



USO DE FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS NO ENSINO DE FENÔMENOS DE TRANSPORTE – UMA EXPERIÊNCIA PRÁTICA NO ENSINO EMERGENCIAL REMOTO

USING COMPUTATIONAL TOOLS TO TEACH TRANSPORT PHENOMENA – A PRACTICAL EXPERIMENT IN REMOTE EMERGENCY TEACHING

Fernanda Borges¹, Calebe Livistom², Juliana Espíndola³

DOI: 10.37702/REE2236-0158.v42p658-676.2023

RESUMO: O presente trabalho apresenta uma experiência de ensino e aprendizagem ocorrida durante o período de crise sanitária de COVID-19 com alunos de engenharia ao cursarem as disciplinas de Fenômenos de Transporte. Devido ao contexto da pandemia, foi necessário realizar as atividades das disciplinas de maneira remota, o que impôs novos desafios aos educandos e educadores. Assim, optou-se por realizar uma abordagem computacional para os problemas estudados, com o intuito de estimular os alunos a explorarem autonomamente os fenômenos físicos envolvidos. Foram escolhidos dois tipos de ferramentas computacionais: um *software* de linguagem matemática, optando-se pelo *GNU Octave*, por ser de código aberto e de fácil acesso; e um *software* de Engenharia Auxiliada por Computador (EAC), optando-se pelo *SimScale*, por operar e armazenar os dados das simulações *on-line*, o que facilita o acesso e a usabilidade. De posse dessas duas ferramentas, os alunos foram capazes de construir a estrutura lógica para a solução do problema (algoritmo) através do *software* de linguagem matemática, e, em um segundo momento, implementar o problema no *software* EAC para simular o fenômeno físico envolvido. Algumas das soluções obtidas para os problemas propostos são apresentadas neste trabalho, e a influência sobre o processo de ensino e aprendizagem é discutida.

PALAVRAS-CHAVE: Fenômenos de Transporte; Ferramentas Computacionais; Ensino Remoto; Engenharia Auxiliada por Computador; Ensino de Engenharia.

ABSTRACT: This paper presents a teaching and learning experience that took place during the health crisis period of COVID-19 with engineering students while taking courses on Transport Phenomena. Due to the pandemic context, it was necessary to perform the subjects' activities remotely, which posed new challenges to both students and educators. Thus, a computational approach was chosen for the problems studied, in order to stimulate students to autonomously explore the physical phenomena involved. Two types of computational tools were chosen: a mathematical language software, GNU Octave, for being open source and easily accessible; and, a Computer Aided Engineering (CAT) software, SimScale, for operating and storing simulation data online, which facilitates access and usability. In possession of these two tools, the students were able to build the logical structure for the solution of the problem (algorithm) through the mathematical language software, and, in a second moment, implement the problem in the CAS software to simulate the physical phenomenon involved. Some of the solutions obtained for the proposed problems are presented in this paper, and the influence on the teaching and learning process is discussed.

KEYWORDS: Transport Phenomena; Computational Tools; Remote Teaching; Computer Aided Engineering; Engineering Teaching.

¹ Professora Adjunta EQA – FURG, Doutora em Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande – FURG, fernanda-borges@furg.br

² Bacharel em Engenharia Agroindustrial Agroquímica, Universidade Federal do Rio Grande – FURG, calebehsilva@gmail.com

³ Professora Adjunta EQA – FURG, Doutora em Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande – FURG, jespindola@furg.br



INTRODUÇÃO

Há grande necessidade de adaptação e aprimoramento das metodologias de ensino tradicionais nas áreas das Engenharias em relação às novas necessidades apresentadas e formação profissional requerida pelo mercado do trabalho. Isso se torna evidente diante da elaboração, no ano de 2019, de novas Diretrizes Curriculares Nacionais (DCNs) dos Cursos de Graduação em Engenharia (ABMES, 2019).

Entre os pontos apresentados nas novas DCNs estão a formação por competências, a necessidade da formação de um profissional baseada na abordagem prática dos problemas de Engenharia, o processo de aprendizagem desenvolvido de maneira ativa da parte dos alunos, além de uma maior flexibilização da composição do currículo para as Instituições de Ensino Superior (MEC, 2019). Esses pontos abordados pelas novas Diretrizes abrem, portanto, a possibilidade de que educadores e alunos desempenhem esforços conjuntos no sentido de investigar e aprimorar a estrutura curricular dos cursos de graduação em Engenharia, bem como das metodologias de ensino de disciplinas essenciais à formação do profissional de engenharia.

Diante dessa possibilidade, a atenção dos autores voltou-se para as metodologias de ensino empregadas nas disciplinas de Fenômenos de Transporte I e II, dos cursos de Engenharia Agroindustrial Agroquímica e Engenharia Agroindustrial Indústrias Alimentícias, ofertadas pela Universidade Federal do Rio Grande (FURG) no campus de Santo Antônio da Patrulha-RS. Conforme o Projeto Pedagógico do Curso (PPC), os conteúdos trabalhados na disciplina de Fenômenos de Transporte I e II devem abranger “conceitos e definições, propriedades dos fluidos, estática dos fluidos, descrição do movimento de fluidos, conservação de massa, quantidade de movimento e energia no volume de controle, as formas diferenciais das equações de conservação, análise dimensional, escoamento em dutos fechados, escoamentos externos” e “fundamentos de transferência de calor, equação da difusão de calor, condução em estado estacionário e transiente, fundamentos da transferência de calor por convecção, escoamento externo, escoamento interno, ebulição e condensação, equipamentos de transferência de calor, transferência de calor por radiação”, respectivamente (FURG, 2020).

Todos os conceitos abordados e estudados nas disciplinas de Fenômenos de Transporte I e II estão ligados, fortemente, a conceitos da Física que requerem, frequentemente, um esforço particularmente grande por parte dos alunos, pois



são, muitas vezes, abstratos e contraintuitivos (FIOLHAIS; TRINDADE, 2003). Nesse sentido, é necessária a busca por novas ferramentas e metodologias de ensino que aproximem o aluno das situações reais envolvidas no estudo desses conceitos, com o objetivo de facilitar o entendimento do aluno e ampliar a sua compreensão em relação aos tópicos estudados nessas disciplinas.

