



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA

PALOMA ANDRADE BATISTA

**CONTRIBUIÇÕES DO ENGENHEIRO QUÍMICO NO ENTENDIMENTO DA
DINÂMICA DE TRANSMISSÃO DO COVID-19**

JOÃO PESSOA- PB

2021

PALOMA ANDRADE BATISTA

**CONTRIBUIÇÕES DO ENGENHEIRO QUÍMICO NO ENTENDIMENTO DA
DINÂMICA DE TRANSMISSÃO DO COVID-19**

Trabalho Final de Curso apresentado à Universidade Federal da Paraíba-UFPB, como requisito parcial para obtenção do título de Graduação em Engenharia Química.

Orientador: Prof. Dr. *Genaro Z. Clericuzi*.

João Pessoa – PB

2021

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

B333c Batista, Paloma Andrade.
Contribuições do Engenheiro Químico no entendimento
da
Dinâmica de Transmissão do COVID-19 / Paloma Andrade
Batista. - João Pessoa, 2021.
71 f. : il.

Orientação: Genaro Clericuzi.
TCC (Graduação) - UFPB/CT.

1. COVID-19. 2. Dinâmica de transmissão. 3. Dinâmica
dos fluidos. I. Clericuzi, Genaro. II. Título.

UFPB/BSCT CDU 66.01(043.2)

Paloma Andrade Batista

**CONTRIBUIÇÕES DO ENGENHEIRO QUÍMICO NO ENTENDIMENTO DA
DINÂMICA DE TRANSMISSÃO DO COVID-19**

Trabalho Final de Curso apresentado à
Universidade Federal da Paraíba-UFPB,
como requisito parcial para obtenção do
título de graduação em Engenharia
Química.

Aprovado em 02 de dezembro de 2021.

BANCA EXAMINADORA


Prof. Dr. Genaro Zenaide Clericuri (UFPB/CT/DEQ)
Orientador


Profª Drª Veruska Araújo Silva (UFPB/CT/DEQ)
Examinadora


Profª Drª Karla Silvana Menezes Gadelha de Sousa (UFPB/CT/DEQ)
Examinadora

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, à Nosso Senhor, que deu-me a graça de realizar uma graduação e permitiu-me tê-la concluído.

À Nossa Senhora, que sempre esteve intercedendo por mim lá no céu.

À minha família, pais e irmão que fizeram o que puderam por mim, e permitiram que eu tivesse a melhor experiência ao longo do curso, apesar da distância e da saudade.

Aos professores do curso e orientador Prof. Dr. Genaro Zenaide Clericuzi, que foram fundamentais para a aprendizagem do universo da engenharia química.

Aos meus amigos de curso, que me proporcionaram o companheirismo ao longo de toda a trajetória e compartilharam suas histórias e conhecimentos.

RESUMO

A pandemia do COVID-19, declarada pela Organização Mundial da Saúde (OMS) em março de 2020, levou governos e empresas a unirem-se com a ajuda de profissionais de diferentes áreas do conhecimento para desenvolverem meios eficazes de contenção da doença após a propagação do vírus tomar dimensões mundiais em pouco tempo. O engenheiro químico, por ser um profissional de qualificação ampla, pode auxiliar no combate à pandemia do COVID-19, aplicando suas habilidades e conhecimentos, em especial de dinâmica dos fluidos, no entendimento da física da transmissão do vírus e buscando meios de contê-lo. Assim, o engenheiro químico pode contribuir para o entendimento da dinâmica de transmissão do vírus através da análise teórica, modelagem dos fenômenos envolvidos e simulação das exalações de fluidos mucosais. Apesar de existirem pesquisas na temática da dinâmica de transmissão do COVID-19, é necessário mais investigação em algumas áreas e por isso, ainda há muito espaço para que o engenheiro químico possa explorar a fim de contribuir mais para o entendimento completo da dinâmica de transmissão do COVID-19 e ainda de outras doenças transmitidas pelas mesmas vias.

Palavras-chave: COVID-19; dinâmica de transmissão; dinâmica dos fluidos.

ABSTRACT

The COVID-19 pandemic, declared by the World Health Organization (OMS) in march 2020, led governments and companies to come together with the help of professionals from different areas of knowledge to develop effective means of containing the disease after its spread of the virus to take on global dimensions in a short time. The chemical engineer, being a broadly qualified professional, can help fight the COVID-19 pandemic, applying his skills and knowledge, in particular fluid dynamics, in understanding the physics of virus transmission and seeking ways to contain it. Thus, the chemical engineer can contribute to the understanding of the virus transmission dynamics through theoretical analysis, modeling of the phenomena involved and simulation of mucosal fluid exhalations. Although there are researches on the subject of COVID-19 transmission dynamics, further investigation is needed in some areas and therefore there is still a lot of room for the chemical engineer to explore in order to contribute more to the complete understanding of the transmission dynamics COVID-19 and other diseases transmitted by the same routes.

Keywords: COVID-19; transmission dynamics; fluid dynamics.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1: Tensão normal e tensão de cisalhamento na superfície de um elemento de fluido | 15 |
| Figura 2: Desenvolvimento de perfil laminar permanente de velocidades para um fluido contido entre duas placas | 16 |
| Figura 3: Comportamento reológico dos fluidos – a tensão de cisalhamento como uma função da taxa de deformação de cisalhamento | 18 |
| Figura 4: Camada limite sobre uma placa plana | 21 |
| Figura 5: Durante a queda livre, um corpo alcança sua velocidade terminal quando a força de arrasto se torna igual ao peso do corpo menos a força de flutuação | 24 |
| Figura 6: Representação esquemática do acoplamento entre fases e seus efeitos..... | 34 |
| Figura 7: Representação esquemática de uma mistura de partículas dispersas em um fluido com concentração diluída, intermediária e alta | 35 |
| Figura 8: Representação esquemática do acoplamento entre fases dispersa e contínua numa mistura: uma via, duas vias e quatro vias | 36 |
| Figura 9: Exalações como respiração, tosse e espirros liberam uma nuvem turbulenta de ar quente e úmido contendo ar com gotas em suspensão presas dentro dele. A nuvem e sua carga útil podem viajar até 8 m no caso de espirros, por exemplo | 42 |
| Figura 10: Comparação entre a imagem de emissão de gotículas isoladas de Wells (1934, 1955) e a imagem recentemente desenvolvida de exalações de emissão de nuvem de gás turbulenta | 42 |
| Figura 11: Conforme a nuvem se move para a frente ao longo de sua trajetória $s(t)$, e com velocidade transversal média $U(t)$, ele arrasta ar ambiente com velocidade média $W(t) = \alpha U(t)$ e raio da nuvem $r(t) = \alpha s(t)$, em que α é o coeficiente de arraste. O fluxo totalmente turbulento é semelhante ao longo de sua trajetória longe de uma fonte pontual..... | 50 |
| Figura 12: A emissão inicial de nuvem é descrita por um volume $V(0)$, densidade $\rho_c(0)$, fluotabilidade inicial B_0 , e momento I_0 | 51 |

Figura 13: Trajetória das gotículas suspensas na nuvem que circulam dentro dela até que se acomodem a uma distância horizontal x_l e chegam a uma posição final x_r , o que define a faixa de contaminação de gotas de um determinado tamanho (Bourouiba et al. 2014)..53

Figura 14: Esquema do domínio computacional com dois humanos virtuais separados por distâncias diferentes e detalhes da malha56

Figura 15: Tamanhos e posições de gotículas para uma umidade relativa de 40% e velocidade do vento de 5,5 m/s, em diferentes espaços de tempo após o início da tosse: (a) $t = 0,10$ s, (b) $t = 0,25$ s, (c) $t = 0,5$ s, e (d) $t = 1,0$ s57

Figura 16: Tamanhos e posições de gotículas para uma umidade relativa de 99,5% e velocidade do vento de 5,5 m/s, em diferentes espaços de tempo após o início da tosse: (a) $t = 0,10$ s, (b) $t = 0,25$ s, (c) $t = 0,5$ s, e (d) $t = 1,0$ s58

Figura 17: Fluxo de gotas de saliva portadoras de vírus a partir de uma tosse humana, a uma velocidade ambiente de aproximadamente zero59

Figura 18: Fluxo de gotas de saliva portadoras de vírus a partir de uma tosse humana, a uma velocidade ambiente de 4 km/h (a) e 15 km/h (b). O ambiente está em temperatura ambiente de 20°C, pressão de 1 atm, e umidade relativa de 50%, com a temperatura do solo de 15°C60

Figura 19: Distribuição de temperatura em um fluxo simulado de “tosse seca” em dois instantes de tempo desde o início das simulações. A duração total da tosse é 0,53 s64

SUMÁRIO

| | |
|--|-----------|
| 1. INTRODUÇÃO | 12 |
| 2. OBJETIVOS | 13 |
| 3. IMPORTÂNCIA DE SE ENTENDER A DINÂMICA DE TRANSMISSÃO DO SARS-CoV-2 | 14 |
| 4. REVISÃO TEÓRICA | 15 |
| 4.1.DINÂMICA DOS FLUIDOS | 15 |
| 4.1.1. Classificação dos escoamentos | 16 |
| 4.1.2. Cinemática dos fluidos | 19 |
| 4.1.3. Definições | 20 |
| 4.1.3.1.Número de Reynolds | 20 |
| 4.1.3.2.Camada limite..... | 21 |
| 4.1.3.3.E escoamento turbulento | 23 |
| 4.1.3.4.Força de arrasto e força de sustentação | 24 |
| 4.2.EQUAÇÕES DO ESCOAMENTO DE UM FLUIDO | 27 |
| 4.2.1. Análise integral..... | 27 |
| 4.2.1.1.Conservação da massa | 28 |
| 4.2.1.2.Conservação da quantidade de movimento | 28 |
| 4.2.2. Análise diferencial | 30 |
| 4.2.2.1.Equação da continuidade | 30 |
| 4.2.2.2.Equação da quantidade de movimento | 32 |
| 4.2.2.3.Equação de Navier-Stokes..... | 32 |
| 4.3.DINÂMICA DOS FLUIDOS COMPUTACIONAL (CFD)..... | 34 |
| 4.4.ESCOAMENTO MULTIFÁSICO | 34 |
| 4.4.1. Fase contínua e fase dispersa..... | 38 |
| 4.4.2. Utilização de métodos computacionais | 39 |
| 5. A DINÂMICA DOS FLUIDOS NA TRANSMISSÃO DE DOENÇAS | 41 |
| 5.1.TRANSMISSÃO POR GOTÍCULAS, NÚCLEO DE GOTÍCULAS E AEROSSÓIS | 42 |
| 6. METODOLOGIA | 45 |
| 7. RESULTADOS E ANÁLISE DOS RESULTADOS | 45 |

| | |
|--|-----------|
| 7.1.FORMAS DE O ENGENHEIRO QUÍMICO CONTRIBUIR PARA O ENTENDIMENTO DA DINÂMICA DE TRANSMISSÃO DO SARS-CoV-2 E SEUS DESAFIOS | 45 |
| 7.1.1. Modelagem Matemática | 46 |
| 7.1.1.1.Análise teórica: a complexidade do fluxo multifásico | 47 |
| 7.1.1.2.Modelagem a partir de análise experimental..... | 48 |
| 7.1.1.3.Modelagem da nuvem de gás de expiração multifásica turbulenta..... | 49 |
| 7.1.2. Simulação da nuvem de gás de expiração multifásica turbulenta | 56 |
| 7.1.3. Trabalhos Futuros | 65 |
| 8. CONSIDERAÇÕES FINAIS..... | 67 |
| 9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 68 |

1. INTRODUÇÃO

A pandemia do COVID-19, também chamado de Novo Coronavírus, foi declarada pela Organização Mundial da Saúde (OMS) em março de 2020, após a propagação do vírus tomar dimensões mundiais em pouco tempo.

O promotor do COVID-19 é o vírus SARS-CoV-2, que se originou em Wuhan, província de Hubei, localizada na China, em novembro de 2019, em um pequeno mercado de peixes e animais selvagens (Lu et al, 2020). O vírus recebe o nome de SARS-CoV-2 por pertencer à família SARS-CoV, que surgiu no início do século XXI, juntamente com a família de vírus MERS-CoV, que surgiu em 2012, na região do Oriente Médio (Cui et al, 2019).

Segundo Guzman (2020), o vírus possui um diâmetro de 50 a 200 nm. O receptor de entrada celular para o SARS-CoV-2 é a Enzima de Conversão da Angiotensina 2 (ACE-2), muito presente em humanos, nas mucosas da boca, nariz e olhos, e no epitélio do pulmão e do intestino delgado (Zhang, Penninger, Li, Zhong, & Slutsky, 2020).

A forma de transmissão da doença ocorre por meio de gotículas produzidas pela tosse ou espirro de uma pessoa infectada, por contato direto com uma superfície infectada, ou ainda pelo ar, via aerossóis (Wang e Du, 2020, Evans, 2020), o que explica a facilidade com que o vírus SARS-CoV-2 é transmitido e porque sua propagação tem sido tão rápida. A transmissão via gotículas refere-se àquela que ocorre por meio de gotículas emitidas ao falar, tossir ou espirrar. Tais gotículas tem um diâmetro maior que outras partículas do ar (maior que 100 μm) (Evans, 2020), e, por serem mais pesadas, acabam caindo na superfície. Já a transmissão via aérea, chamada de contaminação cruzada, refere-se àquela que ocorre por meio de partículas carregadas de vírus que permanecem suspensas no ar, emitidas pela respiração de uma pessoa contaminada. Ela envolve núcleos de partículas, ou seja, partículas com diâmetro muito pequeno (5 a 10 μm) (Evans, 2020), que tendem a percorrer longas distâncias no ar quando são expelidas.

Diante do cenário mundial, os governos, juntamente com a OMS, tomaram uma série de medidas para a prevenção da doença no meio da população, como a utilização de álcool em gel, a lavagem frequente das mãos, a utilização de máscaras e o distanciamento social. Dessa forma, governos e empresas uniram-se, com a ajuda de profissionais de diferentes

áreas do conhecimento para desenvolverem meios eficazes de contenção da doença. E é nesse cenário que o engenheiro químico vem se mostrando atuante.

O engenheiro químico é um profissional de qualificação ampla, que pode atuar de inúmeras formas na resolução de problemas, graças ao seu senso crítico e capacidade analítica para desenvolver soluções inovadoras. Dessa forma, em conjunto com outros profissionais da engenharia e ciências, ele também pode auxiliar no combate à pandemia do COVID-19, aplicando suas habilidades e conhecimentos no entendimento da transmissão do vírus e buscando meios de contê-lo.

Dentre as contribuições do engenheiro químico ao combate à esta pandemia, estão a compreensão da dinâmica de transmissão e propagação do vírus na população para a concepção de estratégias de distanciamento social, o desenvolvimento veloz de vacinas eficazes, a pesquisa e produção de medicamentos que tratam de fato a doença, o uso da impressão 3D para a produção de equipamentos de proteção individual e outros objetos essenciais para o tratamento, o uso da microfluídica na detecção do vírus no paciente, o uso da inteligência artificial para prevenção, diagnóstico e tratamento da doença, além da produção de desinfetantes, como o álcool em gel, para profilaxia da doença, e pesquisas para a formulação de reagentes capazes de destruir o vírus no ar.

Levando em conta a importância crucial em compreender fisicamente os mecanismos pelos quais os fluidos influenciam na dinâmica de transmissão de patógenos, neste caso o SARS-CoV-2, entre um hospedeiro e outro, este trabalho destacará as principais pesquisas, experimentais e numéricas, realizadas até então que se dedicaram à análise da dinâmica dos fluidos envolvida na transmissão do SARS-CoV-2 na população mundial, assim como dos fenômenos físicos que influenciam de alguma maneira essa dinâmica. A compreensão de como se dá a física da transmissão do SARS-CoV-2 e de como ele se propaga no ambiente parte do conhecimento da dinâmica dos fluidos, mais especificamente da dinâmica de gotículas e aerossóis no ar, uma área de estudo que faz parte da formação acadêmica do engenheiro químico.

2. OBJETIVOS

Mostrar de que forma o profissional da engenharia química pode contribuir para entender a dinâmica de transmissão do SARS-CoV-2, a partir de seus conhecimentos de dinâmica dos fluidos, modelagem matemática e simulação de processos.

3. IMPORTÂNCIA DE SE ENTENDER A DINÂMICA DE TRANSMISSÃO DO SARS-CoV-2

A importância de entender à fundo como ocorre a dinâmica de transmissão do SARS-CoV-2, que possui a mesma base de outras doenças transmitidas pela exalação de fluidos mucosais, é:

- Definir a política de distanciamento social de forma mais eficaz e condizente com a realidade, além de criar soluções inovadoras e eficazes para a prevenção da doença e, conseqüentemente, a mitigação da pandemia. Tudo isso a partir da modelagem e simulação do fluxo de tosse para determinar a que distância as gotas de saliva infectadas podem viajar, a depender de inúmeros fatores;
- Entender em quais localidades geográficas e tipos de ambientes há maior probabilidade de contágio, a partir das simulações do fluxo de tosse considerando as diversas condições ambientais (velocidade do vento, temperatura, umidade, temperatura da superfície do solo);
- Entender as rotas de transmissão da doença, já que a transmissão do vírus SARS-CoV-2 não ocorre apenas por transmissão de contato, mas também pela inalação de grande número de partículas virais no ar, os núcleos de gotículas. Na verdade, o estudo de van Doremalen et al. (2020) indica que o vírus SARS-CoV-2 pode permanecer infeccioso como um aerossol por pelo menos 3 h (Vourinen, 2020).
- Entender a dinâmica de transmissão de outras doenças respiratórias transmitidas também por meio de exalação de fluidos mucosais, assim como o COVID-19;
- Determinar o uso de sistemas de recirculação de ar e outros métodos para diminuir a probabilidade de contágio em ambientes fechados;

- Utilizar sistemas de controle de temperatura e de umidade relativa do ar para dificultar o contágio da doença, já que esses são fatores que influenciam o transporte do fluxo das gotas exaladas pela tosse;

O estudo da dinâmica do transporte de partículas na compreensão da ciência básica do aerossol de gotículas carregadas com SARS-CoV-2 espalhadas pelo ar é significativo, pois beneficia a comunidade de pesquisa e as agências reguladoras, e tem potencial para aumentar a compreensão fundamental de como os fatores ambientais e humanos podem influenciar o vírus transmitido pelo ar na transmissão de uma pessoa para outra. A visão e os dados quantitativos de exposição da região da cabeça e do corpo humano fornecem evidências diretas para orientação de prevenção a fim de reduzir os riscos de exposição e infecção. Este estudo também pode ser estendido para fornecer uma alta resolução do transporte de gotículas carregadas de vírus e previsões de deposição em sistemas respiratórios humanos com distanciamento social em diferentes situações, e para estimar a carga de RNA SARS-CoV-2 nas vias aéreas para uma maior compreensão da infecção viral, replicação e patogênese não invasiva em um futuro próximo, e para melhores preparações contra o período pós-pandêmico com uma alta possibilidade de ressurgimento (Kissler, Tedijanto, Goldstein, Grad e Lipsitch, 2020).

