Diferente da microscópica, representa o escoamento do fluido através das propriedades médias. A trajetória das partículas pode ser representada tanto de forma lagrangeana (discreta) como também euliana (contínua).

Figura 1 – Abordagens para sistemas particulados. (a) Representação microscópica; (b) Representação mesoscópica com fluido contínuo e partículas discretas; (c) Representação mesoscópica com fluido e partícula como fase contínua com interface; (d) Macroscópica com escoamento contínuo unidimensional.



Fonte: Adaptado de Lai (2013).

No presente trabalho é utilizada uma escala mesoscópica, pois existe um número considerável de partículas a serem observadas, ao mesmo tempo que necessita de um certo nível de detalhamento e interação da fase das partículas. As partículas neste sistema de escala podem

ser representadas de maneira contínua pela abordagem euleriana ou discreta pela abordagem lagrangeana.

Segundo Gidaspow (1994), em uma abordagem euleriana o particulado é considerado de forma estatística, que considera um campo de probabilidade de existência das frações volumétricas de cada fase em uma região do escoamento. Em vez de calcular a trajetória das partículas, tal técnica é conhecida como promediação local da presença das partículas. Em Massarani (2001), vemos que, em uma abordagem lagrangeana, a trajetória e as forças de interação são efetuadas individualmente para cada partícula, nas quais as trajetórias das partículas são definidas pelas leis do movimento, de Newton, e as forças de interação sobre as partículas são modeladas conforme cada situação. Para o problema aqui proposto, é utilizada uma abordagem lagrangeana, pois tem um melhor nível de detalhamento das informações e análises obtidas da dinâmica do escoamento particulado, mas por outro lado, é mais exigente computacionalmente (LAI, 2013).

## **6. MODELAGEM MATEMÁTICA DO ESCOAMENTO MULTIFÁSICO LÍQUIDO-GASOSO.**

Como visto em Ansys (2013a), os regimes de fluxo multifásico são agrupados em quatro categorias: gás-líquido ou líquido-líquido, gás-sólido, líquido-sólido e fluxos trifásicos (que possuem os três tipos anteriores).

### **6.1 ESCOAMENTO EULER-LAGRANGE.**

Avanços na mecânica dos fluidos computacional forneceram a base para uma visão mais aprofundada no conhecimento sobre a dinâmica dos escoamentos multifásicos. Existem duas principais abordagens para o cálculo numérico multifásico, que são a Euler-Euler e a Euler-Lagrange, que no presente trabalho iremos fazer uso e nos aprofundar na abordagem Euler-Lagrange (ANSYS, 2013b).

Segundo Ansys (2013a), o modelo de fase discreta Lagrangeana segue a abordagem de Euler-Lagrange, na qual a fase fluida é tratada de forma contínua, resolvendo as equações de Navier-Stokes. Enquanto a fase dispersa é solucionada rastreando um grande número de partículas, bolhas ou gotículas através do campo de fluxo rastreado, pode-se trocar momento, massa e energia com a fase de fluido contínuo. As trajetórias das partículas são calculadas individualmente em intervalos de tempo especificados durante o cálculo da fase de fluido

contínuo, tornando o modelo adequado para secadores spray, combustão de carvão, líquidos inflamáveis entre outros fluxos carregados de partículas.

## 6.2 FRAÇÃO VOLUMÉTRICA

Uma fração volumétrica  $\alpha$  de uma certa fase  $\beta$ ,  $\alpha_\beta$ , é determinada pelo volume que a fase  $\beta$  ocupa em  $V_\beta$ , em relação ao volume local da mistura  $V_m$ . Neste trabalho são consideradas duas frações volumétricas, uma para a fase fluida (g) e outra para a fase particulada (l), presentes nas seguintes Equações 1 e 2, respectivamente, em que  $V_m = V_g + V_l$  e a soma das frações volumétricas devem ser igual a um,  $\alpha_g + \alpha_l = 1$  (CRUZ, 2018).

$$\alpha_g = \frac{V_g}{V_g + V_l} \quad (1)$$

$$\alpha_l = \frac{V_l}{V_l + V_g} \quad (2)$$

## 6.3 NÚMERO DE STOKES

Segundo Lai (2013), em escoamentos diluídos, o número de Stokes em relação ao domínio de escoamento pode auxiliar a determinar o regime de transporte das partículas. O número de Stokes  $St_D$  é determinado pela fração entre o tempo de resposta da partícula  $\tau_p$  e o tempo de resposta do fluido  $\tau_f$ .

$$St_D = \frac{\tau_p}{\tau_f} \quad (3)$$

$$\tau_p = \frac{\rho_p d_p^2}{18\mu_\beta} \quad (4)$$

$$\tau_f = \frac{L_C}{u_{\beta,c}} \quad (5)$$

Onde  $\mu_\beta$  é a viscosidade dinâmica,  $L_C$  o comprimento característico do domínio e  $u_{\beta,c}$  a velocidade característica do fluido. Em seu trabalho, Cruz (2018) expõe que o número de Stokes do sistema quantifica a inércia do movimento da partícula em relação à mudança no campo do

escoamento. Para  $St_D \ll 1$  as partículas não alteram o campo de escoamento,  $St_D \approx 1$  ocorrem mudanças no campo do escoamento através das trajetórias das partículas e com  $St_D \gg 1$  o movimento da partícula independe da interação com o fluido.

#### 6.4 EQUAÇÕES DE MOVIMENTO PARA PARTÍCULA.

De acordo com Ansys (2013a), a trajetória de uma partícula de fase discreta é prevista analisando o equilíbrio de forças na partícula, que é descrito em um referencial Lagrangeano. Este equilíbrio de forças é equivalente à inércia da partícula com as forças que atuam na partícula, e pode ser escrito como:

$$\frac{d\vec{u}_p}{dt} = F_D(\vec{u} - \vec{u}_p) + \frac{\vec{g}(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + \vec{F} \quad (6)$$

Onde  $\vec{F}$  é um termo de aceleração adicional (força/massa unitária da partícula) e  $F_D(\vec{u} - \vec{u}_p)$  é a força de arrasto por unidade de massa da partícula, descrito a seguir:

$$F_D = \frac{18\mu}{\rho_p d_p^2} \frac{C_D R_{ep}}{24} \quad (7)$$

Onde  $\vec{u}$  é a velocidade da fase fluída,  $\vec{u}_p$  representa a velocidade da partícula,  $\mu$  é a viscosidade molecular do fluido,  $\rho$  é a densidade do fluido,  $\rho_p$  é a densidade da partícula e  $d_p$ , o diâmetro da partícula.  $R_{ep}$  é o número relativo de Reynolds da partícula, que é definido como:

$$R_{ep} \equiv \rho d_p \frac{|\vec{u}_p - \vec{u}|}{\mu} \quad (8)$$

#### 6.5 FORÇAS ADICIONAIS.

Forças adicionais como massa virtual e forças de gradiente de pressão não se fazem necessárias devido à densidade do fluido ser muito menor que a densidade das partículas, como

é o caso deste trabalho, onde partículas líquidas/sólidas estão em meio a um fluxo gasoso (ANSYS, 2013a).