Dada essa necessidade, o uso de ferramentas computacionais para o ensino de Fenômenos de Transporte torna-se uma alternativa interessante para auxiliar no processo de aprendizagem, uma vez que dinamizam esse processo e possibilitam ao aluno visualizar (através de recursos gráficos e simulações) situações físicas complexas de maneira mais eficiente do que aconteceria por meio das metodologias tradicionais de ensino (ANGELO; BARRIOS, 2006). No presente trabalho será explorado o uso dessas ferramentas como componentes de uma metodologia de ensino mais dinâmica e que possibilite uma atuação mais ativa dos alunos no processo de aprendizagem, em contraste com a metodologia de ensino tradicional.

O uso das ferramentas computacionais no ensino de Fenômenos de Transporte I e II se tornou ainda mais premente, dadas as circunstâncias excepcionais em que essas disciplinas foram ministradas durante os períodos letivos de 2020 a 2022. Em razão da crise sanitária decorrente da pandemia de COVID-19, ao longo dos anos de 2020 a 2022, as atividades de ensino presencial foram suspensas pela Universidade e foi adotada a modalidade de ensino emergencial remoto. Os cursos de Engenharia Agroindustrial Agroquímica e Engenharia Agroindustrial Indústrias Alimentícias compilaram o período letivo em módulos de sete semanas. Assim, cada disciplina de Fenômenos de Transporte (I e II) foi ministrada em um módulo de 7 semanas, com 8 créditos, de maneira remota. Esse formato difere daquele ministrado fora do período remoto, em que cada disciplina é ministrada em 18 semanas, com 4 créditos, de maneira presencial.

O tempo reduzido no qual as atividades das disciplinas foram desenvolvidas, o distanciamento físico imposto entre educador e alunos e o agravante psicológico resultante desse conjunto de fatores evidenciaram a importância e impuseram a necessidade urgente de se desenvolver e implementar, rapidamente, uma metodologia de ensino eficiente para atender aos propósitos das disciplinas, facilitar o aprendizado dos alunos e explorar, da melhor maneira possível, os meios de comunicação e construção de conhecimento disponíveis durante esse período; em sua maioria, meios digitais. Optou-se, assim, por utilizar, de maneira ativa, ferramentas computacionais para a implementação e simulação dos problemas estudados nas disciplinas.



Uma avaliação cuidadosa desta abordagem sobre os efeitos percebidos nos processos de ensino e aprendizagem será útil para avaliar com embasamento prático qual o efeito do uso das tecnologias computacionais como ferramentas de ensino sobre a assimilação e compreensão dos conteúdos estudados por parte dos alunos. Essa avaliação será útil também para indicar se os alunos conseguiram aproximar os problemas teóricos dos problemas reais com mais facilidade do que ocorreria sem o uso das ferramentas computacionais, e, claro, se a sua atuação na construção do conhecimento se deu de maneira mais ativa do que ocorreria através das metodologias tradicionais de ensino.

É evidente que essa abordagem traz à tona outra problemática. Mesmo que a metodologia proposta neste trabalho seja mais adequada (de acordo com as novas DCNs para as Engenharias) do que as metodologias tradicionais para o ensino de Fenômenos de Transporte, existe a necessidade de que o encadeamento, ou sequência lógica, das disciplinas dos cursos de Engenharia Agroindustrial capacite os alunos para o uso das ferramentas e tecnologias computacionais que foram empregadas nas disciplinas de Fenômenos de Transporte I e II durante o período letivo de 2020 a 2022.

Dessa maneira, serão apresentadas as ferramentas computacionais utilizadas nas disciplinas de Fenômenos de Transporte I e II, e, na sequência, os desenvolvimentos de dois problemas de engenharia estudados nas disciplinas, que relacionam conceitos de mecânica dos fluidos e de processos de transferência de calor. Será discutido como a abordagem tradicional difere da abordagem que inclui o uso de ferramentas computacionais na resolução e exploração de cenários relativos a esses problemas. O detalhamento e as especificações das ferramentas computacionais utilizadas, bem como a adequação da sequência lógica e ementa das disciplinas dos cursos de Engenharia Agroindustrial, serão apresentados e discutidos.

Os autores esperam que, ao final da leitura deste trabalho, esteja evidente a necessidade e importância da utilização de ferramentas computacionais no ensino de Fenômenos de Transporte para contribuir com a formação de um profissional de engenharia, formação mais direcionada à resolução de problemas práticos e construída pelos alunos de forma ativa e dinâmica.



FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS PARA O ENSINO DE FENÔMENOS DE TRANSPORTE

É notório que, no decorrer dos últimos anos, o desenvolvimento de tecnologias computacionais tem permitido a realização de diversas atividades nos mais variados setores da sociedade de maneira facilitada e aprimorada. As tecnologias computacionais modificam a formatação dessas atividades e são, indissociavelmente, formatadas de acordo com a necessidade de cada setor. Em especial, nota-se a relação de construção contínua entre metodologias de ensino e o uso de ferramentas computacionais no processo de aprendizagem (MANRIQUE; PÓVOA, 2020).

Não diferentemente das demais áreas de ensino, o ensino em Engenharia é permeado pelo desenvolvimento de novas tecnologias computacionais que instigam o desenvolvimento de novas metodologias de ensino e abrem para os alunos a possibilidade de interagir com o conhecimento de maneira mais dinâmica e aprofundada. Nesse sentido, destaca-se o uso de ferramentas computacionais direcionadas para o cálculo numérico, que se demonstram extremamente úteis no estudo de problemas de engenharia, dada a complexidade dos modelos matemáticos que muitas vezes estão envolvidos com esses problemas (NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 1995).

É interessante observar, ainda, que o uso de ferramentas computacionais permite ao aluno e ao educador que explorem problemas e aplicações de maneira a obter resultados mais precisos e mais próximos das condições reais do problema físico, o que não seria possível através da abordagem tradicional para o ensino de engenharia (sem o uso de ferramentas computacionais), dado que as situações estudadas por esta abordagem muitas vezes requerem a aplicação de várias simplificações que podem acabar por distanciar o problema teórico do problema físico (LOPES et al., 2017). Faz-se útil, portanto, para a abordagem de ensino proposta por este trabalho, além do uso de ferramentas computacionais com linguagem matemática, o uso de *softwares* de Engenharia Assistida por Computador (CAE), os quais permitem a simulação de vários tipos de problemas físicos através de variadas técnicas computacionais que são aprimoradas constantemente para aumentar a precisão matemática de seus algoritmos como Fluidodinâmica Computacional (CFD), Análise de Elementos Finitos (MEF), Análise de Volumes Finitos (MVF) e Simulações Térmicas, por exemplo (KOREN; VUIK, 2010).