4. REVISÃO TEÓRICA

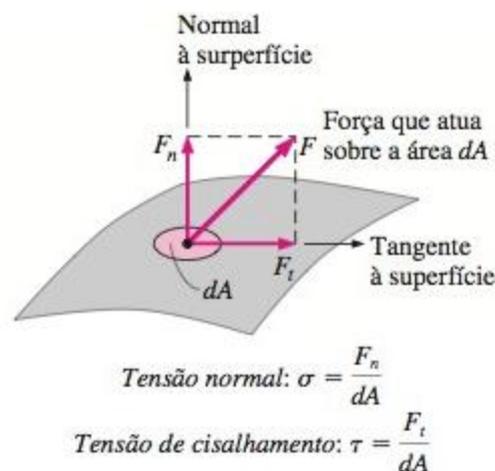
4.1. DINÂMICA DOS FLUIDOS

A dinâmica dos fluidos é o ramo da mecânica dos fluidos que estuda o comportamento físico dos fluidos em movimento, sejam eles líquidos ou gases. Ela possui ilimitadas aplicações práticas na engenharia química, como a recuperação de petróleo, o dimensionamento de tubulações e bombas, o controle da vazão de escoamentos, o planejamento de operações unitárias, e também o entendimento da dinâmica das gotículas do espirro e tosse humanas.

Um fluido é uma substância no estado líquido ou gasoso (Çengel e Cimbala, 2012), que se deforma continuamente sob ação de esforço de corte, e portanto, quando um fluido está em repouso não há tensões de cisalhamento (Welty et al, 2001). Nos

fluidos, a tensão de cisalhamento corresponde à componente tangencial da força que atua sobre uma superfície por unidade de área e é proporcional à taxa de deformação, que tende sempre para um certo valor.

Figura 1 – Tensão normal e tensão de cisalhamento na superfície de um elemento de fluido.



Fonte: ÇENGEL e CIMBALA (2012)

4.1.1. Classificação dos escoamentos

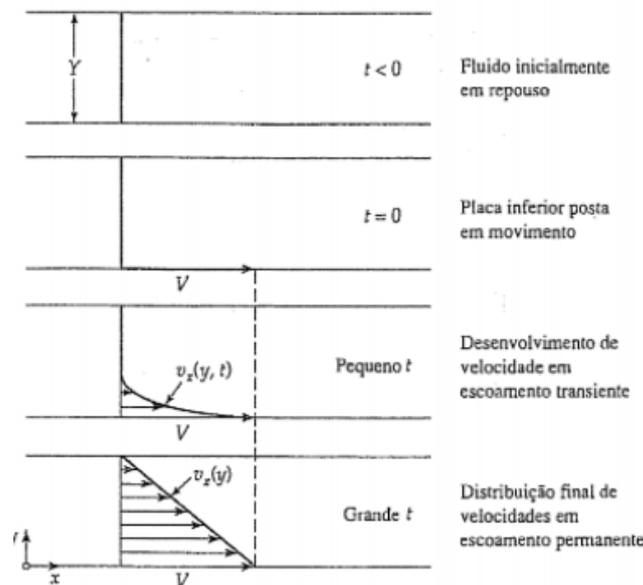
A dinâmica de fluidos envolve diversos conceitos relacionados ao escoamento de um fluido, que pode descrever diferentes tipos de sistemas. Assim, o escoamento de um fluido pode adquirir diversas classificações conforme as características que ele possui. Um escoamento pode ser classificado como viscoso ou não viscoso, laminar ou turbulento, em regime permanente ou não permanente, interno ou externo, compressível ou incompressível, natural ou forçado ou ainda unidimensional, bidimensional ou tridimensional.

O escoamento viscoso, ou invíscido, envolve o conceito da propriedade física viscosidade, que é uma propriedade do fluido que mede a resistência interna ao escoamento. Ela é causada por forças coesivas entre as moléculas num líquido e por colisões moleculares nos gases. Todo escoamento envolve efeitos viscosos em algum grau, logo não há fluido com viscosidade nula (ÇENGEL e CIMBALA, 2012).

Quando um fluido escoar sobre uma placa plana, as camadas dele se movem uma sobre a outra, e se forma uma força de atrito entre elas, em que a camada mais lenta tenta reduzir a velocidade da camada mais rápida, oferecendo uma resistência interna ao escoamento do fluido, que é quantificada pela viscosidade. Dessa forma, os escoamentos em que os efeitos da força de atrito são significativos são classificados como escoamentos viscosos, e aqueles que ocorrem em regiões mais afastadas da superfície sólida, ou seja, onde as forças viscosas são desprezíveis em relação as forças inerciais e de pressão, são classificados como escoamentos não viscosos.

Além dessa classificação, os escoamentos podem se dividir em laminares e turbulentos. O escoamento laminar é ordenado, caracterizado por camadas suaves do fluido, ao contrário do turbulento, que é irregular e caótico e, geralmente ocorre em altas velocidades. Assim, o escoamento de fluidos muito viscosos é tipicamente laminar e o de fluidos pouco viscosos, como o ar, é tipicamente turbulento (Bird, 2004).

Figura 2 – Desenvolvimento de perfil laminar permanente de velocidades para um fluido contido entre duas placas.



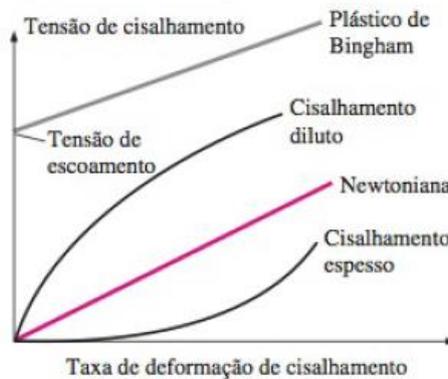
Fonte: Bird (2004)

Ao contrário do escoamento em regime não permanente, durante o escoamento em regime permanente as propriedades do fluido permanecem constantes ao longo do tempo em um ponto fixo, apesar de poderem mudar de um local para outro.

A depender da variação da densidade do fluido ao longo do escoamento, pode-se classificar o escoamento como compressível ou incompressível. Aquele que é incompressível, como o dos líquidos, apresenta uma densidade constante em todos os pontos, mantendo o volume inalterado ao longo do movimento. Já em relação a como o movimento do fluido foi iniciado, o escoamento pode ser natural, que é aquele em que o fluido se movimenta através de meios naturais, ou forçado, em que o fluido se movimenta sobre uma superfície ou tubo por meios externos, como uma bomba ou ventoinha. Com relação a distribuição de velocidade do escoamento, ou seja, se ela varia em uma, duas ou três dimensões, o escoamento pode ser uni, bi ou tridimensional, respectivamente.

No escoamento de um fluido também é estudado o comportamento reológico dele, ou seja, a deformação que ele sofre ao escoar. Assim, classifica-se os fluidos em newtonianos e não newtonianos. Os fluidos newtonianos são aqueles para os quais a tensão de cisalhamento é linearmente proporcional à taxa de deformação de cisalhamento (Çengel, 2012), sendo exemplificados pela água, ar e outros gases, gasolina, querosene e outros líquidos à base de óleo (Çengel, 2012). Por sua vez, os fluidos não newtonianos são aqueles para os quais a tensão de cisalhamento não é linearmente proporcional à taxa de deformação de cisalhamento, como por exemplo, lamas e suspensões coloidais, soluções de polímeros, sangue, pasta e massa de bolo (Çengel, 2012). Além deles, existem os fluidos viscoelásticos, que são aqueles que retornam (totalmente ou parcialmente) à sua forma original depois de a tensão aplicada ser removida; os fluidos pseudoelásticos, como as tintas, um tipo de fluido não newtoniano, o qual se torna menos viscoso à medida que é cisalhado; os fluidos plásticos, aqueles em que o efeito de diminuição de cisalhamento é extremo, e, alguns deles são classificados em fluidos plásticos de Bingham, como o creme dental, pois é necessária uma tensão finita (tensão de escoamento) para que comecem a fluir; os fluidos de cisalhamento ou fluidos dilatantes, que se comportam aumentando a viscosidade quanto mais são cisalhados, como ocorre com a areia movediça. Na Figura 3 está representado o comportamento reológico destes tipos de fluidos.

Figura 3 – Comportamento reológico dos fluidos – a tensão de cisalhamento como uma função da taxa de deformação de cisalhamento



Fonte: Çengel, 2012

4.1.2. Cinemática dos fluidos

Segundo o autor Welty (2011), um sistema é definido como uma coleção de matéria de identidade fixa. As leis da física, que são a base da dinâmica dos fluidos, como a lei da conservação da massa, a segunda lei de Newton e a primeira lei da termodinâmica, concedem a interação de um sistema com a sua vizinhança. Para aplicar essas leis, é necessário determinar um sistema específico para que a análise delas possa ser feita, sendo que em determinados casos essa identificação pode ser complexa e difícil. Assim, para contornar a dificuldade em delimitar um sistema, a abordagem de volume de controle se torna útil e mais simples. Então, um volume de controle, que pode ser finito ou infinitesimal, é uma região do espaço através do qual o fluido escoar e que muda de instante em instante (Welty, 2011).

A cinemática dos fluidos, que faz parte da dinâmica dos fluidos, estuda como eles escoam e como se pode descrever o movimento deles. Existem duas formas fundamentais para descrever o movimento de um fluido: a descrição lagrangiana e descrição euleriana. A descrição lagrangiana segue uma massa de identidade fixa, corpos individuais, para determinar, por exemplo, o comportamento da velocidade e da posição com o tempo. Porém, esse tipo de descrição não é a mais adequada para descrever muitas situações que

envolvem o escoamento de fluidos, pois não se pode definir e identificar facilmente as parcelas do fluido à medida que elas se movimentam e nem descrever de forma simples as interações entre elas, já que se deformam continuamente ao longo do escoamento. Por tais razões é comum utilizar o método da descrição euleriana para descrever o escoamento de um fluido, já que nela é definido um volume finito, chamado de volume de controle ou domínio de escoamento, através do qual o fluido escoar no sentido para dentro ou para fora. Além disso, ao invés de acompanhar a velocidade, por exemplo, de uma massa de partículas de fluido com identidade fixa, define-se as variáveis de campo, que são funções do espaço e do tempo, dentro do volume de controle. Ou seja, elas são definidas em qualquer local (x, y, z) do volume de controle e em qualquer instante de tempo t . Para um escoamento de fluido tridimensional em regime não permanente em coordenadas cartesianas, pode-se citar como exemplos de variáveis de campo o campo de pressão, que é uma variável de campo escalar, a qual pode ser definido da forma $P = P(x, y, z, t)$. O campo de velocidade, que é uma variável de campo vetorial e seria representado da forma $\vec{V} = \vec{V}(x, y, z, t)$. Já o campo de aceleração, também vetorial, da forma $\vec{a} = \vec{a}(x, y, z, t)$. Juntas, essas variáveis de campo definem o campo de escoamento, em que as variáveis de campo podem ser expandidas em coordenadas cartesianas (x, y, z) , $(\vec{i}, \vec{j}, \vec{k})$, de forma que a velocidade, por exemplo, seria escrita como $\vec{V} = (u, v, w) = u(x, y, z, t)\vec{i} + v(x, y, z, t)\vec{j} + w(x, y, z, t)\vec{k}$.

4.1.3. Definições

4.1.3.1. Número de Reynolds

O número de Reynolds é um número adimensional, que descreve as características físicas do fluxo de fluido. Ele revela a relação entre as forças inerciais (termos advectivos, cujos efeitos são amplificadores de perturbações e geradores de instabilidades) e as forças viscosas (termos difusivos, cujos efeitos são amortecedores ou inibidores da formação de instabilidades), um parâmetro muito usado para prever a condição do escoamento: laminar ou turbulento. Este número é descrito pela Equação 1, e, a partir dela, pode-se dizer que quando as forças viscosas são dominantes, ou seja, quando o denominador da

equação é grande e supera o numerador, o fluxo é lento, o número de Reynolds é baixo e portanto, o fluxo é laminar. Em contrapartida, quando o numerador é suficientemente grande, ou seja, a velocidade de escoamento do fluido é alta, a massa específica e a dimensão característica também, diz-se que as forças inerciais dominam sobre as forças viscosas. Por isso, o número de Reynolds é alto e portanto, o fluxo é turbulento.

$$Re = DV\rho/\mu = DV/v \quad (\text{Equação 1})$$

Em que D é uma dimensão linear característica (diâmetro hidráulico ou o comprimento percorrido do fluido), V é a velocidade média do fluxo, ρ é a massa específica do fluido, μ é a viscosidade dinâmica dele e v é a sua viscosidade cinemática.

Como dito, o número de Reynolds prevê quando o escoamento é laminar ou turbulento, ou ainda quando é um fluxo de transição. Dessa forma, na faixa de $Re < 2000$ caracteriza-se escoamento laminar, em que a velocidade de fluxo é relativamente baixa, as partículas de fluido se movem em linhas retas e as camadas de fluido se movem umas sobre as outras sem se misturarem, de maneira ordenada. Já na faixa de $2000 < Re < 4000$, tem-se um fluxo de transição, instável, que marca o início de uma turbulência. E por sua vez, na faixa de $Re > 4000$ tem-se o escoamento turbulento, em que a velocidade de fluxo é alta, as partículas do fluido se movem irregularmente na direção do fluxo.

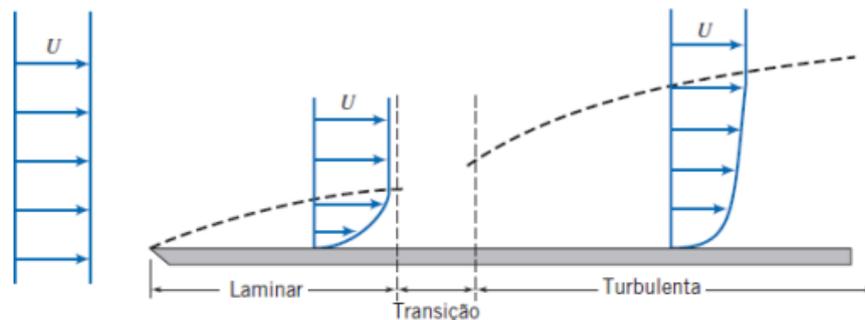
4.1.3.2. Camada limite

O conceito da camada limite, introduzido por Ludwig Prandtl, marcou o começo da era moderna da mecânica dos fluidos, pois permitiu a solução de problemas de escoamentos viscosos, que apesar de serem descritos pelas equações de Navier-Stokes, eram difíceis de serem solucionadas para esse tipo de escoamento. Prandtl mostrou que muitos escoamentos viscosos podem ser analisados dividindo o escoamento em duas regiões, uma próxima das fronteiras sólidas e a outra cobrindo o resto do escoamento, e que o efeito da viscosidade é importante apenas na camada limite (região adjacente a uma fronteira sólida), ao contrário da região fora da camada limite, em que o efeito da viscosidade é desprezível e o fluido pode ser tratado como não viscoso.

Na camada limite, tanto as forças viscosas quanto as forças de inércia são importantes, e devido a isso, o número de Reynolds (que representa a razão entre as forças de inércia e as forças viscosas) é significativo na caracterização dos escoamentos da camada limite. Na equação do número de Reynolds o escoamento de camada limite pode ser laminar ou turbulento, e a região de transição entre esses tipos de escoamento pode ocorrer em diferentes valores de número de Reynolds.

Em muitas situações de escoamento real, uma camada limite desenvolve-se sobre uma superfície longa, essencialmente plana, como por exemplo nos escoamentos sobre cascos de navios e de submarinos, asas de aviões e movimentos atmosféricos sobre terreno plano (FOX, 2010). Dessa forma, se torna simples descrever o escoamento sobre uma placa plana infinita, como na Figura 4, cuja velocidade U fora da camada limite é constante e, por isso, a pressão também será constante considerando que esta região é não viscosa, incompressível e está em regime permanente. Esta pressão constante é a pressão “sentida” pela camada limite. Este é um escoamento com gradiente de pressão zero (FOX, 2010).

Figura 4 – Camada limite sobre uma placa plana



Fonte: FOX et al, 2010.

A Figura 4 mostra um quadro qualitativo do crescimento de uma camada limite sobre uma placa plana. A camada limite é laminar por uma curta distância a jusante da borda de ataque; a transição ocorre sobre uma região da placa e não sobre uma linha única transversal à placa. A região de transição estende-se para jusante até o local onde o escoamento da camada limite torna-se inteiramente turbulento (FOX et al, 2010). Há

vários fatores que afetam a transição de camada –limite, como o gradiente de pressão, a rugosidade superficial, a transferência de calor, as forças de campo e as perturbações da corrente livre. Vê-se também que a camada –limite turbulenta cresce mais rápido que a camada limite laminar.

O comprimento x é medido a partir da borda de ataque da placa. Segundo FOX et al (2010), para fins de cálculo, sob condições típicas de escoamento, considera-se que a transição ocorre, geralmente, em um número de Reynolds de 500.000. Para o ar na condição padrão, com velocidade de corrente livre $U = 30 \text{ m/s}$, isto corresponde a $x \approx 0,24 \text{ m}$.

4.1.3.3. Escoamento turbulento

A turbulência é um fenômeno que, em geral, surge de uma instabilidade do escoamento em regime laminar, quando o número de Reynolds torna-se grande, sendo essas instabilidades relacionadas com interações entre os termos viscosos e termos de inércia não lineares nas equações de quantidade de movimento linear. O escoamento turbulento é caracterizado por ser sempre tridimensional e transiente, caótico e desordenado, com a formação de turbilhões devido à corrente principal e aos movimentos randômicos e reversos do escoamento, razão pela qual é feita a decomposição de Reynolds da velocidade (randômica), pressão e outras variáveis em um termo médio e outro de flutuação, fazendo-se necessário a utilização de métodos estatísticos que indiquem a probabilidade de eventos.

Na turbulência tem-se a presença de flutuações térmicas e de concentração, que cria fortes e numerosos gradientes locais e torna o processo de difusão molecular mais eficiente. Assim, a difusividade da turbulência acaba sendo uma fonte homogeneizadora e importante para aumentar a taxa de transferência de momento ou de calor. Outra característica da turbulência é que nele ocorre o processo de dissipação viscosa de energia cinética turbulenta, gerando aumento da energia interna do fluido.