#### 6.5.1 FORÇAS COM REFERENCIAIS MÓVEIS.

O termo  $\vec{F}$  de força adicional também inclui forças nas partículas que surgem devido à rotação do referencial. Para uma rotação definida em volta do eixo, as forças nas direções cartesianas das partículas podem ser descritas como:

$$\left(1 - \frac{\rho}{\rho_p}\right)\Omega^2 x + 2\Omega\left(u_{p,y} - \frac{\rho}{\rho_p}u_y\right) \quad (9)$$

Onde  $u_{p,y}$  e  $u_y$  são as velocidades de partículas e fluido na direção y cartesiana e  $\Omega$  é o RPM.

$$\left(1 - \frac{\rho}{\rho_p}\right)\Omega^2 y + 2\Omega\left(u_{p,x} - \frac{\rho}{\rho_p}u_x\right) \quad (10)$$

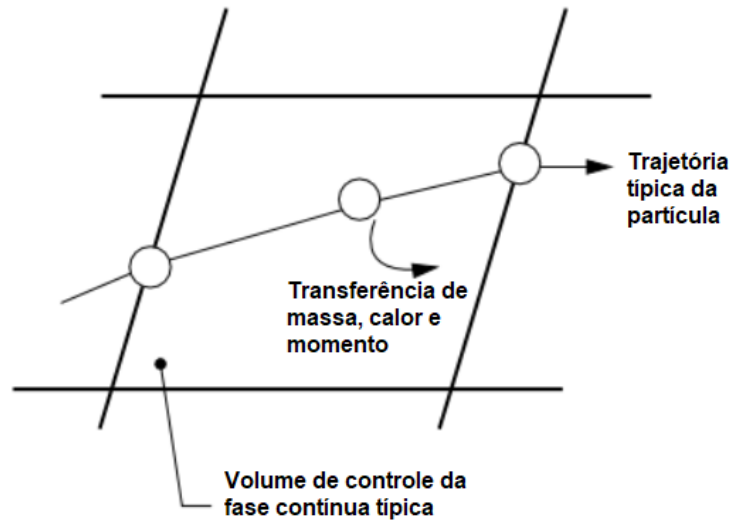
$u_{p,x}$  e  $u_x$  são as velocidades de partículas e fluido na direção x cartesiana.

#### 6.6 TWO-WAY COUPLING.

Este “acoplamento bidirecional” é realizado enquanto calcula-se a trajetória da partícula e rastreia-se calor, massa e o momento ganhos ou perdidos para o fluido, as equações das fases discretas e contínuas são resolvidas de maneira alternada, até que as soluções em ambas as partes não apresentem mais alterações. O fluido influencia a fase particulada por meio do arrasto e turbulência, e as partículas influenciam o fluido por meio da redução do momento e também turbulência. Tal comportamento é representado de forma qualitativa na Figura 2.



Figura 2 – Transferência de calor, massa e momento entre as fases discreta e contínua.



Fonte: Imagem adaptada de ANSYS (2013a).

## 6.7 COLISÃO E COALESCÊNCIA DE GOTÍCULAS.

Neste trabalho a simulação inclui rastreamento de gotas e para isso o número de colisões de gotículas podem ser estimados para complementar a modelagem. A principal dificuldade encontrada neste cálculo é que para cada  $N$  Número de gotas existe um total de  $N - 1$  possíveis parceiros de colisão. Assumindo que um gota A se chocando com uma B é idêntico a uma gota B colidindo com uma A, temos assim que o possível número de pares de colisão é de  $\frac{1}{2}N^2$ (ANSYS, 2013a).

O algoritmo de colisão deve calcular  $\frac{1}{2}N^2$  possíveis eventos de colisão a cada passo de tempo e como um aerossol pode dispor de milhões de partículas, o custo computacional seria exorbitante e por isso é utilizado o conceito de parcelas, em que pacotes são representações estatísticas de diversas gotículas individuais. Se cada grupo de parcelas que o software representa conter 1000 partículas, o custo de cálculo é reduzido por um fator de  $10^6$ , mesmo assim ainda seria um grande custo computacional, de acordo com Ansys (2013).

Utilizando o algoritmo desenvolvido por O'Rourke (1981, **apud ANSYS, 2013a**), consegue-se uma redução significativa do custo de simulação da pulverização, pois o método de O'Rourke é uma estimativa estocástica de colisões e não se faz necessário a utilização de geometria para ver se o caminho de cada parcela de gotas se cruzam. Assume-se que duas parcelas só podem colidir se estiverem na mesma célula de fase contínua, evitando que gotas

muito próximas umas das outras, mas em diferentes células, colidam, prevenindo erros de cálculo.

Assim que ocorre a colisão das duas parcelas, o algoritmo determina o tipo de colisão. O número colisional de Weber  $We_c$  é utilizado para calcular a probabilidade de cada resultado, em que o estado das parcelas em colisão é alterado com base no resultado da colisão.

$$We_c = \frac{\rho U_{rel}^2 \bar{D}}{\sigma} \quad (11)$$

Onde  $U_{rel}$  é a velocidade relativa entre duas parcelas e  $\bar{D}$  é o diâmetro médio aritmético das duas parcelas.

## 6.8. MODELAGEM DE TURBULÊNCIA.

Com o uso de modelos turbulentos de duas equações, podemos determinar ambas as escalas de turbulência de comprimento e de tempo solucionando duas equações de transporte separadas. O modelo  $k - \varepsilon$  standard (padrão) se enquadra nesta categoria e possui robustez, economia e precisão para uma vasta gama de fluxos turbulentos, sendo muito utilizado nas simulações. É um modelo semi-empírico e a derivação das equações do modelo se baseiam em considerações fenomenológicas e empirismo. Já o modelo  $k - \omega$  padrão é um modelo empírico baseado nas equações de transporte do modelo para a energia cinética turbulenta ( $k$ ) e a taxa de dissipação específica ( $\omega$ ), que pode ser também considerada como a razão entre  $\varepsilon$  e  $k$  (ANSYS, 2013a).

### 6.8.1 Modelo $k - \varepsilon$ .

O modelo  $k - \varepsilon$  padrão possui duas variações com algumas melhorias dentro do Ansys Fluent, que são a  $RNGk - \varepsilon$  e a  $Realizablek - \varepsilon$ , que é a utilizada para a solução do problema proposto neste trabalho, pois apresenta um melhor desempenho se comparada aos demais modelos em diferentes tipos de escoamento (ANSYS, 2013a).

A variação  $Realizablek - \varepsilon$  possui as seguintes equações de transporte para a energia cinética turbulenta  $k$  e para a taxa de dissipação da turbulência  $\varepsilon$ , respectivamente representadas pelas Equações 12 e 13, abaixo (CRUZ, 2018).