Octave

O *GNU Octave* consiste em uma linguagem de programação e em um *software* voltado à implementação computacional de linguagem matemática. É útil para resolver problemas físicos que não apresentem solução analítica e requeiram a realização de iterações para obter a resolução, o que é realizado por diferentes métodos numéricos que podem ser implementados com a linguagem para resolver problemas lineares e não lineares. Ademais, um recurso explorado na experiência educacional apresentada neste artigo foi o uso de um pacote de matemática simbólica integrada à linguagem *Python*, conhecido como *Symbolic*. Este pacote foi explorado com o objetivo de que os alunos conseguissem organizar o raciocínio necessário para a resolução dos problemas e acompanhar o desenvolvimento e manipulação das variáveis envolvidas até chegar à solução final (EATON, 2020).

Simscale

O *SimScale* é um *software* direcionado à resolução computacional de problemas de Engenharia (KIRILL, 2023). A sua escolha se deu devido ao fato de ser possível operar e armazenar o resultado das simulações realizadas *on-line*, o que permite que mesmo alunos que tivessem acesso a um *hardware* com baixa capacidade computacional fossem capazes de utilizar a ferramenta e acessar os resultados produzidos. As principais funcionalidades da ferramenta são a simulação de problemas de fluidodinâmica e de transferência de calor (DE PIETRI et al., 2023). Para isso, o *software* emprega uma técnica de resolução conhecida como método dos elementos finitos, que opera, basicamente, subdividindo o domínio de resolução do problema em vários domínios menores para os quais serão aplicadas localmente as condições de contorno para a resolução das equações diferenciais que regem o fenômeno físico sendo simulado (REDDY, 2006). Isso é particularmente útil para obter soluções confiáveis para problemas que envolvem geometrias mais complexas e que, portanto, requerem análise local em vários subdomínios. Essa técnica também é útil para obter soluções mais precisas em regiões de interface de diferentes materiais e que, portanto, apresentam propriedades físicas diferentes. A quantidade de subdomínios gerados é expressa no *software* como o grau de Malha escolhido e depende das particularidades do problema físico sendo analisado. Ademais, o *software SimScale* conta com uma biblioteca aberta produzida pelos próprios usuários que contém vários problemas pré-elaborados



que podem ser explorados pelos estudantes em um processo autônomo de aprendizagem (SIMSCALE DOCUMENTATION, 2022).

PROBLEMAS DESENVOLVIDOS

Os livros-texto utilizados na disciplina, dos quais os problemas propostos foram escolhidos, são os seguintes: “Transferência de Calor e Massa – Uma Abordagem Prática” de Yunus A. Çengel e Afshin J. Ghajar (2011) e “Fundamentos de Transferência de Calor e Massa” de Theodore L. Bergman e colaboradores (2014).

A implementação dos problemas foi feita através do *software GNU Octave* versão 5.2.0 e se utilizou o pacote de matemática simbólica *symbolic* versão 2.9.0. Outra maneira de explorar o problema foi através da implementação do *software* de simulação *SimScale*.

Problema 1

Problema 3-92 de Çengel: “Uma bola esférica de 4 mm de diâmetro a 50 °C é envolta com isolamento plástico ($k = 0,13 \text{ W/m.K}$) de 1 mm de espessura. A bola está exposta ao meio a 15 °C, com coeficiente combinado de transferência de calor por convecção e radiação de $20 \text{ W/m}^2\text{.K}$. Determine se o isolamento de plástico sobre a bola ajudará ou prejudicará a transferência de calor a partir da bola”.

Problema 3-93 de Çengel: “Reconsidere o Prob. 3-92. Usando EES (ou outro programa), trace a taxa de transferência de calor a partir da bola em função da espessura de isolamento plástico na faixa de 0,5 mm a 20 mm. Discuta os resultados”.

Problema 2

Problema 8-66 de Çengel: “Água a 15 °C é aquecida ao passar dentro de tubos de cobre de parede fina de 2 cm de diâmetro. O calor é fornecido para a água por meio de vapor que condensa do lado de fora dos tubos de cobre em 120 °C. Considerando que a água deve ser aquecida a 65 °C a uma taxa de 0,2 kg/s, determine (a) o comprimento do tubo de cobre necessário e (b) a potência de bombeamento necessária para superar perdas de pressão. Suponha que todo o tubo de cobre está na temperatura de vapor (120 °C)”.