Quanto ao problema numérico da turbulência, que é complexo e necessita de um grande número de graus de liberdade, a solução direta das equações de Navier-Stokes, que governam este fenômeno, levam ao comportamento aleatório devido a sua natureza

não linear e também a impossibilidade de serem definidas condições de contorno a cada instante de tempo e a cada ponto da fronteira, pelo menos para escoamentos de interesse prático (Silva, 2004). Para a maioria das aplicações de engenharia, segundo Pope (2000), não é necessário que a solução das variáveis características do escoamento sejam exatas, sendo suficiente uma predição adequada dos primeiros momentos estatísticos do sistema estudado, o que leva ao uso de ferramentas estatísticas na modelagem da turbulência. Os primeiros modelos utilizados para descrever a transferência de quantidade de movimento e energia nesse tipo de escoamento empregavam grandezas adimensionais para a caracterização dele, relacionando parâmetros como o número de Nusselt (Nu) em função do número de Reynolds (Re) e de Prandtl (Pr). Porém, esses modelos, apesar de serem úteis em muitos casos, são restritos a geometrias específicas e a faixas de Re e de Pr , e não possibilitam a solução detalhada do escoamento. Com o avanço computacional, outros modelos puderam ser utilizados para solucionar as equações governantes do escoamento turbulento, como o método das equações médias de Reynolds (Reynolds Averaged Navier-Stokes, RANS), que se baseia nas equações de Navier-Stokes médias no tempo, o método da Simulação de Grandes Escalas (Large Eddy Simulation, LES), que faz o cálculo dos turbilhões de grandes escalas, com uma modelagem dos turbilhões de escala menor, e por último, o método de Simulação Numérica Direta (Direct Numerical Simulation, DNS), que calcula todas as escalas de comprimento da turbulência, solucionando todos os seus graus de liberdade.

O método DNS, apesar de solucionar todo o espectro de frequência da turbulência, é limitado a escoamentos com baixos valores de Re . Para escoamentos com maiores valores de Re , o método LES é o mais indicado, pois nele as equações de Navier-Stokes são filtradas no espaço físico ou no espectro de frequência. Em muitos problemas é relevante que se descreva o escoamento turbulento nas menores escalas, já em outros é suficiente a descrição do escoamento médio. Para esse tipo de descrição, do escoamento médio, é normalmente utilizado o método RANS, em que as propriedades do escoamento podem ser decompostas em uma quantidade média e uma flutuação associada a turbulência, obtendo-se uma como solução equações através de uma média temporal das equações de Navier-Stokes.

4.1.3.4. Força de arrasto e força de sustentação

A força que um fluido em movimento exerce sobre um corpo em direção do escoamento é chamada de arrasto. Um fluido em movimento, além de exercer forças de pressão normais à superfície de um corpo imerso nele, também exerce forças tangenciais de cisalhamento na superfície devido à condição de não-escorregamento causada por efeitos viscosos. Em geral, essas forças possuem componentes na direção do escoamento e por isso, a força de arrasto é devida aos efeitos tanto da pressão quanto de cisalhamento na parede, na direção do escoamento. Mas, essas forças também possuem componentes na direção normal ao escoamento, cuja soma é chamada de força de sustentação, a qual tende a mover o corpo nesta direção.

As forças de arrasto e sustentação dependem da densidade do fluido, da velocidade a montante e do tamanho, forma e orientação do corpo, entre outras coisas. Para representar as características de arrasto e sustentação do corpo, trabalha-se com números adimensionais, como o coeficiente de arrasto, $C_D \approx 0,24$, expresso pela Equação 2, e o coeficiente de sustentação, C_L , expresso pela Equação 3,

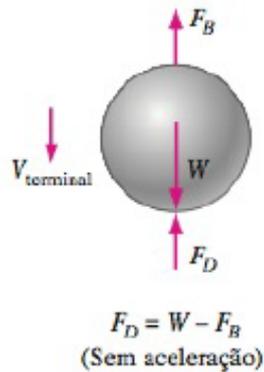
$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2}\rho V^2 A} \quad (\text{Equação 2})$$

$$C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2}\rho V^2 A} \quad (\text{Equação 3})$$

Em que A é a área frontal do corpo (área projetada sobre um plano normal à direção do escoamento). Em alguns casos, esses coeficientes dependem do número de Reynolds e da rugosidade da superfície.

Um corpo em queda livre inicialmente acelera sob a influência do seu próprio peso, mas à medida que se movimenta, encontra uma resistência que age no sentido oposto ao movimento, que é a força de arrasto. Quando as forças sobre o corpo se equilibram, ou seja, quando a força de arrasto se igual à força peso menos a força de flutuação, a resultante se torna zero e o corpo atinge a velocidade terminal, que é constante e máxima. Este esquema é mostrado na Figura 5.

Figura 5 – Durante a queda livre, um corpo alcança sua velocidade terminal quando a força de arrasto se torna igual ao peso do corpo menos a força de flutuação.



Fonte: Çengel, 2012.

Como dito, a força de arrasto é a força total exercida por um fluido sobre um corpo na direção do escoamento devido aos efeitos combinados de forças de cisalhamento na parede e forças de pressão. A parte do arrasto que é devida, diretamente, à tensão de cisalhamento na parede é chamada de arrasto de atrito superficial (ou apenas arrasto de atrito), já que ela é causada por efeitos de atrito. Ela é a componente da força de cisalhamento da parede na direção do escoamento, ou seja, é dependente da orientação do corpo e da intensidade da tensão de cisalhamento na parede, assim como também é uma função que depende da viscosidade de forma diretamente proporcional. Por sua vez, a parte que é devida diretamente à pressão P é chamada de arrasto de pressão (ou arrasto de forma, por depender da forma ou perfil do corpo). Ambos os coeficientes podem ser definidos pelas Equações 4 e 5, respectivamente.

$$C_{D,atrito} = \frac{F_{D,atrito}}{\frac{1}{2}\rho V^2 A} \quad (\text{Equação 4})$$

$$C_{D,pressão} = \frac{F_{D,pressão}}{\frac{1}{2}\rho V^2 A} \quad (\text{Equação 5})$$

Ademais, o coeficiente total de arrasto ou força de arrasto pode ser determinado somando o arrasto de atrito superficial e o arrasto de pressão, como na Equação 6.

$$C_D = C_{D,atrito} + C_{D,pressão} \quad (\text{Equação 6})$$

É importante tratar também da relação entre o arrasto de atrito e o número de Reynolds. O número de Reynolds é inversamente proporcional à viscosidade do fluido e por isso, a contribuição do arrasto de atrito para o arrasto total em corpos rombudos é menor com número de Reynolds altos, chegando a ser desprezível se ele for consideravelmente alto, o que torna o arrasto de pressão, nesse caso, o principal tipo de arrasto. Fazendo o mesmo tipo de análise, pode-se dizer que para números de Reynolds baixos, o arrasto de atrito é aquele que mais contribui para o arrasto total, como é o caso de corpos altamente carenados, como os aerofólios. Além de relacionar-se com o número de Reynolds, o arrasto de atrito é proporcional à área da superfície do corpo, ou seja, corpos com uma área superficial maior sofrem um arrasto de atrito maior. O coeficiente de arrasto de atrito é independente da rugosidade superficial no escoamento laminar, mas é uma função que depende muito da rugosidade superficial no escoamento turbulento devido aos elementos de rugosidade superficial que se projetam mais na camada limite (Çengel, 2012). Por sua vez, o arrasto de pressão é proporcional à área frontal e à diferença entre as pressões que agem na frente e atrás do corpo imerso. Por isso, o arrasto de pressão geralmente é dominante para corpos rombudos, enquanto que para corpos carenados é pequeno e para placas planas e finas paralelas ao escoamento é zero. O arrasto de pressão é mais significativo quando a velocidade do fluido é muito alta para o fluido seguir a curvatura do corpo e portanto o fluido se separa do corpo em algum ponto e cria uma região de pressão muito baixa na parte de trás. Neste caso, o arrasto de pressão se dá pela grande diferença de pressão entre os lados da frente e de trás do corpo.

4.2. EQUAÇÕES DO ESCOAMENTO DE UM FLUIDO

A análise do escoamento de um fluido pode ter um caráter integral, ou seja, baseada na técnica do volume de controle, ou um caráter diferencial, baseada na técnica do domínio de escoamento. Cada uma delas fornece informações diferentes, conforme o interesse de quais variáveis se quer analisar.

4.2.1. Análise integral

A análise baseada na técnica do volume de controle é útil para quando há o interesse em analisar as características gerais dele, como a vazão mássica que entra e sai através da superfície de controle ou as forças que são aplicadas a um corpo. Porém, como o interior do volume de controle não é levado em conta e nem mesmo os detalhes da sua geometria, neste tipo de análise não é possível obter informações mais detalhadas sobre as propriedades do escoamento, como a velocidade ou a pressão em pontos no interior do volume de controle (Çengel, 2012)

4.2.1.1. Conservação da massa

A Equação da continuidade pode ser expressa de forma geral pela Equação 7:

$$\int_{VC} \frac{\partial \rho}{\partial t} dV + \int_{SC} \rho \vec{V} \cdot \vec{n} dA = 0 \quad (\text{Equação 7})$$

em que o vetor velocidade (\vec{V}) refere-se à velocidade absoluta do volume de controle e o segundo termo da equação representa a taxa de variação total da massa que sai menos a taxa de variação total da massa que entra no volume de controle, através da superfície de controle. Assim, a equação se torna:

$$\int_{VC} \frac{\partial \rho}{\partial t} dV - \sum_e \dot{m} + \sum_s \dot{m} = 0 \quad (\text{Equação 8})$$

4.2.1.2. Conservação da quantidade de movimento

O estudo do fluxo de fluidos é baseado nas leis físicas fundamentais. Assim, as equações da quantidade de movimento derivam da segunda lei do movimento de Newton, a qual expressa que a taxa de variação da quantidade de movimento de um sistema é igual à força líquida que atua sobre o sistema e realiza-se na direção da força resultante (Welty, 2011). A segunda Lei de Newton pode ser expressa pela Equação 9:

$$\sum F = \frac{d}{dt} (mu) = \frac{d}{dt} QM \quad (\text{Equação 9})$$

em que F refere-se às forças externas que atuam sobre o sistema, m a massa dele, u a sua velocidade e QM a quantidade de movimento linear total do sistema.

A quantidade de movimento é uma propriedade extensiva, manifestada quando um corpo sofre uma velocidade e transfere esse movimento a outro corpo. Assim, o balanço da quantidade de movimento exprime a influência das forças atuantes (como peso, pressão e viscosidade) no volume de controle na transferência da quantidade de movimento. Essas forças podem ser tanto as forças de superfície devido às interações entre o fluido no volume de controle e seus arredores através de contato direto, quanto de forças corporais resultantes da localização do volume de controle em um campo de força, como o campo gravitacional e a força resultante (Welty, 2011).

O balanço da quantidade de movimento (QM) linear de um sistema em relação a um volume de controle (VC) pode ser escrita por meio da equação geral abaixo.

$$\left| \begin{array}{c} \text{Taxa de acúmulo} \\ \text{de QM dentro} \\ \text{do VC} \end{array} \right| - \left| \begin{array}{c} \text{Taxa de QM} \\ \text{que entra} \\ \text{no VC} \end{array} \right| + \left| \begin{array}{c} \text{Taxa de QM} \\ \text{que sai} \\ \text{do VC} \end{array} \right| = \left| \begin{array}{c} \text{Somatório} \\ \text{das forças} \\ \text{agindo no VC} \end{array} \right|$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{VC} \rho \vec{V} dV - \int_{(SC)_e} \rho \vec{V} (\vec{V} \cdot \vec{n}) dA + \int_{(SC)_s} \rho \vec{V} (\vec{V} \cdot \vec{n}) dA = \Sigma \vec{F} \quad (\text{Equação 10})$$

Em que \vec{n} é o vetor normal, que dá apenas a direção do vetor velocidade, e o termo “ $(\vec{V} \cdot \vec{n})$ ” é o produto escalar entre ambos os vetores, o qual possui sinal negativo quando o fluxo de quantidade de movimento entra no volume de controle, e positivo quando esse fluxo deixa o volume de controle. Ademais, a velocidade \vec{V} é a velocidade absoluta do volume de controle. A Equação é tida como o Teorema de Quantidade de Movimento da mecânica dos fluidos.

Considerando a atuação de forças mútuas de pequeno alcance (representado pela introdução do termo com o tensor de tensão - σ_{ij}) através da superfície de controle e também, de forças de longo alcance, como o peso, e que o escoamento é não viscoso, ou seja, não é influenciado pelas forças viscosas, a equação se torna:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{VC} \rho \vec{V} dV - \int_{(SC)_e} \rho \vec{V} (\vec{V} \cdot \vec{n}) dA + \int_{(SC)_s} \rho \vec{V} (\vec{V} \cdot \vec{n}) dA = \int_{SC} \sigma_{ij} dA + \int_{VC} \rho g dV$$

(Equação 11)

A segunda integral da equação representa o fluxo convectivo de quantidade de movimento, ou seja, o transporte da matéria, trazendo consigo suas propriedades. Além disso, o termo da integral do esforço de corte representa um fluxo difusivo de quantidade de movimento, como o atrito e resistência da parece ao escoamento.

4.2.2. Análise diferencial

Por outro lado, a análise diferencial, aquela que é baseada na técnica do domínio de escoamento, envolve a aplicação de equações diferenciais de movimento do fluido em todos os pontos no campo de escoamento sobre a região do domínio de escoamento. Essa região pode ser entendida como infinitos e minúsculos volumes de controle empilhados e lado a lado, ocupando todo o campo de escoamento, de modo que, no limite, à medida que o número e o tamanho desses minúsculos volumes de controle se aproximam de um ponto, as equações de conservação da massa e quantidade de movimento se simplificam, tornando-se equações diferenciais parciais, que por sua vez, ao serem resolvidas fornecem detalhes sobre as propriedades (velocidade, massa específica, pressão etc) em cada ponto de todo o domínio do escoamento.

No caso de escoamentos que ocorrem em regime transiente, a solução das equações diferenciais são obtidas por meio de softwares específicos.

Tendo isso em vista, a equação da conservação da massa, que se resume na equação da continuidade para escoamentos em regime permanente, assim como a equação conservação da quantidade de movimento, que deriva da Segunda Lei de Newton e dá origem à equação de Navier-Stokes, se aplicam a todos os pontos no campo de escoamento, fornecendo soluções para todos os detalhes do escoamento em qualquer ponto do domínio de escoamento (Çengel, 2012)

4.2.2.1. Equação da continuidade

Aplicando o teorema do divergente na equação de conservação de massa integral, em que se transforma a integral da área sobre a superfície que define o volume em uma

integral de volume do divergente de um vetor, converte-se a integral da área do segundo termo da equação em uma integral de volume do divergente do vetor velocidade. Assim, a Equação 11 se torna:

$$\int_{VC} \frac{\partial \rho}{\partial t} dV + \int_{VC} \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{V}) \cdot dV = 0 \quad (\text{Equação 12})$$

Sendo que ao combinar as integrais de volume em uma só, a Equação 13 se torna:

$$\int_{VC} \left[\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{V}) \right] dV = 0 \quad (\text{Equação 13})$$

Como a integral resulta em zero, os termos entre os colchetes devem ser iguais a zero, o que resulta na equação da continuidade, geral, expressa pela Equação 14:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{V}) = 0 \quad (\text{Equação 14})$$

Há uma forma alternativa de expressar a equação da continuidade para escoamentos em regime não permanente e compressíveis, que é em termos de uma equação diferencial parcial, resolvendo o produto no termo do divergente, dada pela equação abaixo:

$$\frac{1}{\rho} \frac{D\rho}{Dt} + \vec{\nabla} \cdot \vec{V} = 0 \quad (\text{Equação 15})$$

Considerando que o escoamento ocorre em regime permanente, a equação da continuidade se reduz da seguinte forma para fluidos compressíveis e incompressíveis, respectivamente.

Equação da continuidade compressível:

$$\vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{V}) = 0 \quad (\text{Equação 16})$$

que se reduz, em coordenadas cartesianas, à seguinte equação:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (\text{Equação 17})$$

Equação da continuidade incompressível:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{V} = 0 \quad (\text{Equação 18})$$

que se reduz, em coordenadas cartesianas, à equação abaixo:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (\text{Equação 19})$$

4.2.2.2. Equação da quantidade de movimento

A forma diferencial da conservação do momento é tida aplicando o teorema do divergente, se tornando:

$$\int_{VC} \left[\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{V}) + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{V} \vec{V}) - \rho \vec{g} - \vec{\nabla} \cdot \sigma_{ij} \right] dV = 0 \quad (\text{Equação 20})$$

Para que a integral resulte em zero, os termos entre subscrito devem ser iguais a zero também. Logo, a equação diferencial geral da conservação do momento, conhecida como equação de Cauchy, pode ser expressa pela Equação 21:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{V}) + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{V} \vec{V}) = \rho \vec{g} + \vec{\nabla} \cdot \sigma_{ij} - \vec{\nabla} \cdot P \quad (\text{Equação 21})$$

que pode ser escrita de forma alternativa, a partir de uma equação diferencial parcial. Assim, a Equação 21 se torna a Equação 22:

$$\rho \left[\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \vec{\nabla}) \vec{V} \right] = \rho \frac{D\vec{V}}{Dt} = \rho \vec{g} + \vec{\nabla} \cdot \sigma_{ij} = 0 \quad (\text{Equação 22})$$

4.2.2.3. Equação de Navier-Stokes

A Equação de Navier-Stokes é uma equação diferencial que descreve o escoamento de fluidos influenciado pela mudança de pressão e pelas forças viscosas que atuam sobre ele. Assim, é utilizada para descrever escoamentos incompressíveis de

fluidos newtonianos, em que as propriedades do fluido são constantes (massa específica, viscosidade, condutividade térmica etc). Ela pode ser expressa de forma geral pela equação vetorial expressa na Equação 23:

$$\rho \frac{D\vec{V}}{Dt} = -\vec{\nabla}P + \mu \nabla^2 \vec{V} + \rho \vec{g} \quad (\text{Equação 23})$$

Esta é uma equação fundamental na mecânica dos fluidos. Trata-se de uma equação diferencial parcial não permanente, vetorial, não-linear, de segunda ordem. Ela possui quatro incógnitas (três componentes da velocidade e a pressão) e representa três equações, já que é uma equação vetorial e por isso possui três componentes. Para tornar o problema solucionável, é necessário uma outra equação, de modo que essa quarta equação é a equação da continuidade incompressível (Equação 24), considerando o escoamento em regime permanente. A equação de Navier-Stokes incompressível e a equação da continuidade, expandidas em coordenadas cartesianas (x, y, z) e (u, v, w) estão expressas abaixo:

Equação da continuidade incompressível:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (\text{Equação 24})$$

Componente x da equação de Navier-Stokes incompressível:

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \rho g_x + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (\text{Equação 25})$$

Componente y da equação de Navier-Stokes incompressível:

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial y} + \rho g_y + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (\text{Equação 26})$$

Componente z da equação de Navier-Stokes incompressível:

$$\rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial z} + \rho g_z + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (\text{Equação 27})$$

Ambas as equações diferenciais, da continuidade e de Navier-Stokes, são úteis para o cálculo do campo de pressão para um corpo de velocidade conhecido e para o

cálculo dos campos de velocidade e pressão para um escoamento de geometria e condições de contorno conhecidas.

$$\rho \frac{D\vec{V}}{Dt} = -\vec{\nabla}P + \mu \nabla^2 \vec{V} + \rho \vec{g} \quad (\text{Equação 28})$$

4.3. DINÂMICA DOS FLUIDOS COMPUTACIONAL (CFD)

A dinâmica dos fluidos computacional é a área de estudos dedicada à solução de equações do escoamento de fluidos com o uso de um computador (Çengel, 2012). Tais equações, da continuidade e de Navier-Stokes, são resolvidas numericamente quando estas não são possíveis de serem resolvidas analiticamente, por serem muito complexas. Para que essas equações, que se apresentam acopladas como um sistema de equações, sejam resolvidas analiticamente de forma mais simples, é necessário que se faça algumas considerações com relação à variação das propriedades com o tempo, o regime de escoamento, a dimensionalidade dele, se é laminar ou turbulento, além da definição das condições de contorno no infinito e condições totalmente desenvolvidas para que os termos advectivos do lado esquerdo da equação de Navier-Stokes (Equação 28) desapareçam. Assim, quando é necessário modelar um escoamento turbulento, por exemplo, em que as porções do fluido se movem aleatoriamente e tridimensionalmente, os termos da equação de Navier-Stokes não podem ser ignorados, fazendo com que a solução para o problema seja encontrada somente através de métodos numéricos, o que é realizado por um computador. Nestes casos, a dinâmica dos fluidos computacional (CFD) se faz útil.