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (12)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \varepsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S \varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b + S_\varepsilon \quad (13)$$

Sendo,  $C_1 = \max \left[ 0,43; \frac{\eta}{\eta+5} \right]$ ,  $\eta = S \frac{k}{\varepsilon}$ ,  $S = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}}$ . Em que  $G_k$  é a geração de energia cinética turbulenta devido ao gradiente de velocidade média e  $G_b$  devido ao empuxo,  $Y_M$  é a contribuição da flutuação na dilatação volumétrica em escoamentos turbulentos compressíveis no total da taxa de dissipação,  $C_2$  e  $C_{1\varepsilon}$  são constantes,  $\sigma_k$  e  $\sigma_\varepsilon$  representam os números de Prandtl turbulentos para  $k$  e  $\varepsilon$ ,  $S_k$  e  $S_\varepsilon$  são termos fontes definidos pelo usuário (CRUZ, 2018).

### 6.8.2 Modelo Multifásico de Turbulência.

Podemos observar em Ansys (2013a), que em um escoamento multifásico, o elevado número de termos a serem modelados nas equações de momento torna este tipo de modelagem de turbulência bastante complexa. O Ansys Fluent possui três métodos para modelar turbulência em fluxos multifásicos dentro do contexto dos modelos  $k - \varepsilon$  e  $k - \omega$ , que são:

- Mixture turbulence model (modelo de turbulência de mistura): É o modelo padrão do software e representa a primeira extensão do modelo  $k - \varepsilon$  monofásico e se aplica quando as fases se separam em fluxos multifásicos estratificados ou quase estratificados e quando a razão das densidades das fases é próxima a 1. O uso de propriedades e velocidades de misturas é suficiente para capturar características importantes do fluxo turbulento.
- Dispersed turbulence model (modelo de turbulência dispersa): É adequado quando a fase primária é contínua e as concentrações das fases secundárias são diluídas ou quando se usa o modelo granular.
- Turbulence model for each phase (modelo de turbulência para cada fase): Este modelo resolve um conjunto de equações  $k$  e  $\varepsilon$  para cada fase e é apropriado quando a transferência de turbulência tem um papel dominante no problema.

No presente trabalho se faz uso do modelo de turbulência disperso, pois se enquadra melhor nas condições aplicadas ao problema proposto.

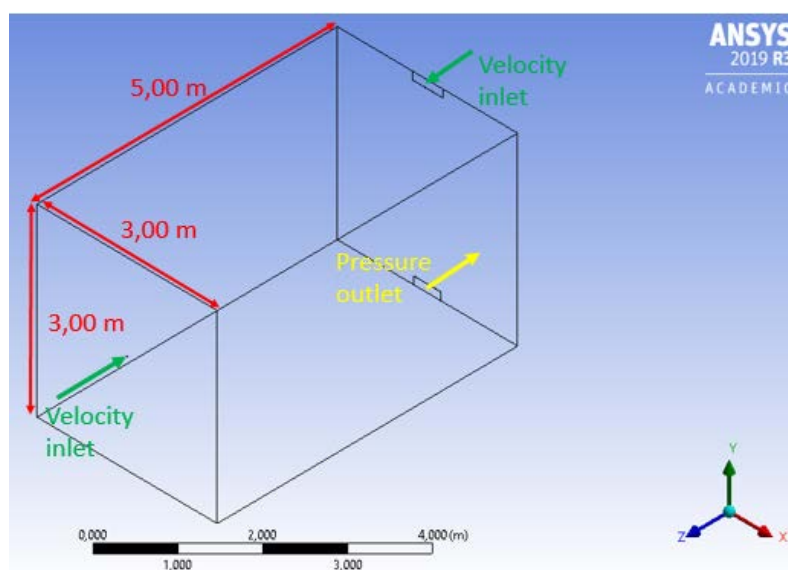
## 7. DOMÍNIO DE CÁLCULO E CONDIÇÕES DE CONTORNO.

A modelagem e análise comportamental da simulação da injeção de partículas em ambiente de sala de aula foi realizada numericamente por meio do auxílio do software Ansys Fluent® versão 19.3, licença acadêmica, que utiliza o método dos volumes finitos para discretização das equações governantes. Utilizando uma abordagem Euler-Lagrange para representar uma mistura gás-líquido, aplica-se o modelo de dispersão para modelar a fase contínua (Ar) e o modelo de fase discreta para aproximar o aerossol como partículas expiratórias. O modelo de turbulência utilizado acopla ambas as abordagens, contínuas e discretas. Os cálculos foram executados com um número de passos de tempo igual a 500, com um tamanho de passo de tempo igual a 2 segundos e com uma iteração máxima de 300 etapas, em que tais valores estão dentro dos critérios de estabilidade.

### 7.1 GEOMETRIA E CONDIÇÕES DE CONTORNO.

Inicialmente foram utilizadas as duas geometrias mais simples presentes nas Figuras 3 e 4 para testes de parâmetros e ferramentas do software, e também observar o comportamento do aerossol em algumas situações até se estabelecer condições de contorno próximas às condições reais da sala de aula, com base na potência computacional disponível. Assim, pôde-se otimizar as escolhas de condições de contorno com simulações relativamente mais leves.

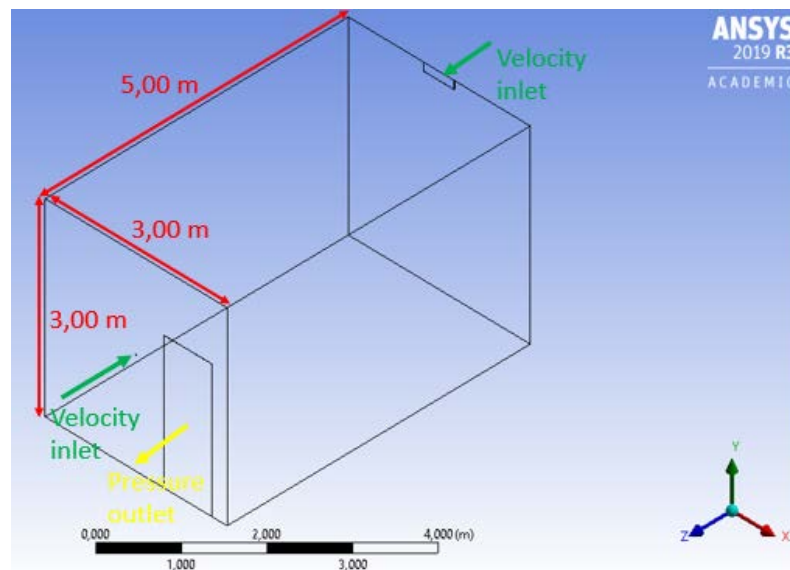
Figura 3 – Modelo de testes 1.



Fonte: Autoria Própria (2020).

Ambos os modelos de testes possuem as mesmas dimensões e a mesma localização, tanto do orifício de injeção da mistura de partículas e ar, que possui 10 mm de diâmetro e está a 1,60 m de altura, quanto da entrada de ar com as dimensões 0,125 x 0,5 m. E alterando somente a saída de ar da sala que no Modelo 1 tem as mesmas dimensões da entrada e fica no lado oposto da parede, e no Modelo 2 a saída de ar simula uma porta com 2,10 x 0,8 m na mesma parede do orifício de injeção.

Figura 4 – Modelo de testes 2.