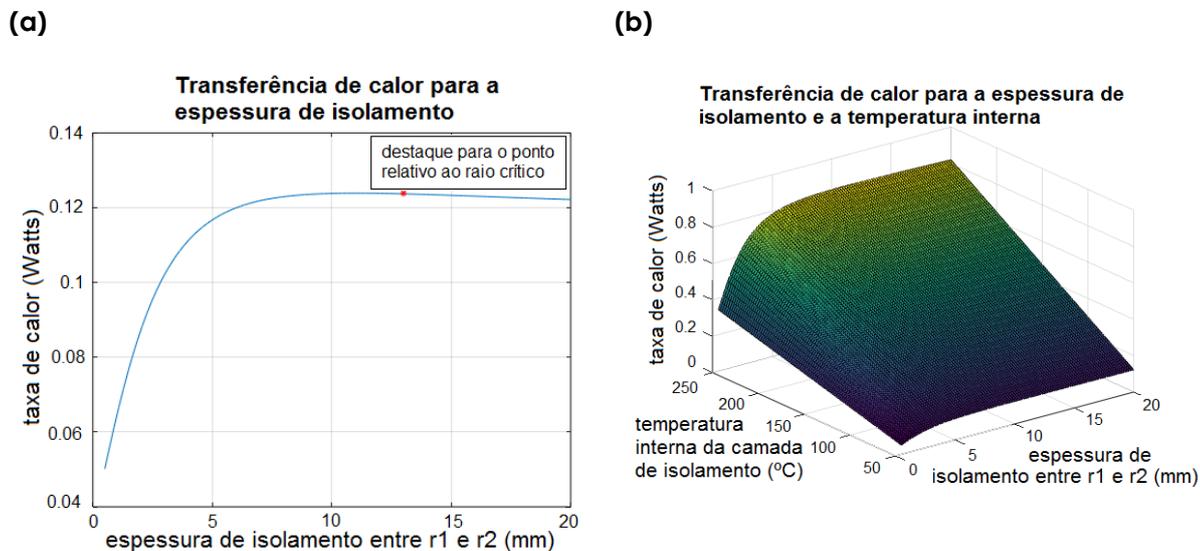


RESULTADOS E DISCUSSÃO

Problema 1

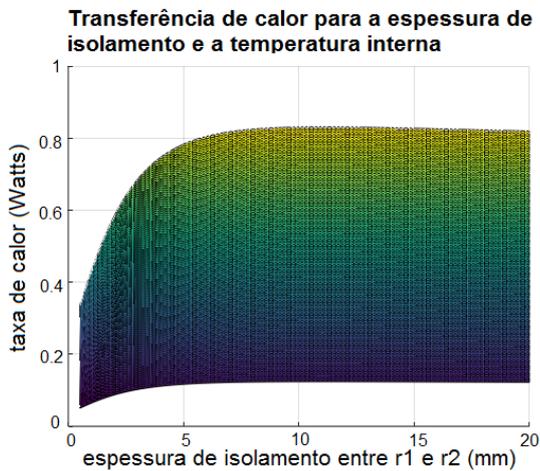
A maneira como é tratada as variáveis de interesse no *software GNU Octave* permite ao usuário atribuir valores diferentes daqueles informados pelo enunciado do problema para os demais parâmetros e, então, gerar conjuntos de dados que podem ser utilizados para analisar graficamente como as variáveis de interesse se comportam em relação às demais. Os gráficos gerados são apresentados na Figura 1.

Figura 1 – Comportamento da taxa de calor em função da temperatura interna e da espessura da camada de isolamento

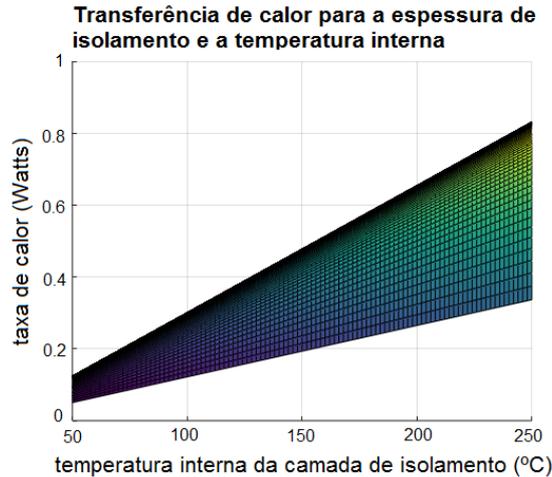




(c)



(d)



Fonte: acervo dos autores.

Conforme se pode observar, obteve-se um gráfico, apresentado na Figura 1 (a), para a variação na taxa de transferência de calor em função da variação na espessura da camada de isolamento da esfera com uma ferramenta de utilização relativamente simples e de código aberto. Isso favoreceu o aluno a concentrar sua energia em pensar a lógica do problema e a relação entre as variáveis para escrever e implementar as equações corretamente e em analisar os resultados gráficos obtidos, uma vez que o trabalho de repetir todo o procedimento de cálculo para cada novo valor dentro do intervalo foi realizado computacionalmente.

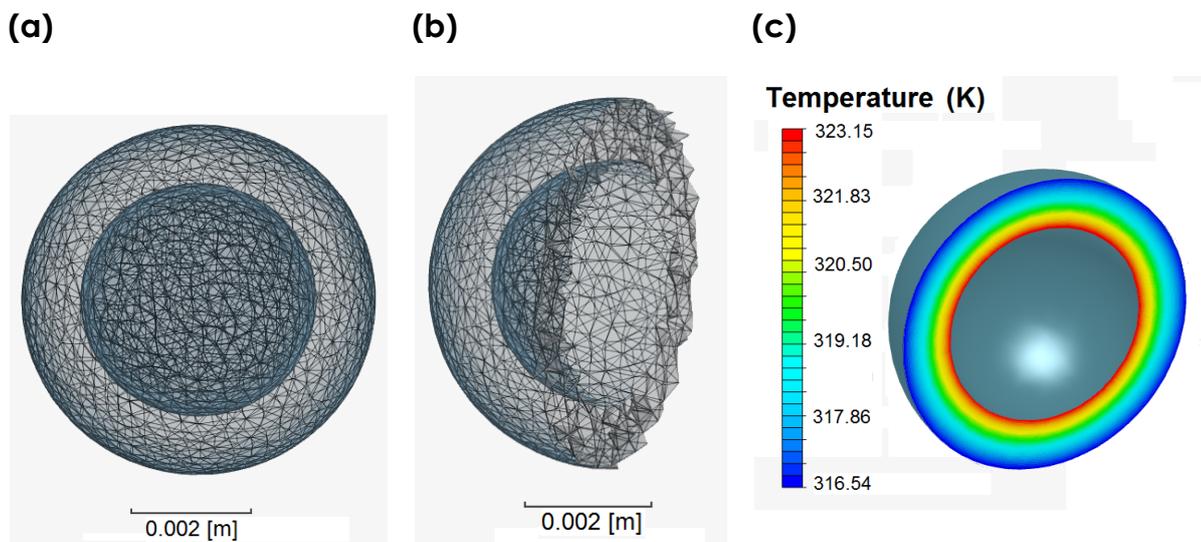
O uso dessa ferramenta permitiu ainda ao aluno que explorasse, adicionalmente, a variação de um parâmetro além do solicitado pelo problema. Foi escolhido pelo aluno variar simultaneamente a espessura da camada de isolamento e a temperatura interna da esfera isolada. Os resultados gráficos obtidos são encontrados na Figura 1 (b).

Os dois eixos no plano inferior do gráfico representam a variação da espessura da camada de isolamento e da temperatura interna da esfera, enquanto a altura da superfície gerada em relação ao eixo perpendicular a esse plano indica o valor da taxa de transferência de calor para o respectivo par de valores das duas variáveis representadas. Isso permitiu ao aluno uma interpretação visual do problema, além de permitir a interação com o gráfico tridimensional gerado, do qual um dos eixos poderia ser oculto e analisada visualmente a variação de apenas um dos parâmetros inseridos para vários valores fixos do parâmetro oculto, que podem ser interpretados como isolinhas sobre a superfície gerada que se

encontram em um plano paralelo ao eixo da outra variável. É o que se pode observar nos gráficos (c) e (d) da Figura 1.