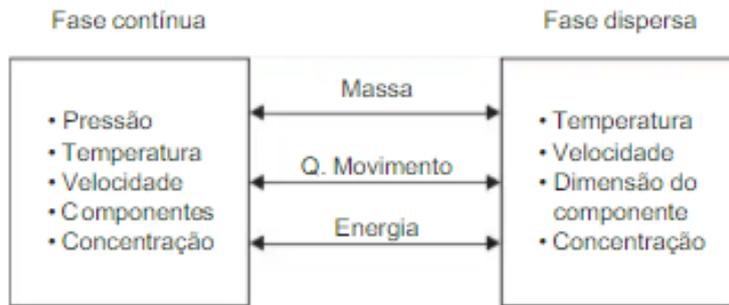
4.4. ESCOAMENTO MULTIFÁSICO

O estudo de fluxo bifásico ou multifásico tem se tornado cada vez mais importante em uma ampla variedade de sistemas de engenharia para seu projeto ideal e operações seguras. É, no entanto, de forma alguma limitado à tecnologia industrial moderna de hoje, já que os fenômenos de fluxo multifásico podem ser observados em uma série de sistemas biológicos e naturais que requerem melhor compreensão (ISHII; HIBIKI, 2011).

O escoamento multifásico é aquele em que mais de uma fase escoam simultaneamente e estão separadas por uma ou mais interfaces. Ele pode ser constituído por uma fase contínua (meio líquido ou gasoso) e uma fase dispersa (bolhas de gás, gotas de líquido ou partículas sólidas), podendo ser constituídas por espécies químicas diferentes, ou ainda por duas fases contínuas. Por fase subentende-se uma região do espaço delimitada por uma interface de espessura infinitesimal que encerra em seu interior um material com composição química homogênea, propriedades de transporte e de estado definíveis e que é separável por processos mecânicos (ROSA, 2012). O termo fase frequentemente é usado como sinônimo do estado da matéria (gás, líquido ou sólido), o que pode causar uma insegurança no emprego do termo multifásico já que nem sempre o número de estados da matéria corresponde ao número de fases de uma mistura de materiais. O escoamento multifásico pode ser classificado de acordo com as fases envolvidas, como sistemas gás-líquido, sistemas gás-sólido, sistemas líquido-sólido, sistemas líquido-líquido. Apesar de essa classificação ser agrupada em sistemas bifásicos, em situações reais é frequente a ocorrência de múltiplas fases.

A análise do escoamento multifásico é muito complexa se comparada à do escoamento monofásico, pois esse envolve diferentes regimes e modelos de fluxo, os quais exigem uma gama de informações e equações de transporte, que devem ser capazes de descrever os fenômenos de transporte de massa, quantidade de movimento e energia que ocorrem nesse tipo de escoamento. Porém, essa complexidade não se dá somente pela quantidade de equações e variáveis necessárias que devem ser resolvidas simultaneamente, mas do acoplamento existente entre as fases. Por exemplo, num escoamento com partículas dispersas num meio contínuo fluido, a presença das partículas altera as equações de transporte das fases, pois no caso de haver mudança de fase, o balanço de massa das fases é alterado. As forças interfaciais, devido ao arrasto, sustentação e empuxo da partícula, podem mudar substancialmente o balanço de forças nas equações de quantidade de movimento das fases (ROSA, 2012). Finalmente, adição ou remoção de calor, devido a efeitos de reação química entre as fases, podem alterar o balanço de energia delas (ROSA, 2012). Para melhor compreensão, a Figura 6 mostra de forma esquemática o acoplamento entre as fases e seus efeitos.

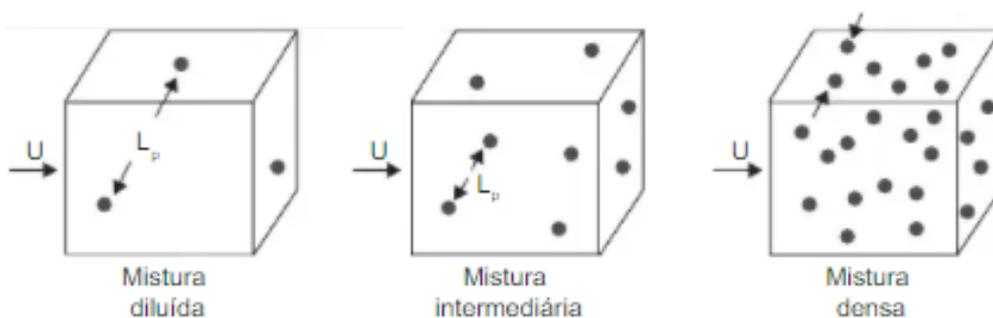
Figura 6 – Representação esquemática do acoplamento entre fases e seus efeitos



Fonte: ROSA, 2012.

O acoplamento entre as fases pode variar conforme a concentração delas. De acordo com Crowe (2006) a intensidade com que a fase dispersa influencia a fase contínua depende da razão entre a distância média entre as partículas, L_p , e do diâmetro da partícula, D_p . O escoamento com partículas dispersas podem corresponder a misturas com concentrações de partículas diluída, intermediárias e densa, cada uma com uma razão L_p/D_p diferente, conforme mostrado na Figura 7. Pode-se esperar que o grau do acoplamento cresça com o aumento das densidades de partículas ou com a diminuição da razão L_p/D_p (ROSA, 2012).

Figura 7 – Representação esquemática de uma mistura de partículas dispersas em um fluido com concentração diluída, intermediária e alta.



Fonte: ROSA, 2012.

Além da classificação conforme a concentração de partículas na mistura, Crowe (2006) classifica o acoplamento partícula-fluido em três categorias: uma via, duas vias e

quatro vias, que correspondem aproximadamente a misturas diluídas, intermediárias e densas, conforme a representação na Figura 8.

Figura 8 - Representação esquemática do acoplamento entre fases dispersa e contínua numa mistura: uma via, duas vias e quatro vias.



Fonte: ROSA, 2012.

Nas misturas diluídas a concentração de partículas é muito pequena e praticamente não afeta as equações de transporte da fase contínua e somente ela influencia o transporte da partícula, motivo pelo qual o acoplamento é denominado de uma via. Em misturas com densidades intermediárias, além de a fase contínua influenciar o transporte da partícula, as partículas também influenciam o transporte da fase contínua, e esse tipo de acoplamento é denominado de duas vias. Apesar de haver uma concentração de partículas suficientemente alta para alterar o transporte da fase contínua, elas ainda mantêm uma distância grande entre si, de forma a inibir uma interação entre partículas, tais como esteiras e colisões (ROSA, 2012). Já o acoplamento de quatro vias é caracterizado por uma alta concentração de partículas, em que a distância entre elas é curta, e por isso, as partículas estão acopladas tanto com a fase contínua quanto com elas próprias. A física dos fenômenos interfaciais é distinta para cada forma de acoplamento, exigindo um esforço maior para desenvolver os modelos que descrevem o comportamento dos diferentes fenômenos físicos envolvidos.

O fluxo bifásico pode ser classificado de acordo com a geometria das interfaces, que é mais complexa, uma vez que essas mudanças na estrutura da interface ocorrem continuamente, em três classes principais: fluxo separado, em que duas ou mais correntes

de fluidos são separadas por interfaces, de modo que as fases se desloquem de um ponto a outro sem cruzar interfaces; fluxo transicional ou misto, o qual é caracterizado pela ocorrência alternada dos padrões disperso e fases separadas; e, por fim, fluxo disperso, em que partículas discretas, sólidos e gotas ou bolhas se apresentam não conectadas umas as outras, isto é, são distribuídas num volume preenchido por uma fase contínua.

Há vários tipos de fluxo disperso que pode-se classificar de acordo com a fase de dispersão. Assim, pode-se distinguir três regimes: fluxo de bolha, em que bolhas de gás escoam num líquido; fluxo de gota ou névoa, caracterizado por gotículas líquidas movendo-se em um gás; e fluxo de partículas, em que partículas sólidas se movem em um gás ou líquido.

4.4.1. Fase contínua e fase dispersa

A fase contínua de um escoamento multifásico disperso é a fase transportadora da fase dispersa, que por sua vez, é definida por elementos tal que a passagem entre dois pontos ocorre sempre através do mesmo contínuo. Para se ter uma descrição completa dela, devem ser resolvidas as equações de movimento (continuidade, quantidade de movimento e energia) da fase contínua levando-se em consideração as condições de contorno referentes a cada uma das partículas (gotas ou bolhas) no campo de solução.

Já a fase dispersa é aquela constituída por elementos discretos, como gotas em um gás, ou bolhas em um líquido. Os elementos discretos não são interconectados, de modo que não se pode passar de um elemento à outro na fase dispersa sem passar pela fase contínua. Nos escoamentos dispersos, aquele que ocorre na fase dispersa, são comumente utilizados dois tipos de modelos na solução do problema: Lagrangeano e Euleriano. O modelo Lagrangeano é utilizado para escoamentos diluídos, em que o movimento das partículas é dominado pela interação partícula-partícula, por forças de corpo e colisões com a parede, e para escoamentos densos, em que tanto essas forças quanto as forças hidrodinâmicas são relevantes.

Dentro do modelo Lagrangeano, há alguns métodos numéricos que podem ser utilizados para a obtenção da solução do problema da fase dispersa. Se o escoamento ocorre em regime permanente e diluído é comum que se adote o método da trajetória, em

que o movimento da fase dispersa é considerado seguindo as partículas individualmente e integrando as equações de conservação de forças e quantidade de movimento, levando-se em conta também as considerações de ordem térmica. No caso dos escoamentos transientes ou densos, a solução numérica se dá pela técnica dos elementos discretos, em que a partir de um pequeno volume contendo um número razoável de partículas representativas do escoamento, e nele, elas se deslocam com as mesmas características cinemáticas, dinâmicas e térmicas (como velocidade, trajetória e temperatura) de uma única partícula, se obtém a solução para o movimento e a posição delas.

No modelo Euleriano, também chamado de dois-fluidos, a fase dispersa é tratada como uma segunda fase contínua interagindo com a fase contínua propriamente dita. Nele, as equações de conservação de massa, quantidade de movimento e energia são escritas para o movimento dos fluidos, nas quais também se incluem a modelagem de termos de transferência de massa, quantidade de movimento e de energia entre os mesmos, podendo ser resolvidas teoricamente ou numericamente. Este modelo desconsidera os efeitos que advém da natureza discreta da fase dispersa e os aproxima dos efeitos da fase contínua. Por conta disso, se obtém as médias espaciais e temporais para as propriedades e parâmetros da fase dispersa, o que envolve procedimentos matemáticos de modelagem nada simples.

4.4.2. Utilização de métodos computacionais

Os métodos computacionais vêm adquirindo uma grande importância na área de escoamento multifásico no sentido que a compreensão básica dos fenômenos vem sendo alcançada não somente através da simulação de casos em laboratório, mas como auxílio de métodos computacionais que equivalem a um laboratório multifásico virtual (ISHII e HIBIKI, 2011). Estes métodos possibilitam a investigação em cenários em que nem as técnicas experimentais conseguem extrair informações e nem os modelos teóricos são capazes de representar os complexos fenômenos (ISHII e HIBIKI, 2011).

Os métodos computacionais em escoamentos multifásicos, baseados na solução das equações de transporte para os fluidos, podem ser divididos em dois grupos: simulação direta das equações locais e instantâneas e simulação das equações médias

(Rosa, 2012). O primeiro grupo resolve as equações de transporte sem a aplicação de modelos específicos para os termos interfaciais, mas a partir dos princípios básicos de conservação de massa, quantidade de movimento e energia (Rosa, 2012). As equações de balanço são satisfeitas no domínio em que há apenas uma fase, semelhante às técnicas numéricas empregadas para escoamentos monofásicos, entretanto, nas regiões do domínio onde há a presença de interfaces, o método determina as forças interfaciais por meio das equações de balanço através dela. As técnicas representativas desse grupo, compiladas e revisadas em Prosperetti e Tryggvason (2007), são: métodos de fronteira imersa, métodos de fronteira integral para escoamentos no regime de Stokes e método Lattice-Boltzmann.

O segundo grupo emprega as equações médias de transporte empregando dois tipos de referenciais: Lagrangeano-Euleriano e Euleriano-Euleriano (Rosa, 2012). Os métodos que utilizam referencial Lagrangeano-Euleriano são denominados de métodos de partículas pontuais e aplicados somente para escoamentos dispersos (Rosa, 2012), já que tratam a fase contínua a partir de um referencial Euleriano como num escoamento monofásico, representando a interação das partículas com o fluido como se fossem forças pontuais, e tratam a fase dispersa a partir de um referencial Lagrangeano, em que cada partícula é estudada individualmente. Por sua vez, os métodos baseados num referencial Euleriano-Euleriano reduzem a complexidade do processamento computacional à medida que realizam um processo de média nas equações de transporte de forma similar ao processo de média empregado nas equações de transporte para regime turbulento. Usualmente, as equações constitutivas, que dependem do padrão do escoamento, representam os termos interfaciais e de tensão, em que a ocorrência das fases passa a ser ponderada por um processo de média no tempo, no volume ou também no conjunto, que possibilita a coexistência de duas ou mais fases num único ponto, de modo que a natureza discreta das fases é perdida e elas passam a ser tratadas de forma contínua.

O diferencial dos modelos baseados nos processos de média em relação aos demais métodos computacionais é que eles possibilitam abordar problemas complexos encontrados na maioria das aplicações de interesse prático (Rosa, 2012). Os modelos deste grupo, sendo o modelo de dois fluidos e o modelo de mistura os mais representativos, possuem capacidade de solução tridimensional e transiente em aplicações multifásicas, assim como também podem ser aplicados em situações unidimensionais e transientes típicas de escoamentos em tubulações.

5. A DINÂMICA DOS FLUIDOS NA TRANSMISSÃO DE DOENÇAS

A transmissão de patógenos de um hospedeiro para o próximo é uma etapa necessária em seu ciclo de vida, já que eles precisam se adaptar e sobreviver a essa fase obrigatória, que frequentemente envolve sua suspensão e interação com um fluido. Assim, há a necessidade de compreender os mecanismos pelos quais os fluidos moldam a dispersão e a transmissão de patógenos e como eles podem se adaptar ou mesmo influenciar o processo de transmissão para garantir sua própria sobrevivência cíclica (Zanin et al. 2016, Poulain & Bourouiba 2018, Ruhl et al. 2020).

O primeiro estudioso da hidrodinâmica formalmente envolvido em epidemiologia foi Daniel Bernoulli. Até o século XIX, acreditava-se amplamente que as doenças infecciosas eram contraídas pela inalação de vapores nocivos (chamados miasmas) que emanavam da matéria em decomposição. Foi no final do século XIX que o conceito de transmissão de agentes patogênicos específicos ganhou força, época em que os experimentos sistemáticos de Pasteur (1861) e Koch (1876) sobre antraz, tuberculose e cólera fizeram crer na teoria dos germes e no reconhecimento de que microrganismos específicos causam doenças infecciosas. Quando Flügge (1897) demonstrou a presença de patógenos em gotículas exaladas grandes o suficiente para se estabelecerem ao redor de um indivíduo infectado, a chamada transmissão de gotículas por contato direto com a fase de fluido ejetada e infectada passou a ser observada como principal via de transmissão de doenças respiratórias até a década de 1930.

A estrutura de transmissão de um patógeno de um hospedeiro a outro ocorre em quatro fases. A primeira refere-se à extração do patógeno no hospedeiro e encapsulamento do patógeno, a segunda fase, chamada de intermediária, trata da emissão do hospedeiro e do transporte de patógenos, a terceira fase relaciona-se com a ecologia e a persistência de patógenos no meio ambiente, e por fim, a quarta fase diz respeito a infiltração e infecção do novo hospedeiro (Bourouiba, 2020). Nesse contexto, a dinâmica de fluidos se encaixa na segunda fase da estrutura de transmissão, ou seja, na fase intermediária, no estudo da influência do fluido no transporte dos patógenos entre os hospedeiros. A falta de uma compreensão mecanicista na escala intermediária em que ocorre a transmissão leva a debates, abordagens contraditórias e pesquisas sem soluções. Por exemplo, as rotas de

transmissão de infecções associadas aos cuidados de saúde (nosocomiais) permanecem debatidas, com um forte foco na limpeza de superfícies como uma estratégia de mitigação, negligenciando ou descartando rotas que referem-se à contaminação do ar e persistência de patógenos transportados pelo ar. Da mesma forma acontece com as doenças respiratórias, em que a compreensão mecanicista da escala intermediária da transmissão pode levar a soluções tanto farmacológicas quanto não farmacológicas, além de estratégias de controle de epidemias como é o caso do COVID-19.

É nessa escala intermediária que os fluidos estão presentes, por isso a necessidade de compreensão da influência deles na transmissão das doenças, ou seja, do estudo da dinâmica dos fluidos envolvido. A tosse e o espirro, por exemplo, produzem uma nuvem turbulenta de alto impulso de ar quente e úmido, impulsionando e dispersando gotas carregadas de patógenos em até 8 m, em poucos segundos (Bourouiba et al. 2014; Bourouiba 2016, 2020). Além disso, as gotas exaladas podem permanecer suspensas no ar por horas, dependendo da temperatura ambiente e condições de umidade. Gotículas também podem se espalhar a partir de bolhas estourando (Bourouiba & Bush 2013, Walls et al. 2014, Poulain & Bourouiba 2018, Poulain et al. 2018) ou saltando de uma superfície úmida e contaminada (Lejeune et al. 2018, Poulain & Bourouiba 2018).

Portanto, para modelar e prever a transmissão de doenças infecciosas de hospedeiro para hospedeiro, ou seja, do hospedeiro infeccioso para o novo hospedeiro (saudável), é necessária uma compreensão física e até biológica do movimento do fluido.