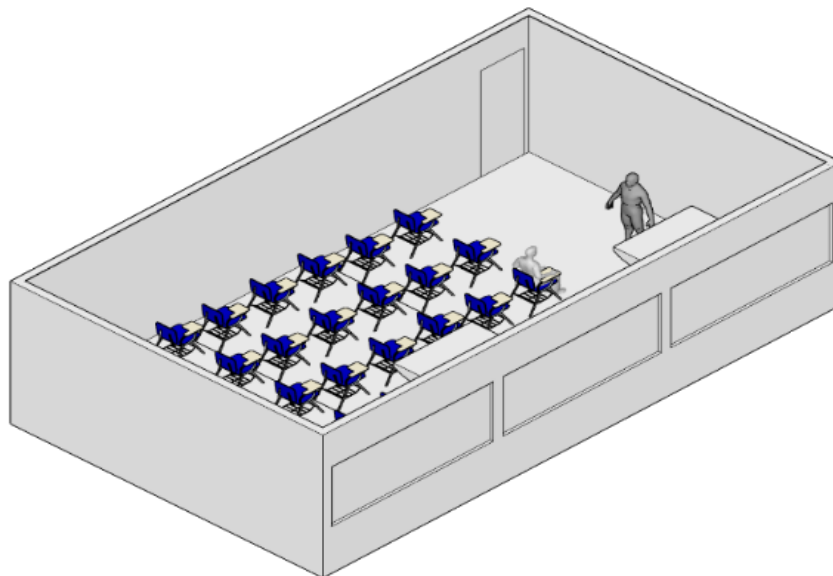


Fonte: Autoria Própria (2020).

Com os testes realizados e resultados obtidos com os modelos 1 e 2, foi possível se aproximar das configurações utilizadas na injeção de partículas do modelo de sala de aula utilizado posteriormente. Os resultados obtidos foram omitidos no presente trabalho.

As condições de contorno aqui adotadas foram analisadas e testadas para se conseguir uma injeção de partículas que se aproximem o máximo possível com as condições reais de um espirro/tosse em um ambiente fechado, mas que sejam simplificadas o suficiente para que seja possível a simulação com o sistema computacional disponível. Na Figura 5 está representada uma maquete 3D de uma sala de aula semelhante às salas da UFERSA, que serviu de base para a modelagem no Ansys da geometria simplificada da Figura 6, utilizada na simulação das partículas expiratórias em sala de aula.

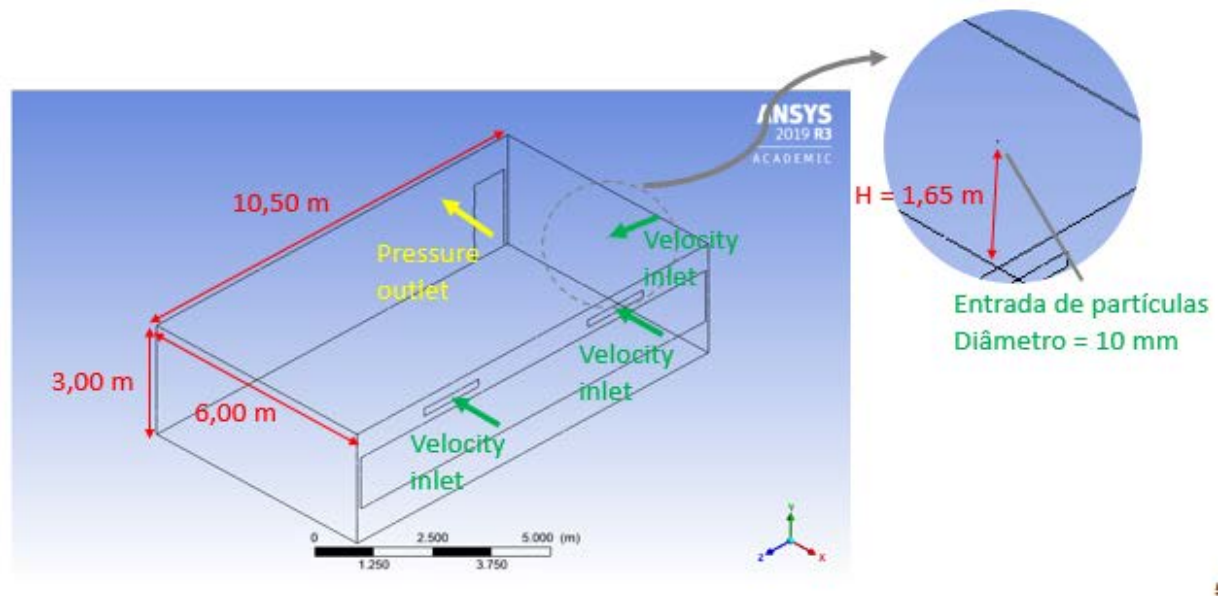
Figura 5 – Representação tridimensional de sala de aula.



Fonte: Autoria Própria (2020).

Na Figura 6 pode ser observado o domínio utilizado para representar a sala de aula, que possui duas entradas de ar a 2,50 m do solo representando os ares-condicionados com dimensões 1,63 x 0,20 m e permitem a entrada do ar a uma velocidade constante de 0,1 m/s, uma porta com 2,10 x 0,90 m que permite a livre saída dos fluxos de ar e partículas, as paredes e a janela com dimensões de 1,40 x 10,30 m e 0,90 m de peitoril, em que ambas, paredes e janelas, são fixas e prendem as partículas que se depositam sobre elas. E, por último, um pequeno orifício na parede ortogonal à porta que é responsável pela injeção de partículas no ambiente, representando a região do nariz e boca do professor em sala de aula voltado para a direção dos alunos (ver detalhe na Figura 6). A aceleração gravitacional é considerada como  $9,81 \text{ m/s}^2$  no sentido negativo do eixo Y.

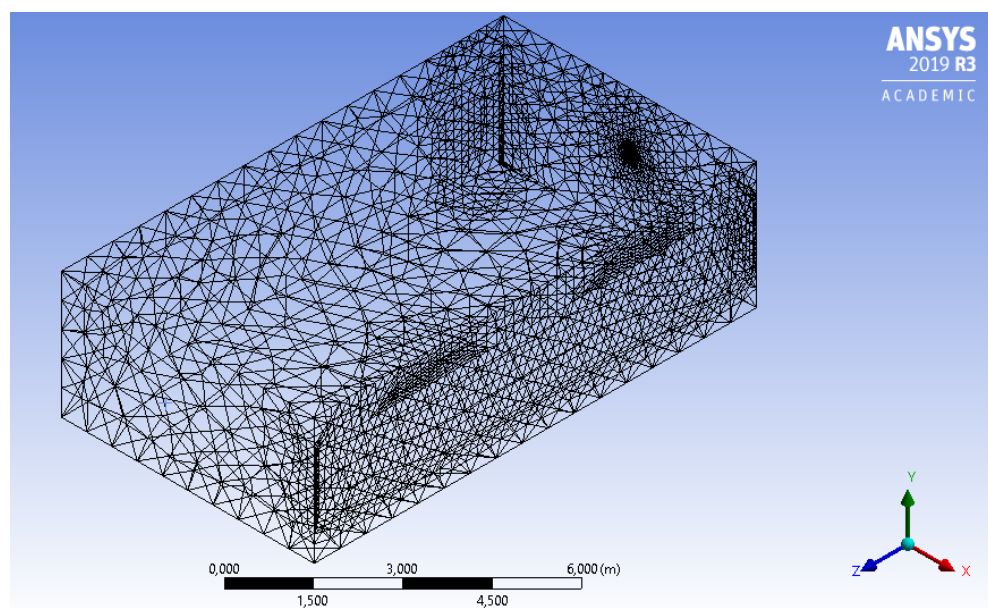
Figura 6 – Modelo de sala de aula simplificado utilizado em simulação.