Através da ferramenta computacional *SimScale* foi possível ao aluno se familiarizar com alguns aspectos do funcionamento da simulação computacional, como, por exemplo, a finalidade da malha criada antes do processamento para a geração de pontos para os quais serão resolvidas as equações do modelo do *software* (Figura 2, a e b). A simulação do problema físico permitiu ainda ao aluno uma análise visual da distribuição de temperatura na camada de isolamento que envolve a esfera (Figura 2c).

Figura 2 – Malha e distribuição de temperatura na camada de isolamento obtida por simulação



Fonte: acervo dos autores.

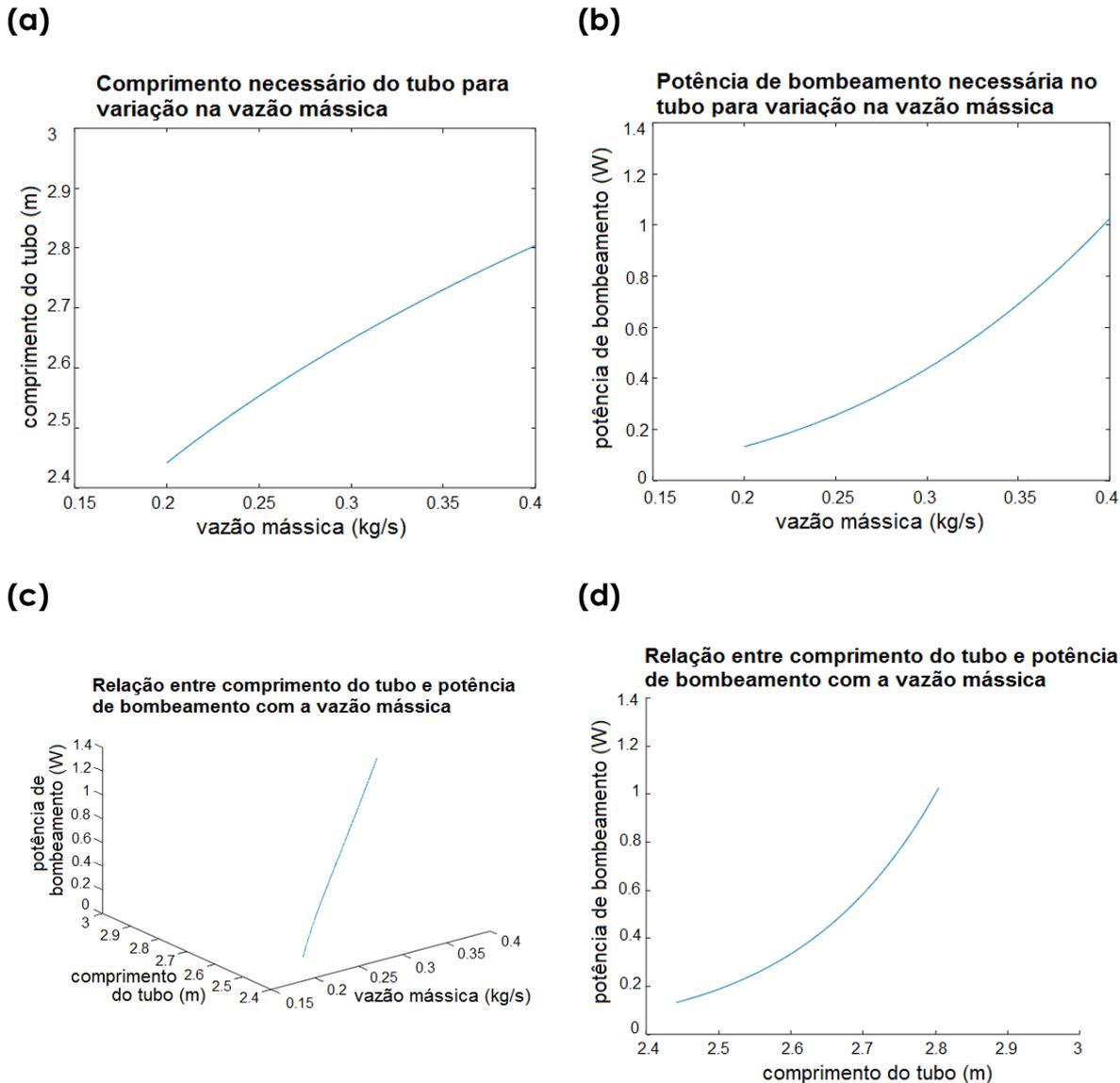
Problema 2

O uso do *software GNU Octave* para resolução do Problema 2 permitiu ao aluno variar a vazão mássica entre o valor informado pelo problema e o dobro deste valor para gerar conjuntos de dados úteis para compreensão do efeito das variáveis sobre a resposta do problema e realização de análises gráficas. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 3. A realização deste trabalho computacionalmente diminui o tempo necessário para resolver o problema, e, uma vez que fornece uma solução algébrica final, permite ao aluno variar valores de parâmetros sem ter de resolver todo o problema desde o início através de



inúmeros passos onde são calculados valores a serem substituídos em outras equações.

Figura 3 – Relações gráficas entre comprimento da tubulação, vazão mássica e potência de bombeamento



Fonte: acervo dos autores.

Como é possível observar, dentro do intervalo escolhido, o gráfico que descreve o comportamento do comprimento necessário do tubo para aquecer a água em função da vazão mássica aparenta ter um comportamento semelhante ao de uma função logarítmica e o gráfico que descreve a potência de