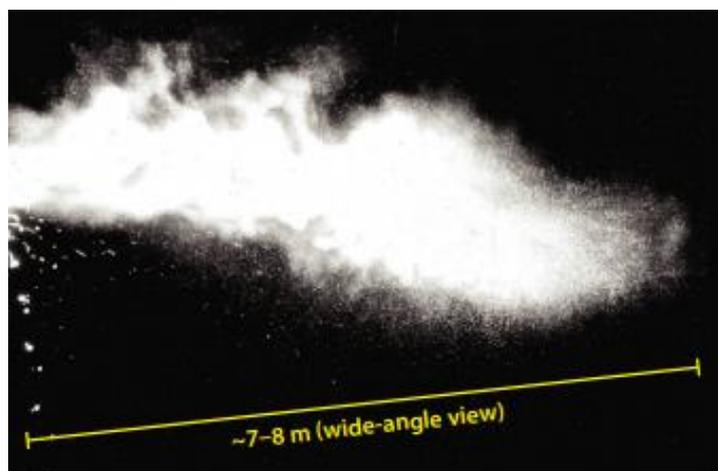
5.1. TRANSMISSÃO POR GOTÍCULAS, NÚCLEO DE GOTÍCULAS E AEROSSÓIS

As gotículas respiratórias variam em tamanho de 1 μm a 1 mm, enquanto que o núcleo de uma gota é estimado em menos de 10 μm , dependendo do seu tamanho inicial e da composição (Bourouiba 2020). Ambos podem permanecer suspensos no ar e, portanto, podem ser veículos aéreos de transmissão de patógenos. Ao contrário, o termo aerossol é um termo genérico para qualquer tipo de matéria suspensa no ar (Hirst 1995).

As exalações não emitem gotículas isoladas que evaporam e contaminam o ar ou sedimentam no solo e contaminam as superfícies nas imediações do sujeito como Wells

(1934, 1955) havia demonstrado em seus trabalhos. Segundo suas pesquisas, gotas maiores viajam mais longe do que gotas menores (encontram um arrasto significativo do ar ambiente) e as rotas de transmissão levam a distâncias de contaminação de até cerca de 2 m em ar parado. Na verdade, as exalações liberam uma nuvem gasosa multifásica totalmente turbulenta composta por ar exalado quente e úmido e gotículas mucosais suspensas de uma ampla gama de tamanhos de gotículas, variando de 1 μm a 1 mm (Figura 9) (Bourouiba et al. 2014; Bourouiba 2016, 2020).

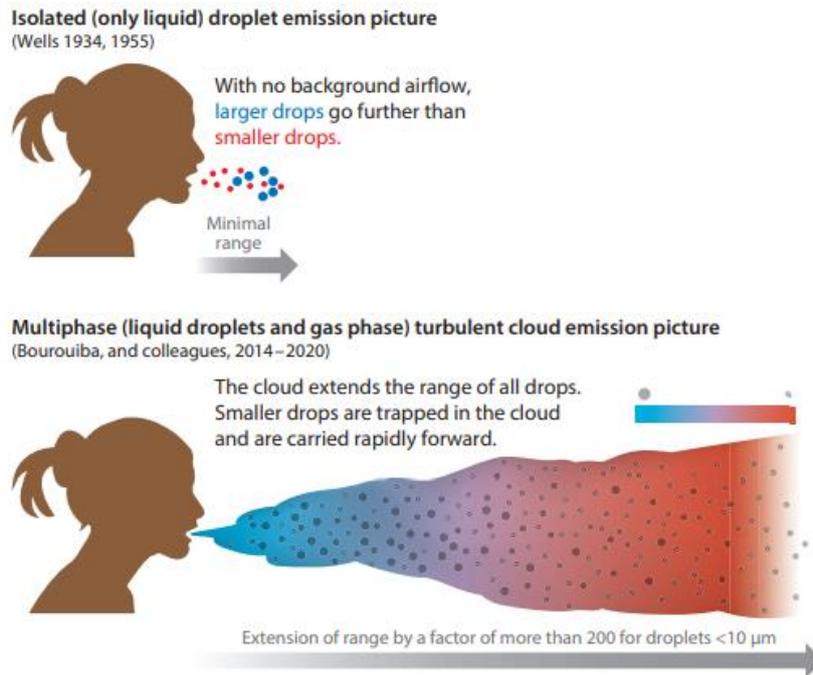
Figura 9 - Exalações como respiração, tosse e espirros liberam uma nuvem turbulenta de ar quente e úmido contendo ar com gotas em suspensão presas dentro dele. A nuvem e sua carga útil podem viajar até 8 m no caso de espirros, por exemplo.



Fonte: Bourouiba, 2020.

A Figura 10 mostra exatamente a diferença entre as visões de Wells e a recentemente desenvolvida sobre as exalações de fluidos mucosais.

Figura 10 - Comparação entre a imagem de emissão de gotículas isoladas de Wells (1934, 1955) e a imagem recentemente desenvolvida de exalações de emissão de nuvem de gás turbulenta.



Fonte: Bourouiba, 2020

Ao longo da evolução da nuvem, gotículas de todos os tamanhos se depositam continuamente para contaminar superfícies, enquanto gotículas menores evaporam e se transformam em núcleos de gotículas (Bourouiba, 2020). Esta nuvem de gás emitida é composta por gotículas de todos os tamanhos que permanecem presas dentro dela e são levadas para distâncias maiores do que elas alcançariam se tivessem sido emitidas como gotículas isoladas no ar parado. Além do momento da nuvem e sua capacidade de estender o alcance das gotículas dentro dela, o gás exalado localmente úmido pode proteger as gotículas contra a evaporação na atmosfera ambiente tipicamente mais seca e fria (em comparação com a atmosfera quente e condições totalmente umidificadas no sistema respiratório) (Bourouiba 2020).

Conseqüentemente, a fluidodinâmica da nuvem turbulenta exalada tem implicações significativas na vida real para determinação de segurança e distanciamento físico/social, necessidades de proteção respiratória para profissionais de saúde e soluções de higiene do ar interior (Bahl et al. 2020, Bourouiba 2020, Jones et al. 2020), as quais representam uma necessidade urgente que os formuladores de políticas de saúde pública devem providenciar hoje contra o COVID-19.

6. METODOLOGIA

A metodologia deste trabalho consiste em identificar estudos experimentais e numéricos recentes que buscaram analisar teoricamente, modelar e/ou simular a dinâmica de transmissão do vírus SARS-CoV-2, a fim de comprovar a contribuição do profissional engenheiro químico no entendimento do fenômeno. Nas pesquisas encontradas foram desenvolvidas equações matemáticas oriundas do estudo da dinâmica dos fluidos, mais especificamente para o escoamento multifásico e turbulento, como as equações da continuidade e de Navier-Stokes, para a nuvem de gás de expiração. Muitos chegaram a realizar também a simulação do escoamento da nuvem por meio de CFD ou DNS, proporcionando uma melhor visualização dos fenômenos envolvidos. Além dos estudos recentes, que se dedicaram ao estudo da dinâmica de transmissão do COVID-19, outras pesquisas foram realizadas em anos anteriores, que modelaram os jatos de fluidos mucosais através da tosse, espirro, fala, além da evaporação, sedimentação e condensação das partículas de fluido ao serem exaladas por humanos.

7. RESULTADOS E ANÁLISE DOS RESULTADOS

7.1. FORMAS DE O ENGENHEIRO QUÍMICO CONTRIBUIR PARA O ENTENDIMENTO DA DINÂMICA DE TRANSMISSÃO DO SARS-CoV-2 E SEUS DESAFIOS

Como dito, a compreensão de como se dá a física da transmissão do SARS-CoV-2 e de como ele se propaga no ambiente parte do conhecimento da dinâmica dos fluidos, área de domínio do profissional engenheiro químico. De forma mais específica, o engenheiro químico tem o papel de descrever o escoamento multifásico turbulento das exalações de gotículas e aerossóis no ar, analisando as fases que o compõem, as variáveis e os fenômenos físicos que o influenciam, fazendo assim uma análise teórica do mesmo. Além disso, outra tarefa importantíssima é a modelagem matemática das equações de conservação de massa, quantidade de movimento e energia e das equações constitutivas que descrevem esse tipo de escoamento de forma detalhada e confiável, estudo complexo

e de grande desafio. Não menos importante, o engenheiro químico também contribui com a utilização de métodos computacionais, seja através da fluidodinâmica computacional (CFD) ou de outros métodos numéricos, capazes de resolver essas equações matemáticas obtidas com a modelagem do fenômeno, e também de simular o escoamento da nuvem de exalação, pois é a partir das simulações que a visualização do comportamento da nuvem turbulenta emitida através da tosse, utilizando variáveis que se aproximam da realidade, permite que se faça uma espécie de ensaio da mesma. Assim, há como prever diversas situações e, a partir daí, desenvolver políticas de mitigação da doença.

7.1.1. MODELAGEM MATEMÁTICA

Quanto à descrição do escoamento das exalações de fluido mucosalivares, o desafio para o engenheiro químico é grande, já que o tipo de escoamento característico, multifásico e turbulento, é muito complexo se comparado ao escoamento monofásico e laminar, exige a análise de inúmeras variáveis e fenômenos, e do comportamento aleatório e não linear devido à turbulência e conseqüentemente, a utilização de um modelo capaz de descrevê-lo confiavelmente.

O projeto de sistemas de engenharia e a capacidade de prever seu desempenho depende da disponibilidade de dados experimentais e de modelos matemáticos conceituais que podem ser usados para descrever os processos físicos com um grau de precisão exigido (ISHII e HIBIKI, 2011). É essencial que as características físicas do fluxo de duas fases sejam modeladas e formuladas em uma base racional e apoiadas por dados científicos experimentais detalhados (ISHII e HIBIKI, 2011). Para o fluxo monofásico, o modelo conceitual é formulado em termos de equações de campo que descrevem as leis de conservação de massa, quantidade de movimento, energia, carga e outras, que por sua vez, são complementadas por equações constitutivas para o estado termodinâmico, transferência de energia, reações químicas e outros, as quais especificam as propriedades termodinâmicas, as propriedades de transporte e as propriedades químicas de um material constituinte específico. De forma semelhante, os modelos conceituais também devem descrever o fluxo multifásico em termos de equações de campo e equações constitutivas, apesar de elas serem muito mais complexas. Além disso, os modelos de turbulência devem ser capazes de fornecer uma descrição com alto nível

de aproximação, adotando-se maior descrição no detalhamento das características do escoamento.

7.1.1.1. Análise teórica: a complexidade do fluxo multifásico

Entender o fluxo das exalações é o primeiro passo que o engenheiro químico deve tomar para modelar, simular e então propor medidas de mitigação da pandemia do COVID-19. O fluxo das exalações é tido como fluxo multifásico, dotado de alta complexidade, a qual advém da existência de interfaces múltiplas, deformáveis e móveis, das descontinuidades das propriedades do fluido e de um fluxo de campo complicado perto da interface (ISHII e HIBIKI, 2011). O fluxo monofásico pode ser classificado de acordo com a estrutura de fluxo em fluxo laminar, transicional e turbulento, enquanto que o fluxo bifásico ou multifásico é classificado de acordo com a estrutura da interface em regimes de fluxo ou padrões, como escoamento separado, escoamento transicional ou misto e escoamento disperso. No entanto, em geral, o conceito de regimes de fluxo bifásico é definido com base em uma análise em escala macroscópica de volume ou comprimento que muitas vezes é comparativa à escala de comprimento do sistema (Rosa, 2012). Isso implica que o conceito de regimes de fluxo de duas fases e modelo dependente do regime requerem a introdução de uma escala de grande comprimento e limitações associadas, e portanto, podem levar a uma análise que não pode abordar mecanicamente a física e os fenômenos ocorrendo abaixo da escala de comprimento de referência.

Dessa forma, o desenvolvimento de uma compreensão ampla do fluxo multifásico encontra dificuldade no fato de que a física desse fluxo é fundamentada em várias escalas da natureza, como a escala do sistema, a escala macroscópica necessária para a suposição do contínuo, a mesoescala relacionada ao local de estruturas, e a escala microscópica relacionada a estruturas finas e moleculares de transporte. No nível da escala do sistema são importantes a observância do regime transiente e das interações entre os componentes, enquanto que no nível da escala macroscópica a importância se dá na observância na estrutura da interface e no transporte de massa, momento e energia.

No entanto, as equações de campo de fluxo multifásico que descrevem os princípios da conservação requerem relações constitutivas adicionais para a transferência

em massa (Rosa, 2012). Este engloba os efeitos de turbulência para momento e energia, bem como para trocas interfaciais para transferência de massa, momento e energia (Rosa, 2012), que são fenômenos físicos de mesoescala, que requerem esforços de pesquisa concentrados. O próximo nível da física no fluxo multifásico está relacionado aos fenômenos microscópicos locais, tais como: a nucleação ou condensação da parede; coalescência e dissolução da bolha; e arrastamento e deposição.

7.1.1.2. Modelagem a partir de análise experimental

As técnicas experimentais são indispensáveis à análise de escoamentos multifásicos, de modo que elas não necessitam de modelos, já que quem simula o fenômeno é a própria natureza. O experimentalista apenas observa, realiza as medições e quantifica a intensidade dos eventos por meio da reprodução do fenômeno multifásico em condições controladas de laboratório. A análise das medidas experimentais, juntamente com a proposição de modelos simples, permite estabelecer uma base de conhecimento relativo à natureza dos mecanismos físicos atuantes no fenômeno, à estrutura das interfaces, aos mecanismos de acoplamento, às escalas do escoamento e ao conhecimento de grandezas globais, tais como queda de pressão, velocidades médias, fração volumétrica, entre outras (ISHII e HIBIKI, 2011).

Apesar do grande alcance dos métodos experimentais, a reprodução de fenômenos em laboratório nem sempre consegue reproduzir as escalas do fenômeno real (ISHII e HIBIKI, 2011), e, nesses casos, se simulam apenas partes do fenômeno em laboratório. Como o número de variáveis existentes no fenômeno é grande, obter uma similaridade completa entre um experimento feito em laboratório e a aplicação no campo é raro, de tal forma que as informações dos testes dificilmente são transpostas diretamente para informação de projeto aplicado no campo. A abordagem realizada é o desenvolvimento de modelos, com grau de complexidade variável, que capture a física dos fenômenos em escala macroscópica observados no laboratório. Através destes modelos fenomenológicos consegue-se, com algum sucesso, transpor as informações do laboratório para as aplicações de campo (ISHII e HIBIKI, 2011).

Em relação à dinâmica de transmissão do SARS-CoV-2, algumas pesquisas recentes se dedicaram a investigar a física do transporte do vírus nas exalações de saliva, assim como a natureza aerodinâmica dele. Liu et al. (2020) investigaram experimentalmente a natureza aerodinâmica do SARS-CoV-2 medindo RNA viral em aerossóis em amostras coletadas de diferentes áreas de dois hospitais de Wuhan durante a presente pandemia, em fevereiro e março de 2020. Viram que a concentração de RNA SARS-CoV-2 detectada em aerossóis de ambientes pouco ventilados, como banheiros utilizados pelos pacientes, era maior do que nos ambientes mais ventilados, e que nas áreas públicas, os níveis de RNA SARS-CoV-2 chegaram a ser indetectáveis. Assim, os resultados indicaram que a ventilação do ambiente, associado ao fato de ser aberto, e ainda à higienização das vestimentas de proteção, o uso adequado e desinfecção dos banheiros podem limitar efetivamente a concentração do vírus em aerossóis.

Um outro estudo experimental, realizado por Anchordoqui et al (2020), desenvolveu uma modelagem física para o transporte do SARS-CoV-2 no ar baseando-se na física nuclear, em uma analogia à uma complexa nuvem de gás e sua carga útil de virions patogênicos. A nuvem foi modelada como um sopro esférico de ar quente e úmido (com filamentos muco salivares), que permanece coerente em um volume que varia de $0,00025$ a $0,0025 m^3$, propagando a dispersão das moléculas de ar.

7.1.1.3. Modelagem da nuvem de gás de expiração multifásica turbulenta

O escoamento das exalações de fluido mucosalivares é descrito pelo modelo de nuvem de exalação multifásica turbulenta, o qual permite que a transmissão de patógenos seja formulada em termos de níveis de contaminação do ar em relação à superfície, em espaço e tempo, ao avaliar o risco e a eficácia das intervenções relativos à gestão e ocupação do espaço interior. O escoamento desta nuvem gasosa de ar quente e úmido carregada de gotículas em suspensão presas dentro dela pode ser caracterizado como turbulento, já que o escoamento é caótico e desordenado, influenciado pela velocidade do ar atmosférico; multifásico, ou seja, mais de uma fase escoam simultaneamente, sendo, no caso em questão, uma fase dispersa, composta pelas gotículas e núcleo de gotículas, que escoam imersa numa fase contínua, a fase gasosa; tridimensional e transiente.

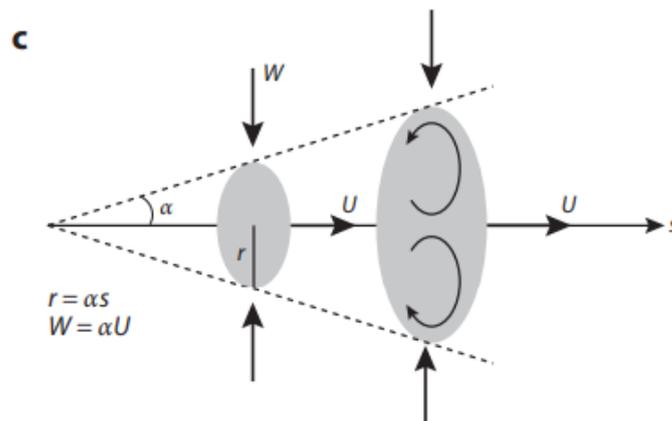
Todas as exalações (expiração, espirro, tosse, fala e canto) tem a mesma descrição física de uma emissão de fonte pontual de uma nuvem multifásica turbulenta de gás carregada com gotículas de líquido respiratório, de modo que o impulso que conduz o movimento da nuvem ocorre na fase gasosa e não na fase de gotículas de líquido. As únicas distinções entre essas várias emissões incluem o volume de ar emitido ($\sim 500\text{mL}$ para exalações regulares e $1-4\text{ L}$ para tosses e espirros), o momento conforme modulado pela duração da emissão ($\sim 2\text{ s}$ para uma respiração corrente, $\sim 200-300\text{ms}$ para uma tosse e $\sim 100-200\text{ms}$ para um espirro), a fração de volume do líquido, a distribuição e composição do tamanho das gotículas e a frequência desses eventos respiratórios (~ 12 respirações por minuto para exalações regulares e $5-30$ tosses ou espirros por hora, dependendo da sintomatologia) (Bourouiba, 2020).