Fonte: Autoria Própria (2020).

Baseado na potência computacional disponível e, uma vez que é necessário um elevado tempo de simulação para avaliação do tempo de suspensão das partículas no domínio, uma malha inicial grosseira, com 44258 volumes, foi utilizada no desenvolvimento das simulações, como pode ser visto na Figura 7.

Figura 7 – Malha principal



Fonte: Autoria Própria (2020).

## 7.2 INJEÇÃO DE PARTÍCULAS

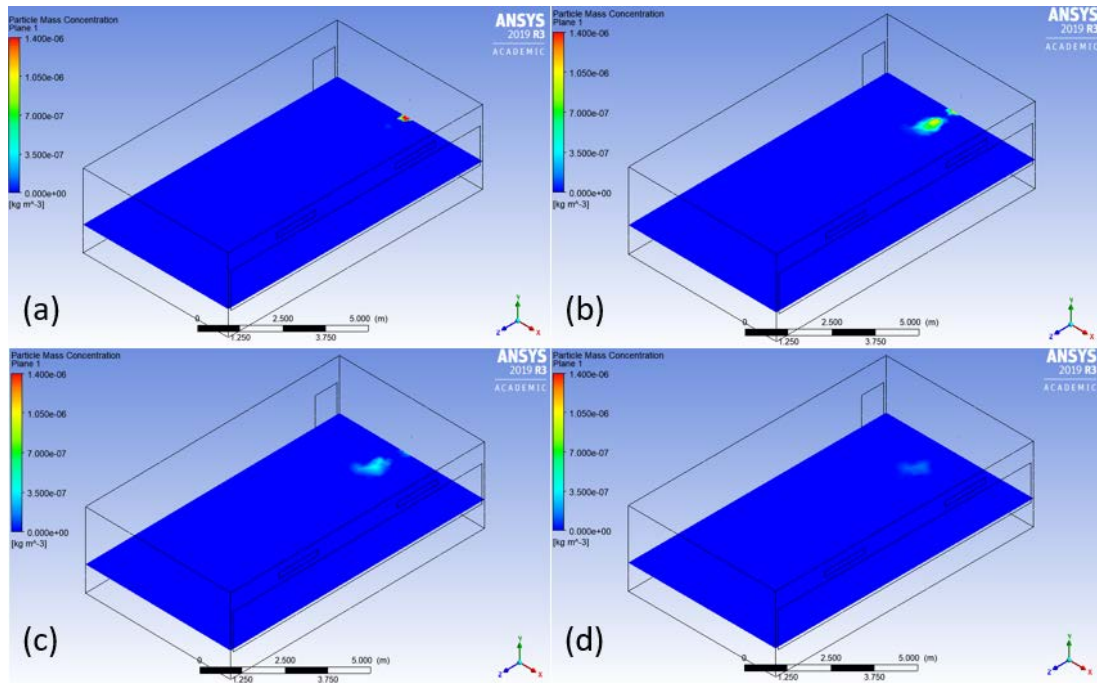
Os parâmetros da injeção de partículas são definidos no próprio Ansys Fluent, em que se faz uso do modelo de fase discreta para aproximar as características do aerossol inserido no domínio com as partículas expiratórias reais. A injeção foi realizada através de uma superfície, em que se seleciona a superfície em que se deseja expelir o particulado (no caso, a região da boca). As partículas possuem formato esférico e são injetadas durante um período de 1 segundo, de maneira aleatória, de acordo com o modelo de distribuição de Rosin-Rammler, com uma faixa de 10 diâmetros variando entre 1 e 10  $\mu\text{m}$ , possuindo uma densidade de 998,2  $\text{kg/m}^3$ , que foi aproximada com a da água, para facilitar os cálculos. A diferença entre a tosse e o espirro fica sendo somente a velocidade de injeção dessas partículas, que no caso da tosse é de 20 m/s e do espirro 100 m/s (MARSANO, 2020).

## 8. RESULTADOS

Com os resultados da simulação, puderam ser obtidos os dados de concentração das partículas no ar ao longo do tempo, em que pôde-se observar o seu espalhamento e seu decaimento ao longo de um tempo aproximado de 16 minutos após sua injeção no domínio de maneira qualitativa. Nas Figuras 8, 9 e 10, que representam as injeções de fala, tosse e espirro, respectivamente, um plano horizontal a um metro de altura do solo representando a altura média da localização da região da boca e nariz dos alunos sentados em sala de aula pode ser visto, em que foram selecionadas quatro imagens do pico dessa concentração neste plano para analisar tanto a localização dessa nuvem de aerossol mais “densa” como o tempo em que ela começa a se dispersar em cada uma das situações de injeção.



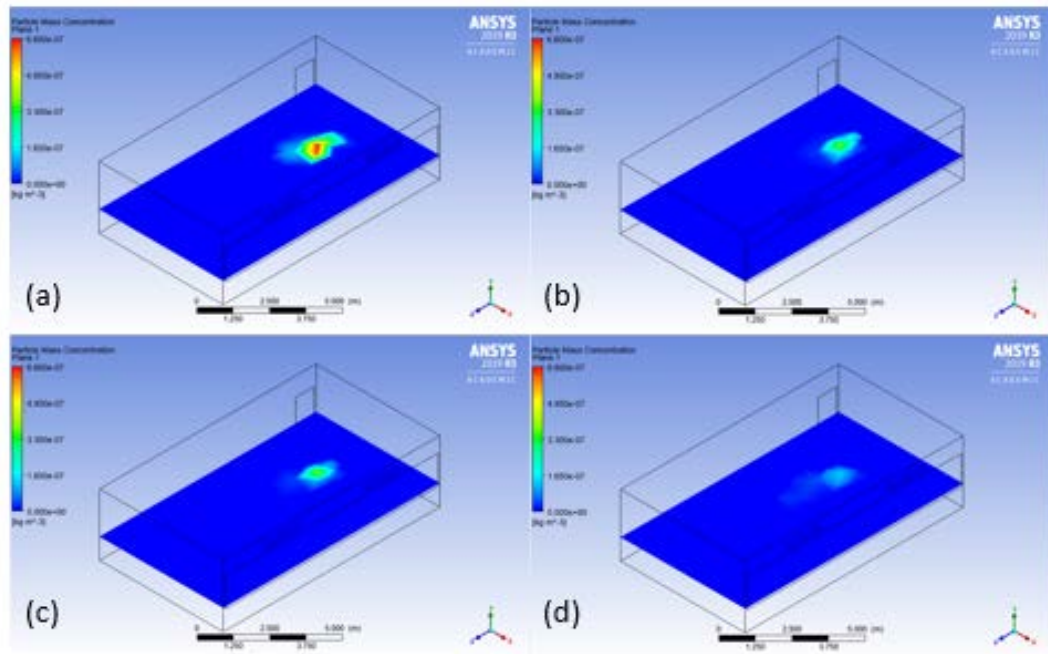
Figura 8 – Concentração de partículas ao longo do tempo, após injeção de fala, em um plano horizontal a 1 metro do solo: (a) 20 segundos; (b) 60 segundos; (c) 80 segundos; (d) 120 segundos.