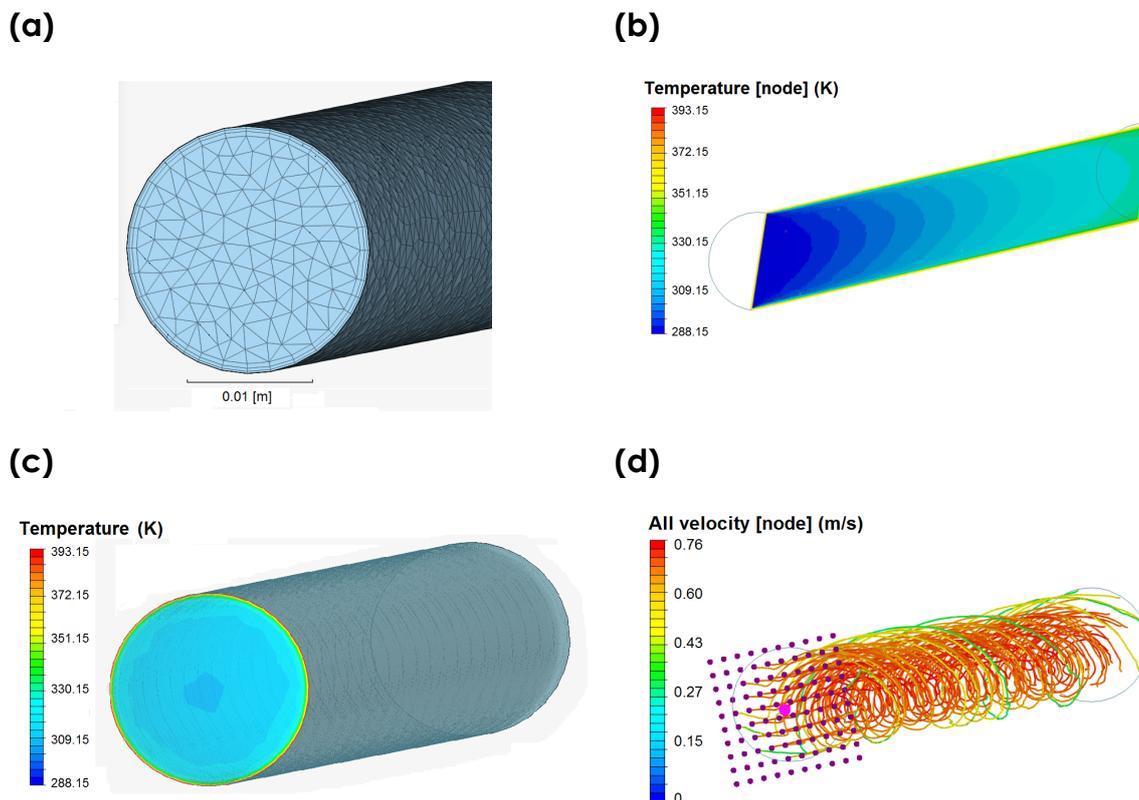
bombeamento necessária para superar as perdas de pressão no canal em função da vazão mássica aparenta ter o comportamento de uma função exponencial. O aluno decidiu ainda realizar uma análise gráfica adicional, em três dimensões, ao cruzar os valores dos vetores gerados para a vazão mássica, para o comprimento do canal e para a potência de bombeamento em pontos no espaço, e o resultado obtido corresponde ao gráfico (C) da Figura 3.

Essa análise permitiu ao aluno perceber a diferença entre o tipo de gráfico gerado através da variação de valores de variáveis independentes (gráficos de superfície) do tipo de análise possível quando todas as variáveis estudadas são dependentes (gráficos de linha no espaço). Por fim, este último gráfico permite a interação do usuário e, se for rotacionado de maneira a ocultar o eixo relativo à vazão mássica, será possível analisar, visualmente, qual a relação entre o comprimento do tubo e a potência de bombeamento necessária para superar as perdas de pressão. O resultado obtido, que corresponde ao gráfico (D) da Figura 3, tem a forma similar à de uma função exponencial dentro do intervalo estudado.

O comportamento da potência de bombeamento em função do comprimento do tubo como uma exponencial crescente já era esperado uma vez que este é o mesmo comportamento apresentado pela potência de bombeamento necessária em função da vazão mássica e todas estas variáveis são mutuamente dependentes.

Adicionalmente, realizou-se a implementação do problema no *software* de simulação *SimScale*, o que permitiu ao aluno explorar visualmente a situação física abordada pelo problema. Foi possível ao aluno, ainda, aprimorar os seus conhecimentos a respeito da construção de simulações, uma vez que, dadas as condições do problema, seria necessário um refinamento na malha da geometria utilizada, de modo a adaptar as células e pontos mais próximos da parede do tubo para aumentar a precisão da solução do problema (Figura 4a). O aluno pode ainda observar o perfil de temperaturas estabelecido no escoamento e a formação de regiões de diferentes temperaturas na seção de escoamento (itens b e c da Figura 4). Como ponto de interesse adicional, foi possível observar a formação de vorticidade através da análise da trajetória das partículas no escoamento.

Figura 4 – Malha, perfis de temperatura e trajetória de partículas obtidas através da simulação



Fonte: acervo dos autores.

A experiência prática

Com base na prática educacional realizada durante o emprego de ferramentas computacionais para o ensino remoto de Fenômenos de Transporte, os docentes envolvidos puderam desenvolver percepções acerca do impacto sobre a aprendizagem e desenvolvimento dos alunos, as quais são apresentadas em sequência. Para fins de caracterização do grupo discente que cursou as disciplinas de Fenômenos de Transporte I e II, cabe salientar que, dos 31 alunos, apenas 6 não haviam tido contato, por meio das disciplinas do curso, com ferramentas computacionais de linguagem matemática como o *GNU Octave*, uma vez que não haviam cursado a disciplina de Cálculo Numérico e Computacional. Além disso, alguns desses alunos já haviam utilizado outros *softwares* com a mesma finalidade em projetos de iniciação científica, tais como *SciLab*, *Origin*, *Excel*, *FORTRAN* e linguagem *R*.



Pôde-se perceber que os alunos não encontraram dificuldades de acesso às ferramentas propostas, conforme o esperado. Entretanto, alguns deles enfrentaram dificuldades relativas a procedimentos necessários para o uso das ferramentas, como a instalação de pacotes adicionais para explorar outras formas de avaliação do problema proposto, estruturação do problema na forma da linguagem de programação utilizada, e, em alguns casos, mal funcionamento do *hardware* à disposição dos alunos, o que dificultou a execução dos programas.

Em relação às dificuldades encontradas no uso da ferramenta computacional de linguagem matemática, pode-se perceber que, mesmo que a maioria dos alunos já tivesse contato em algum momento com o *GNU Octave* ou similar, não estavam habituados com a sua utilização. Isso gerou algumas dificuldades relativas à estruturação do problema utilizando os comandos básicos da linguagem, e, principalmente, na exploração de soluções e recursos adicionais, como a geração de gráficos de famílias de soluções, a utilização de matemática simbólica para manipulação de variáveis entre outros. Em relação ao uso do *software* de simulação *SimScale*, a maior dificuldade percebida não foi na configuração das condições físicas dentro do programa, mas na construção da geometria sobre a qual seria aplicado o modelo e condições de contorno do problema físico.