Diversos são os parâmetros que influenciam a modelagem do fluxo das exalações mucosais e, conseqüentemente, a simulação dele. Assim, o desafio do engenheiro químico ao modelar o fluxo de tosse ou espirro, por exemplo, consiste em descrevê-lo por meio de equações matemáticas levando em consideração os parâmetros que podem influenciá-lo e condições iniciais apropriadas, de modo que a simulação se aproxime ao máximo de uma tosse/espirro de um humano real. Ao modelar a nuvem de gás de expiração multifásica turbulenta, o engenheiro químico deve considerar a ocorrência de diversos fenômenos, como listados a seguir:

- a) Efeito de arrastamento turbulento do fluido ambiente para o núcleo do fluxo;
- b) Termodinâmica de mudança de fase para diferentes tamanhos de gotas, como a evaporação de gotas de tamanho pequeno e a sedimentação de gotículas maiores que se instalam nas superfícies. E ainda, a evaporação e sedimentação de gotas de tamanho moderados, as quais são influenciadas pelo efeito de inércia e gravidade;
- c) Transferência de calor e massa devido a evaporação, coalescência, separação e dispersão turbulenta das gotículas, que interagem com o campo de fluxo de massa;
- d) Dinâmica de gotas de água;
- e) Condições ambientais de temperatura, umidade e vento ambiente;
- f) Variação de velocidade do fluxo;
- g) Distribuição do tamanho inicial da gota de saliva no início do evento de tosse.

Um dos principais processos que regem a propagação dos fluxos expiratórios e tornam o estudo mais próximo da realidade é o efeito de arrastamento turbulento do fluido ambiente para o núcleo do fluxo. Para entender esse efeito, tomemos a velocidade média em um determinado ponto ao longo da trajetória da nuvem, como mostrado na Figura 11. A velocidade lateral média W do fluido ambiente arrastado para a nuvem é proporcional à velocidade transversal média da nuvem, U , ao longo de sua trajetória. Da mesma forma, o raio da nuvem “ r ” aumenta linearmente com a distância “ s ” da fonte (a boca da pessoa que está tossindo/espirrando), de modo que $W(s) = \alpha U(s)$ (Morton et al. 1956), em que α é o coeficiente de arraste (constante), conforme a Figura 11. O coeficiente de arraste α é constante, embora possa mudar para cada tipo de fluxo.

Figura 11 - Conforme a nuvem se move para a frente ao longo de sua trajetória $s(t)$, e com velocidade transversal média $U(t)$, ele arrasta ar ambiente com velocidade média $W(t) = \alpha U(t)$ e raio da nuvem $r(t) = \alpha s(t)$, em que α é o coeficiente de arraste. O fluxo totalmente turbulento é semelhante ao longo de sua trajetória longe de uma fonte pontual.

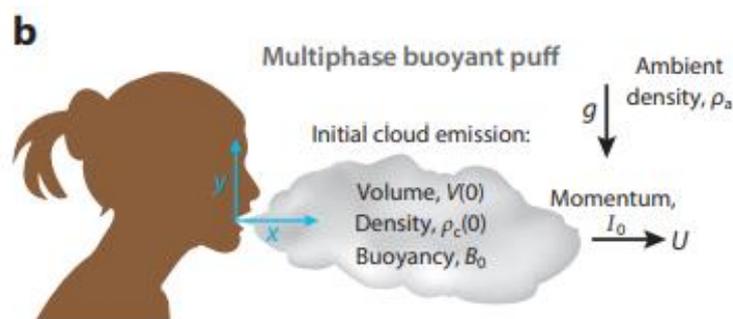


Fonte: Bourouiba, 2020.

No caso das exalações, a fonte pontual é a boca, cujo diâmetro é pequeno em comparação com a distância de evolução da nuvem, que é da ordem de metros. O número de Reynolds médio estimado é $Re \sim (10^4)$ para tosses e espirros no regime turbulento.

Existem duas fases relevantes no processo de evolução da nuvem. A primeira fase, que é a ejeção (semelhante a um jato), é caracterizada pela liberação de alto impulso da nuvem de gás exalada e sua carga mucosalivar. A segunda fase da evolução da nuvem é marcada por uma dinâmica de sopro mais duradoura, caracterizada pelo crescimento autossimilar da nuvem de sopro. Embora as nuvens de expiração sejam inicialmente impulsionadas pelo momento, elas podem ter vários graus de flutuabilidade inicial, pois geralmente são mais quentes e úmidas que o ar ambiente. Em ambientes internos essa flutuabilidade é conservada e, apesar de inicialmente parecer insignificante, tal flutuação pode, em última análise, influenciar a trajetória da nuvem, uma vez que a velocidade de avanço diminui suficientemente (Bourouiba et al. 2014). Portanto, em primeira ordem, o engenheiro químico pode modelar a nuvem como uma nuvem turbulenta multifásica com impulso inicial I_0 e flutuabilidade inicial B_0 , que depende da composição da mistura e das condições ambientais, como mostra a Figura 12. Pode-se escolher resolver também a fase inicial de jato curto, que dura na ordem de 100 ms, dependendo do tipo de emissão e questão de interesse: expiração de muito curto alcance em uma máscara da ordem de 30 cm ou a contaminação de uma sala na ordem de metros.

Figura 12 - A emissão inicial de nuvem é descrita por um volume $V(0)$, densidade $\rho_c(0)$, flutuabilidade inicial B_0 , e momento I_0 .



Fonte: Bourouiba, 2020.

Bourouiba et al. (2014) modelaram a nuvem multifásica cuja densidade inicial é dada por:

$$\rho_c(0) = \sum_{n=1}^N (\rho_p - \rho_f) \varphi_n(0) + \rho_f$$

onde ρ_p é a densidade das gotas e ρ_f é a densidade da fase gasosa. Já o termo $\varphi_n(0)$ é a fração de volume inicial das gotículas suspensas de diâmetro d_n , isto é, $\varphi_n = \frac{N_n v_n}{V(t)}$, onde $v_n = \frac{\pi d_n^3}{6}$ é o volume de queda, $V(t)$ é o volume da nuvem e N_n é o número de gotas de diâmetro d_n suspensas na nuvem. À medida que a nuvem avança ela arrasta consigo o ar ambiente, de densidade ρ_a , e assume um volume $V(t) = V(0) + V_a(t)$, desde que as gotas permaneçam suspensas na nuvem. A fração de volume da fase líquida em tosses e espirros reais é da ordem de 10^{-6} a 10^{-5} (Duguid, 1946), pequena o suficiente para negligenciar modificações na velocidade da gota por meio de efeitos coletivos ou de coalescência.

A densidade da nuvem evolui de acordo com a equação:

$$\rho_c(t) = \frac{V(0)}{V(t)} (\rho_f - \rho_a) + \rho_a + \sum_{n=1}^N \varphi_n(t) (\rho_p - \rho_f)$$

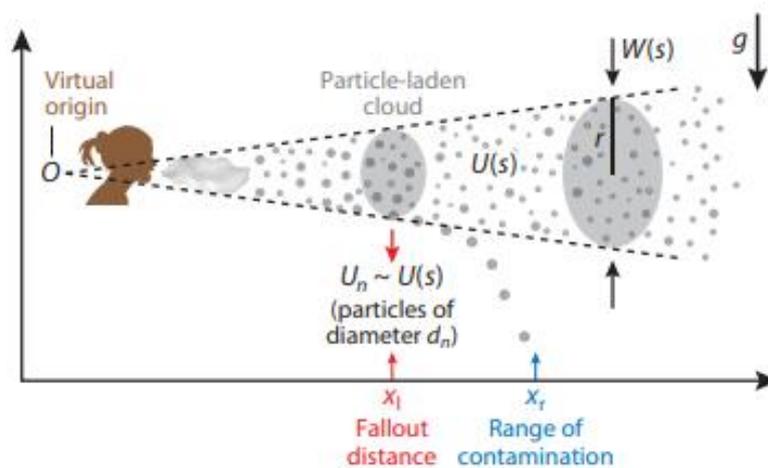
em que a fração de volume de gotas suspensas de diâmetro d_n no tempo t é $\varphi_n(t) = \frac{N_n v_n}{V(t)}$, e todas as gotas suspensas têm a mesma densidade, ρ_p (Bourouiba et al. 2014).

As gotículas permanecem suspensas dentro da nuvem até sua velocidade de sedimentação U_n (obtido a partir do equilíbrio de arrasto e peso para gotas de diâmetro d_n) tornar-se comparável e exceder a velocidade média de circulação dentro da nuvem. Como a velocidade do sopro necessariamente diminui com a distância da fonte devido à conservação do momento, o mesmo acontece com o tamanho das gotas suspensas: gotas e núcleos de gotículas com velocidade de sedimentação muito menor do que a velocidade média de tombamento da nuvem em toda a sua trajetória permanecem suspensas dentro da nuvem a uma distância significativa de 10 m. Uma vez que a velocidade da nuvem é quase nula, essas gotas e núcleos podem então ser advectados por fluxos de ventilação da ordem de centímetros por segundo, possivelmente por horas a dias até que eles passam a aderir em superfícies ou sejam extraídos por ciclos de mudança de ar de ventilação.

De acordo com o modelo desenvolvido por Bourouiba et al. (2014), que pode ser utilizado para fornecer a evolução espaço-temporal da nuvem gasosa em condições

normais, além do número e do volume das gotas que caem da nuvem em função do tempo e da distância da fonte, as partículas da nuvem de exalação se acomodam continuamente na borda da nuvem antes da precipitação final ($U_n \sim U(s)$), como mostra a Figura 13.

Figura 13 – Trajetória das gotículas suspensas na nuvem que circulam dentro dela até que se acomodem a uma distância horizontal x_l e chegam a uma posição final x_r , o que define a faixa de contaminação de gotas de um determinado tamanho (Bourouiba et al. 2014).



Fonte: Bourouiba, 2020.

Nesse contexto, além do arrastamento turbulento, um outro processo importante que rege a propagação dos fluxos expiratórios e tornam o estudo mais próximo da realidade é a termodinâmica de mudança de fase para diferentes tamanhos de gotas e a transferência de calor e massa devido a evaporação, coalescência, separação e dispersão turbulenta das gotículas, que interagem com o campo de fluxo de massa. Ao longo da trajetória dessa nuvem há uma variedade de tamanhos de aerossóis, que por sua vez, são influenciados pelos fenômenos físicos que ocorrem à medida que a nuvem se move. Um deles é a evaporação de gotículas à medida que se deslocam da fonte, a qual é influenciada pela umidade e temperatura ambiente (Cummins et al, 2020; Feng et al, 2020; Vuorinen et al, 2020). Além da turbulência, que também influencia as trajetórias das gotículas respiratórias e sua ampla dispersão, Liu et al. descobriram que a umidade influencia mais gotículas de tamanho médio ($60 \mu\text{m}$) do que menores e gotas maiores. Gotículas maiores

e mais pesadas ($> 100 \mu\text{m}$) deixarão o jato respiratório mais rápido. O tamanho das gotas também varia durante a evaporação e processos de dispersão.

Uma pesquisa publicada na revista *Safety Science*, dos autores Vuorinen et al. (2020), realizou a distribuição do tamanho das gotas durante o fluxo da tosse. Vários fatores e mecanismos físicos, incluindo o local de origem e a reabertura de pequenas vias aéreas no sistema respiratório afetarão as propriedades das partículas no ar exalado (Bake et al., 2019). O tamanho dessas partículas pode variar de 10 nm a 100 μm e acima disso, as quais, ao serem exaladas, secam misturando-se com o ar ambiente. A taxa de secagem depende da umidade relativa do ambiente, bem como do diâmetro das partículas, surfactantes e propriedades das partículas (por exemplo, proteínas no muco).

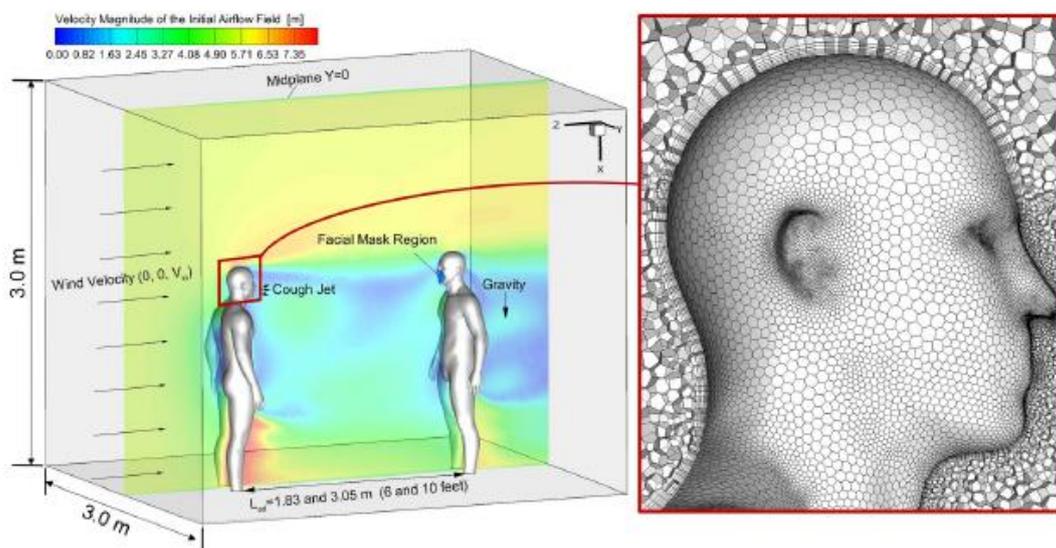
Alguns pesquisadores modelaram o escoamento dessas exalações, como por exemplo Feng et al, na Universidade Estadual de Oklahoma, se basearam no modelo de fluxo multifásico Lagrangeano-Euleriano, desenvolvendo equações para a fase contínua e para a fase dispersa, a fim de preverem o transporte, a mudança de tamanho e a deposição das gotículas carregadas de vírus emitidas, além de investigarem a influência do vento e da umidade relativa do ar na eficácia do distanciamento social como medida de prevenção da transmissão aérea do COVID-19. Pendar e Páscoa (2020) também modelaram numericamente a distribuição das gotas de saliva carregadas de vírus durante a tosse e espirro, encontrando equações que descrevem a fase contínua e a fase dispersa do fluxo multifásico da nuvem gerada pela tosse. Utilizaram o pacote OpenFOAM para modelar o tamanho, a velocidade e a distribuição espacial da microgotícula expelida por meio de espirros e tosse. Essas descobertas são úteis para a prevenção eficaz de doenças infecciosas transmitidas por gotículas no ar e, em particular, o novo coronavírus (COVID-19), identificando o processos de transmissão em diferentes locais, como hospitais. Tanto Pendar e Páscoa (2020) quanto Feng et al. desenvolveram equações de Navier-Stokes de conservação, como as equações da continuidade e do momento, para a fase contínua (fluxo de ar ambiente), levando em consideração o modelo de turbulência LES. Para a fase discreta, que representa a dispersão das gotículas, resolveram uma série de equações diferenciais com abordagem lagrangeana para calcular a velocidade, massa e posição de cada gota em cada intervalo de tempo. Diwan et al., 2020, desenvolveram equações para a dinâmica de gotículas em fluxo turbulento, levando em conta a termodinâmica da mudança de fase das gotas, a qual é influenciada pela inércia e gravidade.

Um outro aspecto importante que o engenheiro químico pode contribuir é com relação às rotas de transmissão do vírus SARS-CoV-2, qual é a predominante e em qual há maior probabilidade de transmissão. Os autores Chaudhuri et al. (2020), realizaram uma pesquisa com o objetivo de identificar a importância relativa das diferentes rotas de transmissão do vírus SARS-CoV-2, para assim determinar a evolução da pandemia COVID-19. Chegaram à conclusão de que as gotas de diâmetro inicial entre 10 μ m e 50 μ m são as mais letais em termos de probabilidade de infecção, sendo que dentro de 1s de sua ejeção as gotas reduzem a um tamanho 5 a 6 vezes menor, devido à evaporação, que é o momento em que as gotas estão infectando a pessoa. Assim, na maior parte do tempo, a infecção é transmitida por inalação de pequenas gotículas suspensas no ar ou seus núcleos desidratados.

7.1.2. SIMULAÇÃO DA NUVEM DE GÁS DE EXPIRAÇÃO MULTIFÁSICA TURBULENTA

Quanto à simulação do fluxo de tosse/espirro, ou seja, da nuvem de gás de expiração multifásica turbulenta, o desafio do engenheiro químico consiste em aplicar os métodos numéricos, como CFD (fluidodinâmica computacional) ou código DNS (simulação numérica direta), por exemplo, que é utilizado para resolver as Equações de Navier Stokes considerando os efeitos da turbulência, levando em consideração uma modelagem bem desenvolvida e parâmetros e condições de contorno apropriadas e que se aproximam ao máximo da realidade. A simulação é feita para reproduzir um ambiente onde uma pessoa infectada está presente, por exemplo em uma sala ou outro ambiente fechado ou ainda um ambiente aberto, a fim de analisar a duração do fluxo de tosse/espirro, o alcance dele e suas características. A reprodução do humano infectado inserido num ambiente é realizada a partir de um domínio computacional, capaz imitar um convívio social mais próximo do real. Feng et al., 2020, por exemplo, se propuseram a criar uma malha computacional para simular dois humanos virtuais separados por distâncias diferentes, de 1,83 m e 3,05 m, num ambiente confinado de geometria cubóide, cuja representação está presente na Figura 14.

Figura 14 – Esquema do domínio computacional com dois humanos virtuais separados por distâncias diferentes e detalhes da malha.



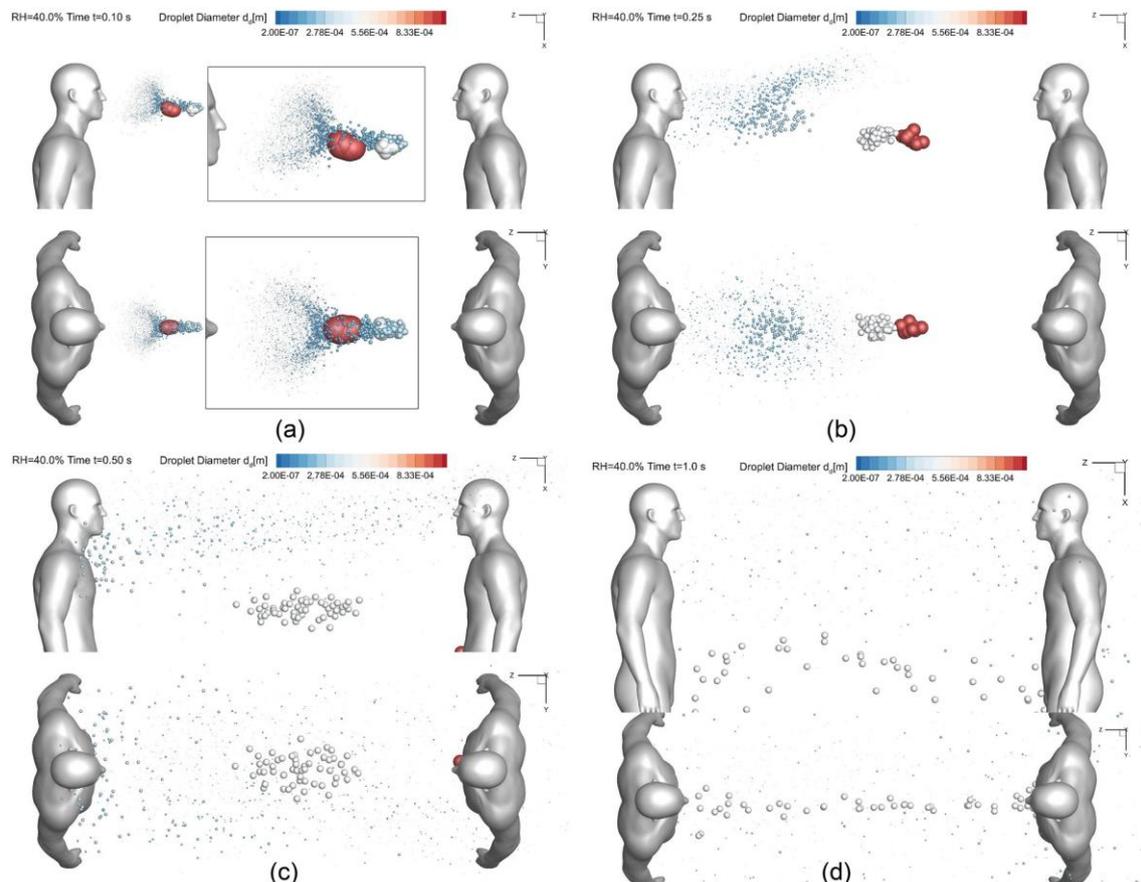
Fonte: Feng et al., 2020.