Fonte: Autoria Própria (2020).

Na Figura 8, pelos contornos destacados nos instantes de tempo indicados, pode ser visto que no tempo de 20 segundos durante o pico de concentração de partículas no plano, a nuvem de particulado não se dispersa tanto e se concentra em um espaço próximo ao orifício de injeção. A partir dos 60 segundos o aerossol se espalha mais e com o passar do tempo começa a decair até que nos 120 segundos é notada uma maior dissipação das gotículas no ar. Podemos observar também que a nuvem de particulado não ultrapassa a metade da sala nesse período analisado, mantendo-se na distância mais próxima a parede dentre os três casos.

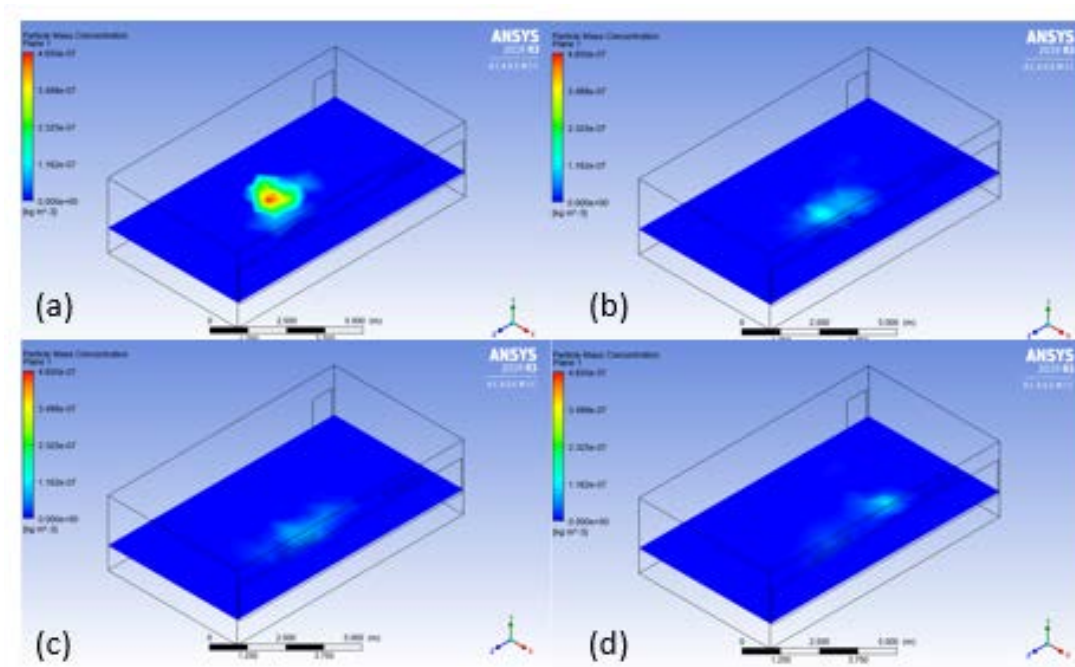
Figura 9 – Concentração de partículas ao longo do tempo, após injeção de tosse, em um plano horizontal a 1 metro do solo: (a) 20 segundos; (b) 60 segundos; (c) 80 segundos; (d) 120 segundos.



Fonte: Autoria Própria (2020).

Na demonstração de tosse da Figura 9 é notada uma passagem mais rápida do particulado sobre o plano em destaque, em que aos 20 segundos a nuvem já alcança uma distância um pouco maior em relação ao caso da fala e até os 120 segundos é notado a dissipação do aerossol.

Figura 10 – Concentração de partículas ao longo do tempo, após injeção de espirro, em um plano horizontal a 1 metro do solo: (a) 20 segundos; (b) 60 segundos; (c) 80 segundos; (d) 120 segundos.



Fonte: Autoria Própria (2020).

Já no espirro demonstrado na Figura 10, apesar de ser teoricamente introduzido um maior número de partículas na sala de aula, não vemos uma concentração maior no plano em relação à fala e à tosse ao longo do tempo, que além de se dispersar mais rapidamente neste plano que os outros casos, o espirro alcança uma distância maior dentro do espaço estudado.

Podemos observar na Tabela 1 a seguir as distâncias máximas alcançadas pelas nuvens de partículas nas situações simuladas.

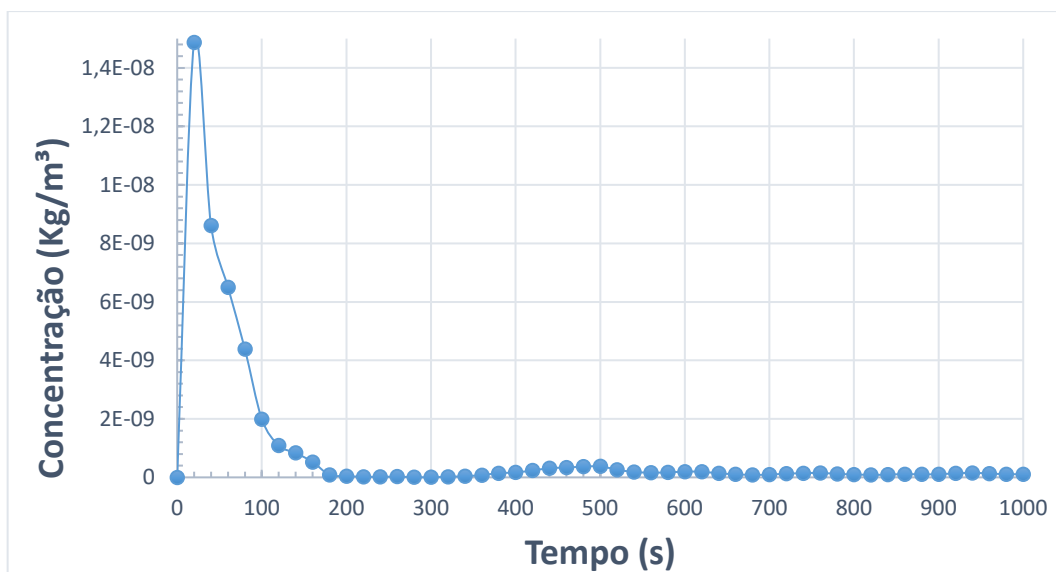
Tabela 1 – Distâncias máximas alcançadas pelo aerossol.

| FENÔMENO | DISTÂNCIA |
|----------|-----------|
| Fala     | 2,33 m    |
| Tosse    | 4,67 m    |
| Espiro   | 9,33 m    |

Fonte: Autoria Própria (2020).

Nos Gráficos 1, 2 e 3 observamos dados qualitativos a respeito da concentração de massa das partículas em um plano horizontal a um metro de altura em relação ao solo, dos três casos anteriores das Figuras 8, 9 e 10, ao longo do período de 1000 segundos.