Talvez o maior impacto sobre o processo de aprendizagem dos alunos envolvidos tenha sido exatamente a oportunidade de explorarem, autonomamente, diferentes condições para os problemas apresentados. Nesse sentido, o uso de ferramentas computacionais de linguagem matemática (como o *Octave*) apresenta grande vantagem frente ao uso de metodologias tradicionais, uma vez que permite aos alunos variar os valores dos parâmetros e variáveis envolvidos de maneira mais rápida. Tal procedimento, se realizado manualmente, demandaria muito tempo e trabalho repetitivo (não necessariamente trabalho intelectual, note-se) para se obter um conjunto de soluções para diferentes valores das variáveis do problema proposto. Por outro lado, através do uso de ferramentas computacionais, foi possível obter esse conjunto de resultados rapidamente, apenas definindo-se um intervalo de variação dos valores dos parâmetros e variáveis de interesse, além de produzir gráficos que auxiliam a compreensão do problema visualmente.

Sobre a motivação dos alunos para cursar as disciplinas de Fenômenos de Transporte I e II em relação ao uso de ferramentas computacionais de linguagem matemática, os alunos mostraram-se motivados no processo de aprendizagem. Entre as razões positivas percebidas pelos docentes, pode-se apontar a percepção da possibilidade de explorar mais os problemas propostos sem ter de fazê-lo



manualmente e a possibilidade de geração de análises gráficas, o que permite uma interpretação visual da relação entre as variáveis físicas envolvidas no problema. O aspecto negativo percebido foi o receio de não se realizar a implementação dos problemas estudados da maneira correta no *software*, dada a falta de prática no uso da ferramenta. Outra motivação mostrada pelos alunos é a percepção deles da contribuição do uso de ferramentas computacionais de linguagem matemática sobre a sua formação como engenheiros.

É notável, ainda, o fato de que os profissionais de engenharia devem estar habituados a pensar e agir de maneira autônoma no exercício das suas atribuições, característica formativa que foi estimulado através do uso das ferramentas computacionais. Além disso, as ferramentas empregadas e o tipo de problemas abordados são muito similares aos que farão parte da atividade profissional dos futuros engenheiros. Nesse sentido, entende-se que o uso do *software SimScale*, para simulação de problemas de fluidodinâmica computacional e transferência de calor, está voltado mais para aplicações específicas, como o projeto de equipamentos e/ou tubulações de uma instalação industrial, enquanto que o uso da ferramenta computacional de linguagem matemática *GNU Octave* pode ser estendido para diferentes propósitos, como o próprio projeto de equipamentos e instalações, projeto de rede de trocadores de calores, de integração energética e de processos industriais de maneira geral.

Ao avaliar o encadeamento das disciplinas do curso, foi possível perceber que a ordem na qual as disciplinas são dispostas favorece a capacitação dos alunos para o uso de ferramentas computacionais de linguagem matemática, uma vez que as disciplinas de Algoritmos Computacionais e de Cálculo Numérico pertencem a períodos do curso anteriores ao das disciplinas de Fenômenos de Transporte I e II. Entretanto, cabe salientar, também, que embora essas disciplinas pertençam a períodos anteriores do curso, estas não estão vinculadas como pré-requisitos, o que talvez dificulte o entendimento do aluno sobre a importância e finalidade delas para a aplicação em Fenômenos de Transporte. Um ponto de atenção, entretanto é relativo ao uso do *software* de simulação *SimScale*, em que uma das principais dificuldades encontradas pelos alunos não foi relativa à escolha do modelo matemático adequado, à configuração dos parâmetros físicos e condições de contorno no programa, mas devido à completa falta de contato anterior com *softwares* de desenho e projeto de figuras tridimensionais, como CAD (*Computer Aided Design*) e similares. Isso ocorre devido à maneira como a disciplina de desenho técnico é ministrada nos cursos de Engenharia Agroindustrial, ainda seguindo uma abordagem tradicional, na qual todas as atividades são



realizadas à mão, sem o emprego de qualquer ferramenta computacional que prepare os estudantes para aplicações mais complexas e realistas. Com isso, salienta-se a necessidade de que o aluno perceba, desde cedo, a aplicabilidade prática dos conteúdos que estuda na graduação para resolver problemas próximos aos que terá que resolver como profissional formado.

Para além da dificuldade principal percebida no uso da ferramenta *SimScale*, decorrente da falta de familiaridade com *softwares* CAD e similares, foi possível perceber que a maioria dos alunos se demonstrou hesitante e apreensiva nesse primeiro contato com um ambiente de simulação computacional. Isso se deve à pouca (ou nenhuma) experiência no uso dessa ferramenta, do que decorreu a necessidade de aprender a usá-la enquanto desenvolviam as atividades que seriam entregues através dessa plataforma, o que pode ter gerado um pouco de insegurança.

De maneira geral, a experiência de ensino utilizando as ferramentas computacionais de linguagem matemática e o *software* de simulação produziu um balanço positivo. Um dos pontos que mais chamou a atenção dos docentes envolvidos foi que, mesmo que os alunos apresentassem dificuldades iniciais para utilizar as ferramentas propostas devido à falta de experiência com elas, estes desenvolveram de maneira satisfatória a habilidade de utilizá-las ao longo da disciplina. Os docentes atribuem isso à noção que os alunos desenvolveram de que essas ferramentas os estavam permitindo explorar problemas de natureza similar aos que encontrariam no futuro exercício profissional, o que serviu como motivador para dedicarem seu tempo e atenção tanto no estudo de Fenômenos de Transporte quanto na utilização dessas ferramentas.

Após o momento inicial de estranhamento com as ferramentas e aplicações possíveis, a postura de aprendizagem e exploração autônoma dos problemas propostos (e de outros problemas que despertaram o interesse dos alunos) fez com que estes percebessem que outras ferramentas com o mesmo propósito, como o *SciLab*, por exemplo, podem ser úteis e de fácil utilização. Embora ferramentas alternativas possuam especificidades técnicas relativas à linguagem de programação utilizada para estruturar o problema, os alunos foram capazes de perceber que o mais importante é compreender como estruturar o raciocínio, ou seja, a lógica exigida para a resolução e/ou simulação do problema físico proposto, e que, uma vez que tenham desenvolvido essa capacidade, adequar e estruturar esse raciocínio em outras linguagens e ambientes de programação é muito mais fácil do que supunham inicialmente.