Os autores levaram em consideração o formato da boca do humano virtual para imitar a ejeção da gota durante uma tosse humana real. Durante a tosse humana a impressão da boca pode atribuir diferentes formas e tamanhos dependendo da morfologia de cada indivíduo, e alguns estudos na literatura simplificaram a forma da boca atribuindo um diâmetro hidráulico geral (Dbouk e Drikakis, 2020). No entanto, a quantificação precisa da impressão bucal é um fator crítico para capturar com precisão o transporte das gotículas contaminadas com o vírus transportadas pelo ar. Dbouk e Drikakis (2020), para fazer a modelagem e simulação do fluxo de tosse/espirro, consideraram a forma da curvatura da boca durante a tosse através de uma medição experimental da tosse humana, registrada por uma câmera de alta velocidade ao longo de 0,12 s. A abertura da boca considerada foi de 4 cm.

Além desses fatores, o tamanho e as propriedades da gota influenciarão a simulação, assim como a interação das gotículas de saliva exaladas com o fluxo da nuvem turbulenta e o fluxo de ar ambiente. As gotículas se tornarão núcleos de gotículas durante sua dispersão e a evaporação e turbulência afetam a distância delas na dispersão. Estudos anteriores também sugeriram que a distribuição de tamanho e as distâncias de viagem de núcleos de gotículas podem influenciar significativamente o risco de infecção em ambientes fechados (Xie et al., 2007).

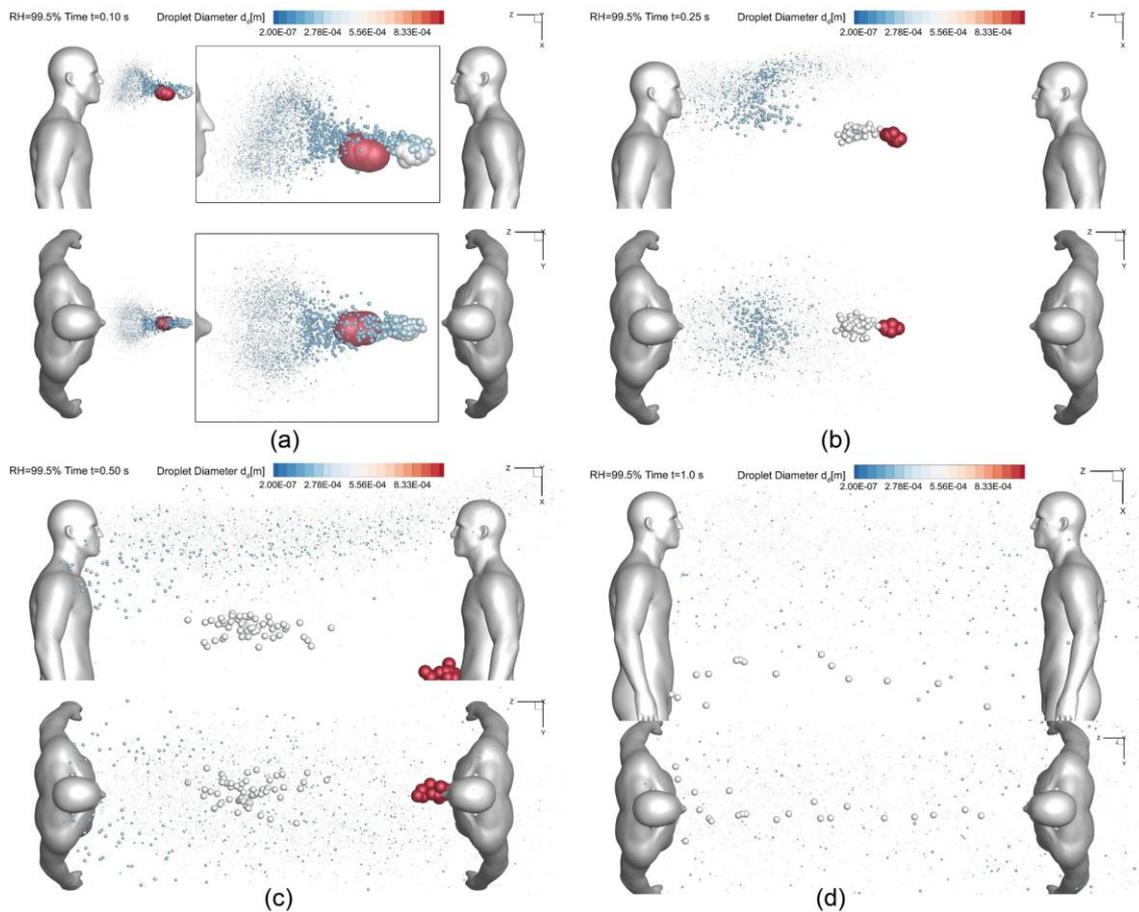
As condições ambientais de temperatura, umidade e vento ambiente também influenciam na transmissão de gotículas no ar. Feng et al. realizaram simulações em CFD, utilizando o ANSYS Fluent 2019 R1 (ANSYS Inc., Canonsburg, PA) para simular a transmissão aérea das gotículas transportadas pelos fluxos de ar ambiente, com condensação e/ou evaporação, para mostrar a influência da velocidade do vento ambiente e da umidade relativa do ar nos padrões de transmissão de gotículas. Uma das simulações feitas foi a do fluxo de tosse entre dois humanos virtuais separados por 1,83 m, num ambiente com umidade relativa (UR) de 40% (Figura 15) e de 99,5% (Figura), considerando ainda a velocidade do vento ambiente de 5,5 m/s, em diferentes intervalos de tempo desde o início da tosse. Assim como Feng et al, os autores Dbouk & Drikakis empregaram um modelo tridimensional avançado para dinâmica de fluido multifásico computacional baseado em técnicas Eulerianas-Lagrangeanas, e ainda transferência de calor para investigar o transporte, dispersão e evaporação de partículas de saliva provenientes de uma tosse humana.

Figura 15 - Tamanhos e posições de gotículas para uma umidade relativa de 40% e velocidade do vento de 5,5 m/s, em diferentes espaços de tempo após o início da tosse: (a) $t = 0,10$ s, (b) $t = 0,25$ s, (c) $t = 0,5$ s, e (d) $t = 1,0$ s.



Fonte: Feng et al., 2020.

Figura 16 - Tamanhos e posições de gotículas para uma umidade relativa de 99,5% e velocidade do vento de 5,5 m/s, em diferentes espaços de tempo após o início da tosse: (a) $t = 0,10$ s, (b) $t = 0,25$ s, (c) $t = 0,5$ s, e (d) $t = 1,0$ s.



Fonte: Feng et al., 2020.

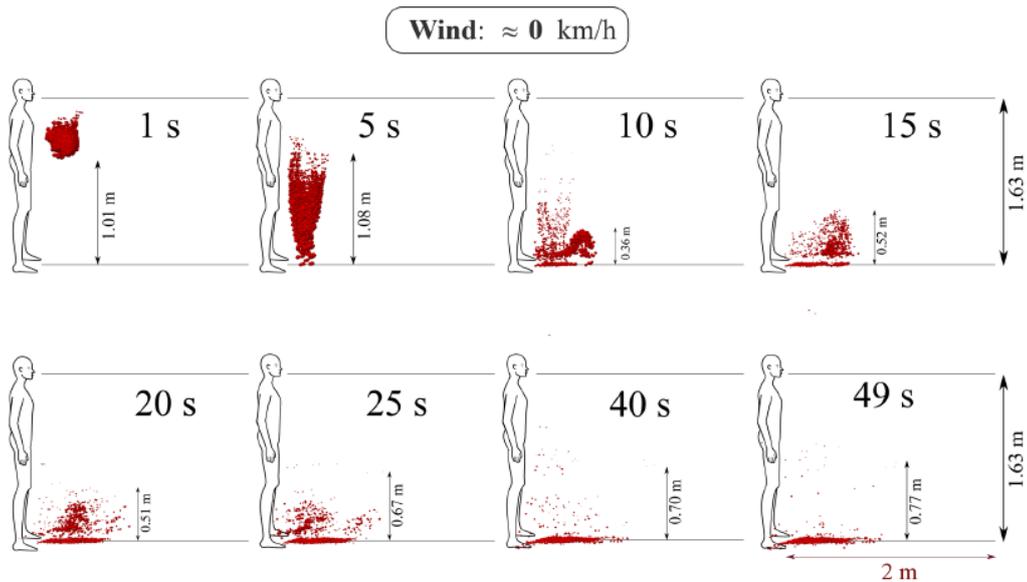
A partir do estudo realizado, Feng et al. viram que um portador de COVID-19 ao tossir, pode produzir gotículas carregadas de vírus em tamanhos de micron, as quais permanecem suspensas no ar expondo as pessoas saudáveis que estão próximas (cerca de 1,83 m) e também as que estão distantes (3,05 m) da fonte em um ambiente de ar estático. Com relação ao efeito da velocidade do vento no transporte e deposição de gotículas, Feng et al. viram que ele é complexo e altamente dependente dos padrões de fluxo entre os dois humanos virtuais, bem como da estabilidade do vento. Segundo eles, é certo que a atual política social de distanciamento de aproximadamente 2 m não é suficiente para

proteger as pessoas da exposição ao SARS-CoV-2 gerada pela tosse com o vento ambiente, já que ao visualizar as trajetórias e destinos das gotículas carregadas com SARS-CoV-2 em várias condições ambientais usando o método CFPD, com modelagem dos efeitos de condensação/evaporação entre o vapor de água ambiente e as gotas, constatou-se que a política de distanciamento social não é suficiente para que se evite o contágio do SARS-CoV-2 devido à complexidade das condições ambientais do vento. Isso porque a distância social segura é altamente dependente de diferentes fatores, já que a nuvem de gotículas de espirro pode abranger uma área de aproximadamente até 8 m (Bourouiba, 2020), o que faz com que seja altamente recomendável o uso de máscaras e outras coberturas faciais ao expor-se em público por reduzirem significativamente a suspensão de pequenas gotículas no ar.

Assim como Feng et al. (2020), Das et al. (2020) e outros autores concordam que 2 m de distanciamento social, recomendação de vários governos, não são suficientes para proteger as pessoas da transmissão do vírus a partir da tosse, levando em consideração que a velocidade do vento ambiente é diferente de 0 km/h. Pode-se citar autores como Dbouk e Drikakis (2020), da Universidade de Nicósia, capital do Chipre, que recomendam um distanciamento social de 6 m, Pendar e Páscoa (2020), os quais recomendam 4 m.

O estudo realizado por Dbouk e Drikakis (2020), mostra que 2 m é um valor aproximado para uma distância segura no caso em que não há vento, ou seja, em que a velocidade do vento é aproximadamente igual a 0 km/h, a uma temperatura ambiente de 20°C, umidade relativa de 50%, e temperatura da superfície do solo de 15°C (Figura 17). A temperatura da superfície do solo de 15°C é de alguma forma arbitrária, já que no inverno e primavera a temperatura da superfície do solo é mais baixa do que a temperatura do ar e o oposto ocorre nas estações de verão e outono, sendo necessária uma investigação mais aprofundada para quantificar os efeitos da temperatura da superfície do solo, bem como a umidade relativa e a temperatura do ar ambiente.

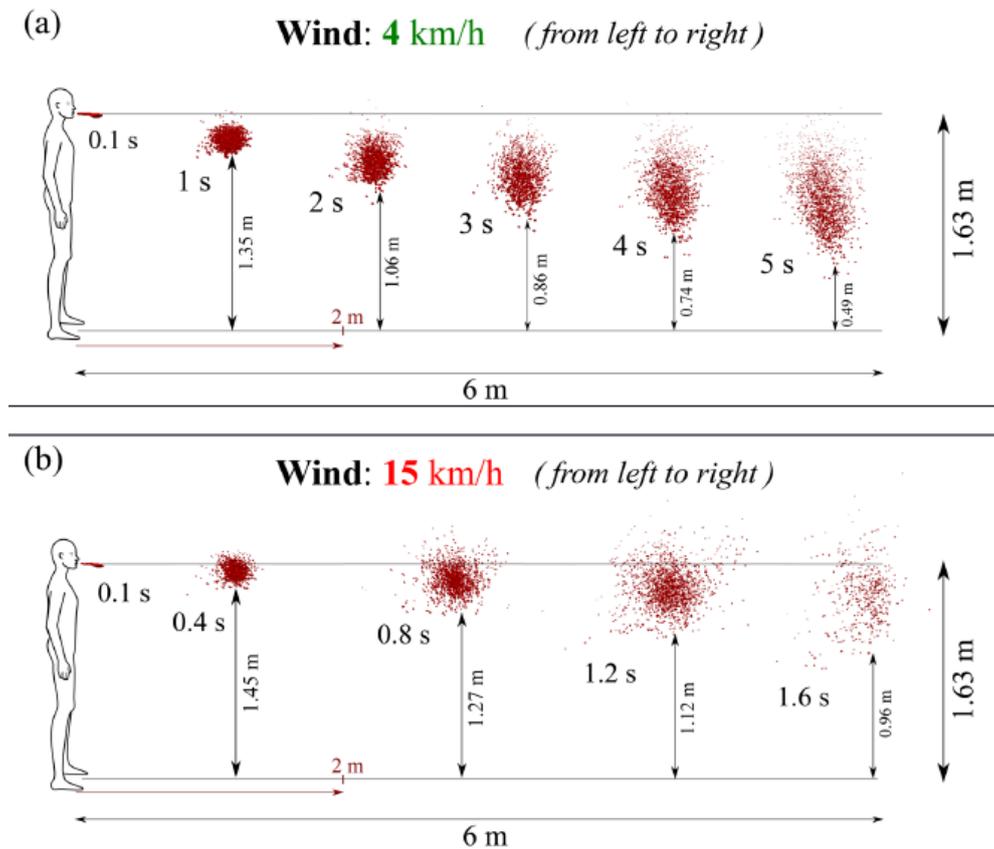
Figura 17 – Fluxo de gotas de saliva portadoras de vírus a partir de uma tosse humana, a uma velocidade ambiente de aproximadamente zero.



Fonte: Dbouk e Drikakis (2020)

O estudo mostra que, quando uma pessoa tosse, a velocidade do vento em um ambiente de espaço aberto influencia significativamente a distância que as gotículas transportadoras de doenças transportadas pelo ar viajam. A Figura 17 mostra a evolução das gotículas de saliva humana, levando em consideração a dispersão, evaporação, quebra e sedimentação das gotas num ambiente em que a velocidade ambiente é de aproximadamente zero. Nessas condições, as gotas cairão no solo a uma curta distância da pessoa que exala ou tosse, a qual não excede 1 m em 0,49 s. Um pequeno número de partículas pode viajar um pouco mais longe por mais tempo, mas ainda assim, sua trajetória além de 1 m já será a uma altura significativamente abaixo de meio metro, caindo em direção ao solo. Assim, essas gotículas podem não constituir um risco em relação ao contato facial de adultos a esta distância. Já a Figura 18 mostra o efeito da velocidade do vento ambiente (4 km/h e 15 km/h) na evolução da nuvem de gotículas de saliva humana e no transporte sob dispersão e evaporação.

Figura 18 - Fluxo de gotas de saliva portadoras de vírus a partir de uma tosse humana, a uma velocidade ambiente de 4 km/h (a) e 15 km/h (b). O ambiente está em temperatura ambiente de 20°C, pressão de 1 atm, e umidade relativa de 50%, com a temperatura do solo de 15°C.



Fonte: Dbouk e Drikakis (2020)

A uma velocidade do vento soprando da esquerda para a direita na direção da tosse humana, as gotas do líquido da saliva podem viajar até 6 m de distância da boca em um período de 5 s para uma velocidade de 4 km/h, e menos de 2 s para uma velocidade de 15 km/h com uma taxa de dispersão acelerada (Figura 18). À medida que a nuvem de gotas se move ocorre uma deformação dela sob as forças de dispersão turbulentas provocadas pelo vento ambiente. Além disso, há uma diminuição na concentração e no tamanho das gotas de líquido na direção do vento, fazendo com que a nuvem perca massa até desaparecer completamente, sendo que isso ocorre de forma mais lenta a uma velocidade do vento mais baixa, o que pode prolongar a exposição de um ser humano às gotículas contaminadas aumentando potencialmente o risco da transmissão do vírus.