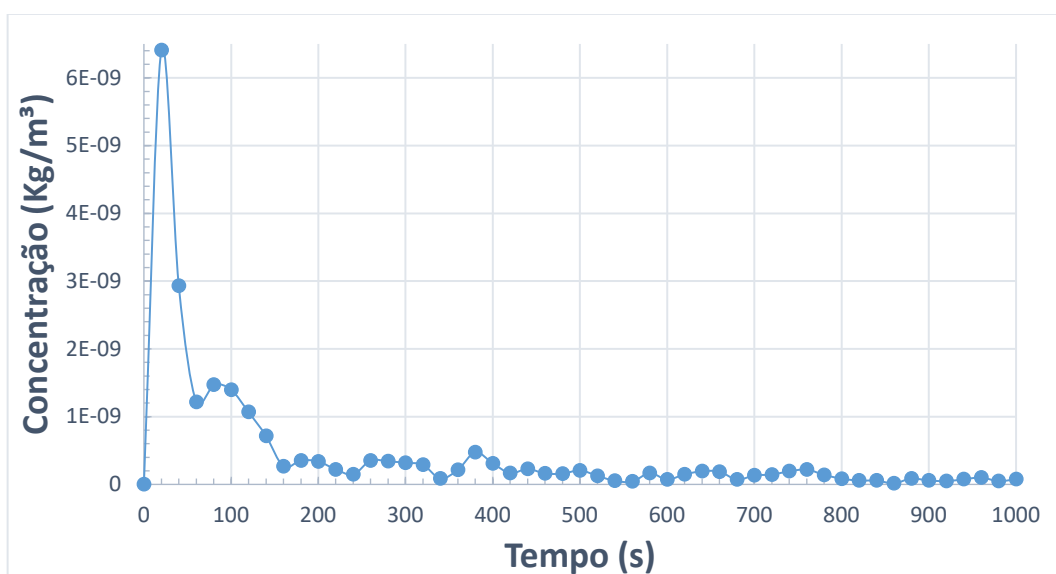
Gráfico 1 – Concentração média de massa de partículas após fala.



Fonte: Autoria Própria (2020).

No Gráfico 1 pode ser visto que após a fala existe um pico de concentração no plano a 20 segundos e após isso o aerossol se dispersa e a concentração decai consideravelmente até os 120 segundos, mantendo-se constante até após o período de 1000 segundos. Embora a fala não seja a modalidade que introduza a maior quantidade de aerossol em sala de aula, é a que mantém o maior pico das partículas expelidas durante um segundo de fala no plano de altura média dos alunos sentados em comparação com os demais casos.

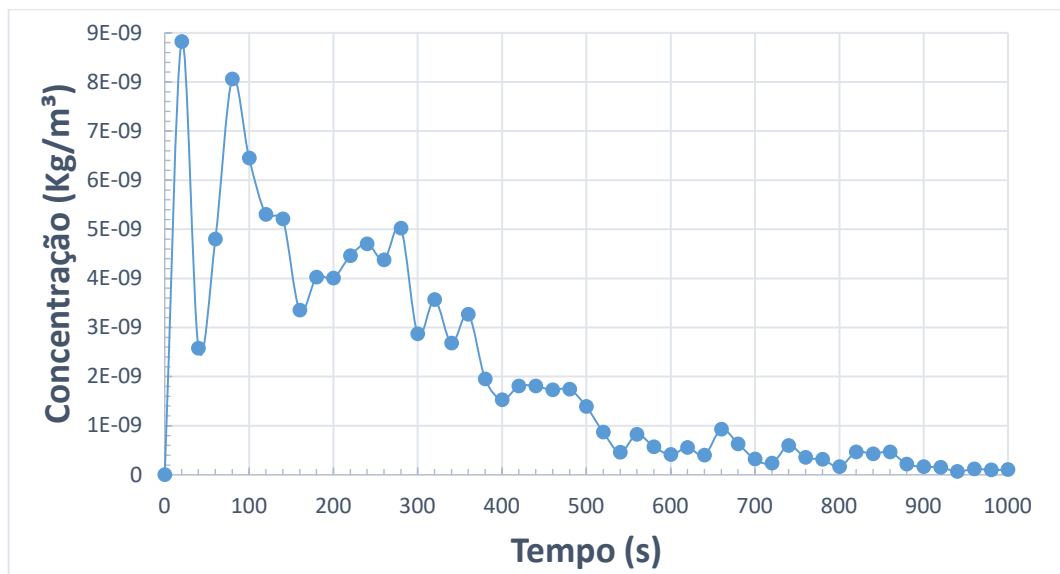
Gráfico 2 – Concentração média de massa de partículas após tosse.



Fonte: Autoria Própria (2020).

O Gráfico 2, representando a distribuição do particulado após tosse, apresenta um pico de concentração no plano a um metro do solo no tempo de 20 segundos, seguido de um grande decaimento e uma leve retomada a 80 segundos. Após isso a concentração segue constante até após 1000 segundos de simulação.

Gráfico 3 – Concentração média de massa de partículas após espirro.



Fonte: Autoria Própria (2020).

Já no Gráfico 3 é notável um comportamento mais turbulento do aerossol no caso do espirro, provavelmente devido à elevada velocidade de injeção. Ocorre um pico de concentração no tempo de 20 segundos, um segundo pico a 80 segundos e um terceiro a 280 segundos e após 500 segundos começa a se dispersar e manter constância até depois dos 1000 segundos.

## 9. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com a realização da modelagem e simulação da injeção de aerossol em um ambiente de sala de aula, resultados qualitativos em relação aos casos de fala, tosse e espirro sem o uso de máscara e/ou outras medidas preventivas foram obtidos. Ao conhecer melhor o comportamento das partículas expiratórias, mesmo que qualitativamente, o estabelecimento de medidas de prevenção e proteção podem ser adotadas pela instituição de ensino ora pesquisada, e também ser estendidas a outras instituições que vivenciam diariamente com esse público-alvo.

As análises dos dados obtidos demonstram que, embora a situação de fala tenha proporcionado uma menor distância máxima alcançada, no valor de 2,33 m, mantiveram uma concentração maior de partículas em um plano que fica ao alcance da respiração dos alunos sentados em sala de aula. No caso da tosse, foi alcançada uma distância de 4,67 m, que é superior a da fala, embora a concentração sobre o plano tenha sido um pouco inferior. Já no espirro, o aerossol possui uma turbulência maior em relação às outras situações e alcança uma distância de 9,33 m, que é mais próxima ao fundo do ambiente, além de começar a dispersar com um tempo mais elevado que nos outros casos. Nos três casos, foram registradas quantidades significativas de partículas até um período superior a 1000 segundos.

Ao saber a forma como a nuvem de particulado se desloca e o possível tempo de permanência no ar até a sua deposição sobre os objetos em sala e no solo, diversas medidas podem ser tomadas para que seja possível o retorno das aulas presenciais. Como o uso obrigatório de máscaras, manter um distanciamento maior entre as cadeiras, fazer uso de exaustores de ar na sala de aula, manter janelas e portas abertas, redução do tempo de aula para diminuir a quantidade de partículas injetadas no ar e aumentar o intervalo entre as aulas para esperar as partículas se depositarem, além de realizar a higienização do ambiente com uma frequência maior (WORLD HEALTH ORGANIZATION, 2020).