Por fim, é importante pontuar que, mesmo com o balanço positivo percebido para essa experiência educacional, os alunos demonstraram, de maneira notória, insegurança e apreensão no uso das novas ferramentas. Talvez não seja possível fazer com que se habituem ao uso frequente das mesmas em períodos anteriores do curso, embora seja cabível a exposição mais eficiente a essas mesmas ferramentas, como pontuado anteriormente. Logo, faz-se necessário que o período de exposição e de aprendizagem do uso e aplicação dessas ferramentas nas disciplinas de Fenômenos de Transporte I e II seja maior do que o disposto durante o período de ensino remoto.

De forma geral, os alunos se mostraram motivados para cursar as disciplinas de Fenômenos de Transporte no formato planejado: em módulos de sete semanas, com um conteúdo por semana e atividades propostas para resolução com as ferramentas computacionais. Observou-se que, idealmente, seria benéfico aos processos de ensino aprendizagem que os alunos tivessem mais tempo para assimilação do conteúdo e do desenvolvimento das atividades, o que poderia impactar positivamente no desempenho dos alunos. Por outro lado, observou-se que a oferta das disciplinas em módulos de sete semanas fez com que os alunos ficassem “imersos” no conteúdo abordado, o que levou a uma influência positiva no processo de aprendizagem. Cabe salientar que não houve evasão de alunos da disciplina neste período.

CONCLUSÕES

A experiência de ensino e aprendizagem das disciplinas de Fenômenos de Transporte I e II para os cursos de Engenharia Agroindustrial Agroquímica e Engenharia Agroindustrial Indústrias Alimentícias durante o período de ensino remoto na pandemia de COVID-19 permitiu avaliar a influência do uso de ferramentas computacionais sobre o ensino dessas disciplinas. Em linhas gerais, o uso de *softwares* de linguagem matemática e de engenharia auxiliada por computador para simulação de situações físicas reais permitiu aos alunos desenvolverem autonomia na exploração dos problemas propostos e na qualificação para o uso dessas ferramentas. O resultado produzido é relevante devido a dois motivos principais: i) as ferramentas escolhidas permitiram o desenvolvimento de um processo de ensino e aprendizagem efetivo mesmo em um período emergencial no qual as atividades foram desenvolvidas de maneira remota; ii) a autonomia desenvolvida pelos alunos nesse processo é um traço essencial na formação do profissional de engenharia, de acordo com as novas



DCNs e com a noção de formação orientada a competências apresentada nestas. O encadeamento das disciplinas dos cursos é adequado para qualificar os alunos para o uso das ferramentas adotadas, no que diz respeito às disciplinas de Algoritmos Computacionais e Cálculo Numérico e Computacional. A disciplina de Desenho Técnico pode ser reavaliada quanto à maneira como é ministrada para melhor qualificar os discentes para o uso das ferramentas adotadas em Fenômenos de Transporte. De maneira geral, o balanço da experiência foi positivo, embora seja notória a necessidade de que se disponha de mais tempo para desenvolver os conteúdos trabalhados do que no curto espaço disponível devido ao período de ensino remoto.

REFERÊNCIAS

- ABMES. Associação Brasileira de Mantenedores do Ensino Superior no Brasil. **Resolução nº 2, de 24 de abril de 2019**. Brasília, DF, 2019.
- ANGELO, E.; BARRIOS, D. B. Utilização da dinâmica dos fluidos computacional na complementação do ensino da disciplina fenômenos de transporte. **Anais... XXXIV Congresso Brasileiro de Ensino de Engenharia**, p.1140. Editora da Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2006.
- BERGMAN, T. L. et al. **Fundamentos de Transferência de Calor e Massa**. Rio de Janeiro: LTC, 2014.
- ÇENGEL, Y. A.; GHAJAR, A. J. **Transferência de Calor e Massa - Uma Abordagem Prática**. McGraw Hill, New York, 2011.
- DE PIETRI, M. et al. Development and validation in water of FLUNED, an open-source tool for fluid activation calculations. **Computer Physics Communications**, v. 291, p. 108807, 2023.
- EATON, J. W. **GNU Octave (version 5.2.0) – Documentation**. 2020. Disponível em: <https://docs.octave.org/v5.2.0/> . Acesso em: 24 jun. 2023.
- FIOLHAIS, C.; TRINDADE, J. Física no computador: o computador como uma ferramenta no ensino e na aprendizagem das ciências físicas. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 25, p. 259, 2003.
- FURG. Universidade Federal do Rio Grande. **Projeto Pedagógico do Curso de Engenharia Agroindustrial Agroquímica**. 2020. Disponível em: https://agroindustrial.furg.br/images/PPC_Engenharia_Agroindustrial_Agroquimica_para_aprovao_na_EQA.pdf . Acesso em: 24 jun. 2023.
- KIRILL, R. B. Shape optimisation of teardrop trailers to minimise aerodynamic drag in articulated lorries. **International Journal of Thermofluids**, v. 18, p. 100334, 2023.
- KOREN, B.; VUIK, K. **Advanced Computational Methods in Science and Engineering**. Springer, Heidelberg, 2010.



- LOPES, T. J. et al. Ferramentas Computacionais como Recurso Didático no Curso de Engenharia Química. **International Journal of Alive Engineering Education**, v. 4, n. 1, p. 29, 2017.
- MANRIQUE, M. A. A.; PÓVOA, J. M. O papel das ferramentas computacionais avançadas no ensino de engenharia. **Revista de Ensino de Engenharia**, v. 39, p. 3, 2020.
- MEC. Ministério da Educação - Conselho Nacional de Educação. **PARECER HOMOLOGADO. Despacho do Ministro, publicado no D.O.U. de 23/4/2019, Seção 1, Pág. 109**. Brasília, DF, 2019.
- NATIONAL RESEARCH COUNCIL. **Engineering Education: Designing an Adaptive System**. The National Academies Press, Washington, 1995.
- REDDY, J. N. **An Introduction to the Finite Element Method**. McGraw-Hill, New York, 2006.
- SIMSCALE DOCUMENTATION. **SimScale Documentation | Online Simulation Software | SimScale**. 2022. Disponível em: <https://www.simscale.com/docs>. Acesso em: 05 jun. 2023.