Das et al. (2020) também buscaram compreender quantitativamente a propagação de gotículas contendo vírus, visto que é de uma importância significativa. Investigaram a evolução das gotículas no espaço e no tempo sob várias condições externas de temperatura, umidade e fluxo de vento utilizando as leis da mecânica estatística e dos fluidos, resolvendo a equação de Langevin, um modelo matemático utilizado para descrever o movimento de uma variável aleatória em diversos fenômenos físicos,

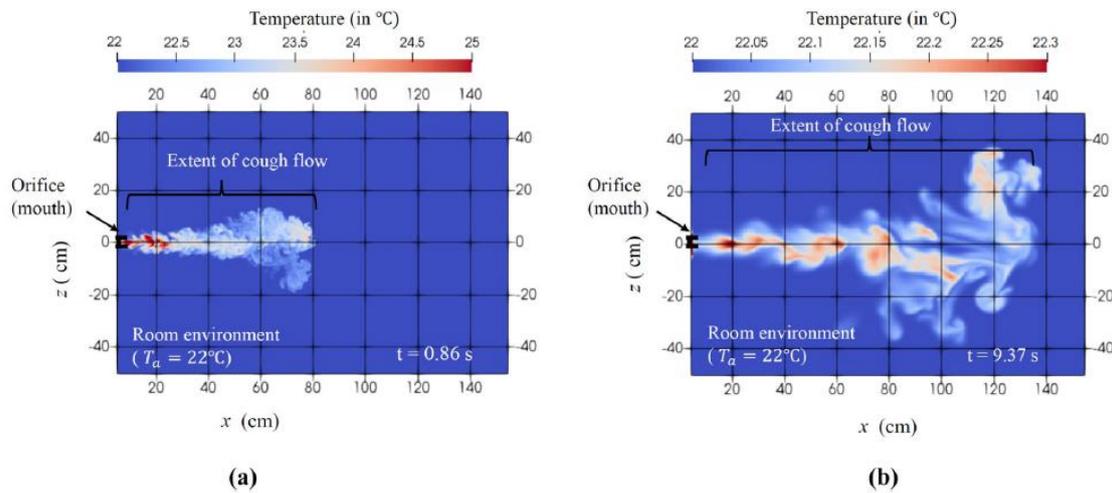
químicos, biológicos e econômicos. Os efeitos de arrasto, difusão e gravidade em gotículas de diferentes tamanhos e velocidades de ejeção foram considerados durante seu movimento no ar. Descobriram que, no ar parado, gotas maiores percorrem uma distância maior, enquanto que gotas menores permanecem suspensas no ar por mais tempo, e por isso, no ar parado, a distância horizontal que um indivíduo saudável deve manter de um infectado é baseado nas gotas maiores, mas o intervalo de tempo a ser mantido é baseado nas gotas menores (Das et al., 2020). Já em lugares com fluxo de vento, as gotas mais leves viajam uma distância maior e permanecem suspensas no ar por mais tempo, e por isso, tanto o tempo quanto a distância geométrica que um indivíduo saudável deve manter de um infectado é baseado nas gotículas menores sob o fluxo de ar, o que torna obrigatório o uso de máscara para prevenir o vírus (Das et al., 2020). Assim, de acordo com a pesquisa, manter apenas uma separação estacionária entre uma pessoa saudável e outra infectada não é o bastante, e seus resultados serão úteis para traçar estratégias visando a prevenção da disseminação de gotículas contendo microrganismos.

A nuvem de gotículas de saliva pode apresentar diferentes cinemáticas, tal como alongamento, flutuação e rotação, as quais são muito complexas e possuem várias forças dirigentes, como a taxa de cisalhamento do vento, aceleração gravitacional, dispersão turbulenta, forças de interação manifestadas pela separação ou coalescência e forças de estresse manifestadas pela mudança de fase de uma gota ou evaporação Dbouk e Drikakis (2020).

Já com relação à influência da umidade relativa do ar ambiente, Feng et al. chegaram à conclusão de que alta umidade relativa ($UR = 99,5\%$) leva a maiores frações de deposição em corpos humanos e no solo, o que não está necessariamente relacionado a riscos de exposição mais elevados. A umidade alta pode aumentar o efeito de condensação, sendo que o tamanho das gotas da tosse continua crescendo durante seu transporte no ar até que a pressão parcial na superfície da gota seja igual à pressão de saturação do vapor d'água. No entanto, a umidade relativa do ar ambiente $UR = 40\%$ desencadeia a evaporação da água nas gotículas da tosse, levando à redução do tamanho delas, o que pode levar a um maior tempo suspensas no ar. Outros autores, como Liu et al., mostraram que o tamanho dos núcleos das gotículas, numa umidade relativa de 90% (a 25°C), pode ser 30% maior do que a mesma gota em uma umidade relativa de menos de $67,3\%$ (25°C).

Uma série de autores se dedicaram a realizar a simulação do fluxo de tosse e espirro, além da modelagem, o que enriquece ainda mais o entendimento da dinâmica de transmissão do patógeno SARS-CoV-2 a partir das exalações de fluido mucosalivares entre humanos. Uma pesquisa publicada em 2020, pela Indian National Academy of Engineering, por Diwan et al., se propôs a desenvolver um código DNS (simulação numérica direta) a fim de obter uma compreensão básica da propagação e da trajetória dos fluxos de tosse, assim como as distâncias de queda das gotículas. Este método permite a visualização de estruturas turbulentas presentes em escoamentos, resolve integralmente as equações de Navier-Stokes e calcula tanto as maiores quanto as menores escalas de turbulência. Levou-se em consideração a termodinâmica de mudança de fase (para diferentes tamanhos de gotas) e o efeito de arrastamento turbulento do fluido ambiente para o núcleo do fluxo, que são os principais processos que regem a propagação dos fluxos expiratórios e tornam o estudo mais próximo da realidade. Assim, o efeito da mudança de fase foi abordado para três classes de gotículas: as muito pequenas ($d < 10\mu\text{m}$), que seguem as linhas de fluxo do fluido e evaporam; as de tamanho moderado ($10\mu\text{m} < d < 100\mu\text{m}$), as quais são influenciadas pela inércia, se sedimentam devido à gravidade e também evaporam; e as gotas maiores ($d > 100\mu\text{m}$), aquelas que se instalam nas superfícies sob a gravidade e para as quais os efeitos da termodinâmica podem ser ignorados. Levou-se em consideração a diferença da temperatura de entrada e temperatura ambiente e a umidade ambiente como parâmetros. Como ponto inicial, realizou-se um estudo para a “tosse seca”, sendo que esses resultados preliminares sobre a distribuição de temperatura em uma “tosse seca” (ou seja, sem inclusão de gotículas de líquido) foram relatados neste artigo dos autores para ilustrar a grande extensão espacial e o tempo de duração durante o qual o fluxo da tosse pode persistir após ela parar. Simulações deste tipo podem ajudar a conceber diretrizes mais precisas para o distanciamento social entre um grupo de pessoas, para projetar máscaras melhores e assim, minimizar a propagação de doenças respiratórias do tipo COVID-19. Em particular, o uso do código DNS integrado (envolvendo dinâmica de gotas de água) ajuda a estudar, em detalhes suficientes, a taxa de entrada de ar ambiente no fluxo da tosse, seu efeito sobre a flutuabilidade de fluxo (incluindo resfriamento evaporativo), a trajetória resultante de fluxo e as distâncias de queda de gotículas. DNS tem o potencial de fornecer estimativas muito mais precisas dessas quantidades do que obtidas a partir das simulações CFD (fluidodinâmica computacional) baseadas em modelos de fluxo/gotículas (Diwan et al., 2020).

Figura 19 - Distribuição de temperatura em um fluxo simulado de “tosse seca” em dois instantes de tempo desde o início das simulações. A duração total da tosse é 0,53 s.



Fonte: Diwan et al., 2020.

A Figura 19 acima mostra a distribuição de temperatura de um fluxo de “tosse seca” em dois instantes, em $t = 0,86s$ e em $t = 9,37s$. Os gráficos mostram uma queda rápida na temperatura do fluido da tosse e um considerável espalhamento lateral do fluxo, ambos causados pelo arrastamento turbulento do fluido ambiente para o centro do fluxo. Além disso, o fluxo da tosse persiste por muito mais tempo em relação à duração da tosse em si, como visto na Figura 19 (b), o que pode ser uma entrada útil para estudos epidemiológicos (Diwan et al., 2020). O fluxo simulado mostrado na Figura 19 corresponde a uma tosse relativamente “leve” (Gupta et al. 2009) e, portanto, a disseminação desse fluxo é também relativamente pequeno (de aproximadamente 1,4 m). Apesar de o estudo ainda estar em andamento no momento e os autores ainda estarem realizando uma análise mais detalhada deste fluxo, este é um exemplo que ilustra o tipo de resultados que se pode esperar das simulações de fluxo de tosse.

7.1.3. TRABALHOS FUTUROS

Apesar de existirem pesquisas na temática da dinâmica de transmissão do COVID-19 conforme mostrado, várias áreas precisam de mais investigação, como recomendam Dbouk e Drikakis (2020) e Feng et al. (2020). Assim, ainda há muito espaço

para que o engenheiro químico possa explorar a fim de contribuir ainda mais para o entendimento completo da dinâmica de transmissão do COVID-19. Dbouk e Drikakis (2020) sugeriram analisar o fluxo da nuvem de gotículas oriundas da tosse em ambientes internos, entender a evaporação de gotículas mais profundamente para as diversas condições ambientais já que elas variam de região para região, realizar pesquisas adicionais para determinar o tamanho da gota na origem, afinal de contas a evaporação dela depende do tempo que leva para viajar da boca à uma determinada posição. Dentre outras sugestões estão a investigação da tosse violenta de pacientes com doenças respiratórias, a qual irá afetar a geração de gotículas e secreções de fluidos nas superfícies das vias aéreas e aumentar a frequência de tosse.

Mais pesquisas também são necessárias para avaliar a probabilidade de transmissão viral versus gota. Este estudo mostra que a concentração de gotículas pode ser significativa até considerável distância da origem da tosse. As questões decorrentes do passado e da recente pandemia requerem uma abordagem holística para elucidar as questões científicas em aberto e enfrentar os desafios práticos. Tal abordagem requer uma interação mais próxima entre biomedicina, engenharia da física dos fluido e ciências sociais (Dbouk e Drikakis, 2020).

Para Feng et al., vários trabalhos futuros podem ser executados diante das limitações de sua pesquisa. Tais trabalhos futuros podem realizar análises paramétricas extensas para buscar outros fatores vitais que podem influenciar a transmissão aérea das gotículas carregadas de SARSCoV-2, como por exemplo, a distribuição de tamanho de gotículas geradas por diferentes atividades de emissão (por exemplo, espirro (Hassani & Khorramymehr, 2019), respiração vigorosa e fala alta (Asadi et al., 2019)), a altura humana e formas de onda de jato emitidas, a variabilidade do ângulo na propagação do jato (Gupta, Lin, & Chen, 2009), e também a variabilidade da abertura da boca durante a emissão e temperatura ambiente. Outros assuntos também podem ser tratados em trabalhos futuros, como a integração do sistema respiratório humano com a superfície do corpo humano virtual para simular o transporte resultante e a deposição de gotículas carregadas do vírus transmissor do COVID-19 nas vias aéreas e as respostas do sistema imunológico estimuladas usando modelos multiescala estabelecidos (Haghnegahdar et al., 2019; Kuga et al., 2020; Zhao et al., 2019); a simulação de uma malha capaz de modelar os campos de fluxo de ar provocados pela turbulência causada pelo movimento da caminhada humana (Edge, Paterson, & Settles, 2005; Settles, 2006); a modelagem da

atomização e coagulação que ocorre com as gotículas no volume líquido usando o modelo multifásico de Volume de Fluido (VOF) e o modelo numérico Modelo de Fase Discreta (DPM), o qual é capaz de resolver as interações do tipo partícula-fluido, isto é, acoplamento em duas vias a partir de uma descrição lagrangeana que calcula a trajetória da fase dispersa que negligencia as colisões entre partículas (Balasubramanian, Kumar, Nakod, Schütze, & Rajan, 2020; Xiao, Liu, & Liu, 2019).

8. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O engenheiro químico, por ser um profissional bem qualificado e com um vasto conhecimento dos inúmeros fenômenos físicos que ocorrem à sua volta, pode contribuir significativamente para o entendimento da dinâmica de transmissão da doença do novo Coronavírus, que tomou proporções mundiais recentemente, assim como de outras doenças transmitidas por exalação de fluidos mucosais. Na verdade, o engenheiro químico é um dos profissionais mais adequados e eficazes nessa luta, por ser um profissional completo e multidisciplinar. Como visto no desenvolvimento do trabalho, ele pode contribuir significativamente com a análise teórica de como ocorre a dinâmica de transmissão do vírus SARS-CoV-2 em conjunto com os profissionais da área biologia, a modelagem do fenômeno através de modelos de equações matemáticas condizentes, e a simulação fluxo e da influência de fenômenos de turbulência, umidade do ar, velocidade do vento, temperatura e outros fatores sobre o fluxo das exalações. Tudo isso mostra que de fato entender, modelar e simular o fluxo das exalações de fluidos mucosais são cruciais para o estabelecimento de medidas a serem tomadas pelos governos e instituições a fim de mitigar a pandemia do COVID-19, e ainda, outras possíveis doenças que possuem dinâmicas de transmissão semelhantes.

No entanto, apesar de muitas pesquisas já terem sido feitas em relação ao estudo da dinâmica de transmissão do COVID-19, existe ainda uma necessidade de simular o fenômeno o mais próximo da realidade, levando em conta inúmeros parâmetros que retratam as diversas possibilidades de ocorrência da transmissão da doença. Assim, o engenheiro químico ainda pode contribuir com estudos futuros, por exemplo, simulando humanos virtuais em movimento ao invés de apenas estáticos, modelando a distribuição do tamanho das gotículas ao longo da nuvem e não só a distribuição do tamanho inicial

ao serem emitidas pela abertura da boca, considerando o efeito de outros fatores críticos na transmissão aérea das gotículas carregadas com SARS-CoV-2, estudando e modelando a inalação, transporte e deposição resultantes de gotículas carregadas com SARS-CoV-2 e as respostas do sistema imunológico desencadeadas.

Dessa forma, por essa necessidade e limitações dos estudos atuais, o engenheiro químico pode dedicar-se em trabalhos futuros com o objetivo de melhorar a compreensão fundamental da transmissão aérea do SARS-CoV-2 para melhores preparações contra o período pós-pandêmico com alta possibilidade de ressurgimento (Kissler et al., 2020).

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANCHORDOQUI, L.; DENT, J. B.; WEILER, T. J. A Physics Modeling Study of SARS-CoV-2 Transport in Air. *SciMedJ* 2, pp. 83-91, 2020. ÇENGEL, Y. A.; CIMBALA, J. M. *Mecânica dos Fluidos: Fundamentos e Aplicações*. Porto Alegre: AMGH, 2012.

BARBOSA, M. V. ANÁLISE PARAMÉTRICA DE ESCOAMENTO PARTICULADO APLICADO AO PREENCHIMENTO DE FRATURAS. Disponível em: <https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/1266/1/CT_PPGEM_M_Barbosa%2C%20Marcos%20Vinicius_2015.pdf>. Acesso em: 01 de novembro de 2021.

BIRD, R. B.; STEWART, W. E.; LIGHTFOOT, E. N. “Fenômenos de Transporte”, LTC Editora, 2004.

Boletim epidemiológico 03 – doença pelo novo coronavírus 2019 – COVID-19, Ministério da Saúde, Secretaria de Vigilância em Saúde, Brasília, 2020.

BOUROUBA, L. The Fluid Dynamics of Disease Transmission. *Annual Review of Fluid Mechanics*, p. 473-510, 2020. Disponível em: <<https://www.annualreviews.org/doi/pdf/10.1146/annurev-fluid-060220-113712>>. Acesso em: 31 de julho de 2021.

CHAUDHURI, S.; BASU, S.; SAHA, A. Analyzing the dominant SARS-CoV-2 transmission routes toward an ab initio disease spread model. *Phys. Fluids* 32, 123306 (2020).

CUI, J.; LI, F.; SHI, Z-L. Origin and evolution of pathogenic coronaviruses. *Nature Reviews Microbiology* 17, p. 181-192, 2019.

CUMMINS, C. P. et al. The dispersion of spherical droplets in source–sink flows and their relevance to the COVID-19 pandemic. *Phys. Fluids* 32, 083302 (2020).

DAS, S.K. et al. Transmission of airborne virus through sneezed and coughed droplets. *Phys. Fluids* 32, 097102 (2020).

DBOUK, T.; DRIKAKIS, D. On coughing and airborne droplet transmission to humans. *Phys. Fluids* 32, 053310 (2020).

DHANG, R.; LI, J. Coughs and Sneezes: Their Role in Transmission of Respiratory Viral Infections, Including SARS-CoV-2. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, v. 22, n. 5, 2020.

DIWAN, S. S.; RAVICHANDRAN, S.; GOVINDARAJAN, R.; NARASIMHA, R. Understanding Transmission Dynamics of COVID 19 Type Infections by Direct Numerical Simulations of Cough/Sneeze Flows. *Trans Indian Natl Acad Eng*, pp. 1-7, 2020.

EL-AZIZ, T. M. A.; STOCKAND, J. D. Recent progress and challenges in drug development against COVID-19 coronavirus (SARS-CoV-2) - an update on the status. *Infection, Genetics and Evolution* 83 (2020).

EVANS, M. Avoiding COVID-19: Aerosol Guidelines, (2020).

FENG, Y.; MARCHAL, T.; SPERRY, T.; YI, H. Influence of wind and relative humidity on the social distancing effectiveness to prevent COVID-19 airborne transmission: a numerical study. *Journal of Aerosol Science*, v.147, 2020.

FOX, R. W.; MCDONALD, A. T.; PRITCHARD, P. J. *Introdução à Mecânica dos Fluidos*. Tradução: Ricardo Nicolau Nassar Koury, Luiz Machado. Minas Gerais: LTC, 8° Ed., 2010.

HONGZHOU, L.; STRATTON, C. W.; TANG, Y-M. Outbreak of pneumonia of unknown etiology in Wuhan, China: The mystery and the miracle. *Journal of Medical Virology*, v. 92, n 4, p. 401-402, 2020.

- ISHII, M.; HIBIKI, T. Thermo-Fluid Dynamics of Two-Phase Flow. 2° Ed. USA: Springer, 2011.
- LIU, Y. et al. Aerodynamic analysis of SARS-CoV-2 in two Wuhan hospitals. Nature, 582, pp. 557-560 (2020).
- PATEL, K. P. et al. Transmission of SARS-CoV-2: an update of current literature. European Journal of Clinical Microbiology & Infectious Diseases (2020) 39:2005–2011.
- PENDAR, M-R.; PÁSCOA, J. C. Numerical modeling of the distribution of virus carrying saliva droplets during sneeze and cough. Phys. Fluids 32, 083305 (2020).
- POPE, S. B. Turbulent Flows. 1 ed. Cambridge University Press, 2000, 770 p.
- REZENDE, A. L. T. Análise numérica da bolha de separação do escoamento turbulento sobre placa plana fina inclinada. Rio de Janeiro, 2009. Tese de doutorado – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.
- ROSA, E. S. Escoamento multifásico isotérmico. Porto Alegre: Bookman, 2012.
- SANTANA, H. S. et al. How Chemical Engineers can contribute to fight the COVID-19. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers. 2020.
- SILVA, D. P.; SANTOS, I. M. R.; MELO, V. S. Aspectos da infecção ocasionada pelo Coronavírus da Síndrome Respiratória Aguda Grave 2 (SARS-CoV-2). Brazilian Journal of health Review, Curitiba, v. 3, n. 2, p. 3763-3779, 2020.
- SILVA, L. F. Combustão e Turbulência. IV Escola de Primavera de Transição e Turbulência. Porto Alegre, p.205, 2004.
- SCHLICHTING, H.; GERSTEN, K. Teoria da Camada Limite. 8° Ed. Berlin: Springer, 2000.
- VUORINEN, V. et al. Modelling aerosol transport and virus exposure with numerical simulations in relation to SARS-CoV-2 transmission by inhalation indoors. Safety Science, 130, 2020.
- WELTY, J. R.; WILSON, R. E.; WICKS, C. E. “Fundamentals of Momentum, Heat and Mass Transfer”, 4thEd. John Wiley & Sons, 2001.

X. Xie, Y. Li, A. T. Y. Chwang, P. L. Ho, and W. H. Seto, "How far droplets can move in indoor environments-revising the wells evaporation-falling curve," *Indoor Air* 17, 211–225 (2007).