Tomando como base os experimentos realizados no presente trabalho, podem-se realizar estudos mais aprofundados, como a influência da temperatura e umidade do ambiente sobre as gotículas, simulação com malhas que possuam maior grau de refinamento, uso de diferentes fontes de ventilação para uma melhor caracterização do comportamento do aerossol, utilização de diversas fontes de injeção de partículas em diferentes locais da sala, simulação em outros ambientes como corredores e bibliotecas e também uma simulação de injeção de partículas por uma fonte fazendo o uso de máscara de proteção.

## REFERÊNCIAS

**AEROSOL AND SURFACE STABILITY OF SARS-COV-2 AS COMPARED WITH SARS-COV-1.** Massachusetts, 16 abr. 2020.

ALIABADI, Amir A.; ROGAK, Steven N.; GREEN, Sheldon I.; BARTLETT, Karen H.. CFD SIMULATION OF HUMAN COUGHS AND SNEEZES: A STUDY IN DROPLET DISPERSION, HEAT, AND MASS TRANSFER. In: INTERNATIONAL MECHANICAL ENGINEERING CONGRESS & EXPOSITION, 10., 2010, Vancouver. **Proceedings of ASME**. Vancouver: Asme, 2010. p. 1-10.

ANSYS, Inc. **ANSYS Fluent Theory Guide**. Canonsburg: Ansys, 2013a.

ANSYS, Inc. **ANSYS Fluent User's Guide**. Canonsburg: Ansys, 2013b.

BORRO, Luca *et al.* The Role of Air Conditioning in the Diffusion of Sars-CoV-2 in Indoor Environments: a First Computational Fluid Dynamic Model, based on Investigations performed at the Vatican State Childrens Hospital. **Medrxiv**. Roma, p. 1-21. 31 ago. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1101/2020.08.25.20181420>. Acesso em: 30 set. 2020.

CELLINE, Paulo Rogério. **ESTUDO EXPERIMENTAL DA INFLUÊNCIA DE SISTEMA DE VENTILAÇÃO PERSONALIZADA INSTALADO NA POLTRONA NA DISPERSÃO DE PARTICULAS EXPIRATÓRIAS EM CABINE DE AERONAVE**. 2017. 121 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017.

CHAO, C.y.H. *et al.* **Characterization of expiration air jets and droplet size distributions immediately at the mouth opening**. Disponível em: [www.elsevier.com/locate/jaerosci](http://www.elsevier.com/locate/jaerosci). Acesso em: 21 out. 2020.

CRUZ, Suellen Freire Rigattoda. **MODELAGEM MATEMÁTICA E SIMULAÇÃO NUMÉRICADA DEPOSIÇÃO DE PARTÍCULAS EM DUTO HORIZONTAL**. 2018. 69 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Energia, Universidade Federal do Espírito Santo, São Mateus, 2018.

DUGUID, J. P. The Size and the Duration of Air-Carriage of Respiratory Droplets and Droplet-Nuclei. *J. Hyg.*, 1946.44:471-479

GIDASPOW, Dimitri. **Multiphase Flow And Fluidization**: continuun and kinetic theory descriptions. Chicago: Academic Press, 1994.

INTERNATIONAL COMMISSION ON THE FUTURES OF EDUCATION. **Protecting and Transforming Education for Shared Futures and Common Humanity**. 2020. Disponível em: <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000373207/PDF/373207eng.pdf.multi>. Acesso em: 20 jun. 2020.

LAI, Fernando César de. **SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO ESCOAMENTO PARTICULADO PARA O PREENCHIMENTO DE CANAL FRATURADO**. 2013. 203 f. Tese (Doutorado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

LU, Weizhen. CFD Modeling and Measurement of Aerosol Particle Distributions in Ventilated Multizone Rooms. **Ashrae Journal**. Hong Kong, p. 116-127. jan. 1999. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/236656385>. Acesso em: 30 set. 2020.

MORAWSKA, Lidia. DROPLET FATE IN INDOOR ENVIRONMENTS, OR CAN WE PREVENT THE SPREAD OF INFECTION? In: PROCEEDINGS OF INDOOR AIR 2005 : THE 10TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON INDOOR AIR QUALITY AND CLIMATE, 10., 2005, Beijing. **Proceedings of the Indoor Air 2005 Conference**. Beijing: Qut Digital Repository, 2005. p. 1-18.

MARSANO, Davide. **Cfd simulation of droplets emission from coughing and breathing to support protection strategies from covid-19: air conditioned room**. Genova: Dipartimento Dime, 2020.

MASSARANI, Giulio. **FLUIDODINÂMICA EM SISTEMAS PARTICULADOS**. 2. ed. Rio de Janeiro: Ufrj, 2001.



ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE. **Coronavirus disease 2019 (COVID-19): situation report – 51.** 2020. Disponível em: [https://www.who.int/docs/default-source/coronaviruse/situation-reports/20200311-sitrep-51-covid-19.pdf?sfvrsn=1ba62e57\\_10](https://www.who.int/docs/default-source/coronaviruse/situation-reports/20200311-sitrep-51-covid-19.pdf?sfvrsn=1ba62e57_10). Acesso em: 20 jun. 2020a.

ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE. **Q&A on coronaviruses (COVID-19).** 2020. Disponível em: <https://www.who.int/emergencies/diseases/novel-coronavirus-2019/question-and-answers-hub/q-a-detail/q-a-coronaviruses>. Acesso em: 23 jun. 2020b.

OLIVEIRA, Nicolas Lima; HALLAK, Patricia Habib. **Simulação computacional da trajetória das gotículas da saliva humana em razão de diferentes tipos de atividades - um alerta quanto as distâncias mínimas de segurança e uso obrigatório de máscaras.** 2020. 8 f. Monografia (Especialização) - Curso de ., Programa de Pós Graduação em Modelagem Computacional, 2020.

Tang, Y., Guo, B. Computational fluid dynamics simulation of aerosol transport and deposition. *Front. Environ. Sci. Eng. China* **5**, 362 (2011). <https://doi.org/10.1007/s11783-011-0365-8>

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO. **Ufersa suspende por tempo indeterminado calendário acadêmico da graduação para evitar coronavírus.** 2020. Disponível em: <https://assecom.ufersa.edu.br/2020/03/17/ufersa-suspende-aulas-da-graduacao-por-tempo-indeterminado-para-evitar-coronavirus/>. Acesso em: 20 jun. 2020.

VUORINENA, Ville *et al.* Modelling aerosol transport and virus exposure with numerical simulations in relation to SARS-CoV-2 transmission by inhalation indoors. **Safety Science.** Finland, p. 1-23. 31 maio 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2020.104866>. Acesso em: 11 jun. 2020.

World Health Organization. (2020). Transmission of SARS-CoV-2: implications for infection prevention precautions: scientific brief, 09 July 2020. World Health Organization. <https://apps.who.int/iris/handle/10665/333114>.