



SIMULAÇÃO DA DIFUSÃO DE ESPÉCIE QUÍMICA EM CILINDRO UTILIZANDO O COMSOL MULTIPHYSICS®

Aline Sampaio Corrêa¹

Erickson Alex de Lima²

Marco Antonio Cardoso de Souza³

Resumo: Este trabalho apresenta uma simulação computacional do transporte de uma espécie diluída em um cilindro contendo água líquida, utilizando o módulo *Transport of Diluted Species (tds)* do COMSOL Multiphysics®. O objetivo foi analisar o comportamento da difusão em regime estacionário, considerando propriedades físicas reais e condições de contorno definidas. A geometria do cilindro foi modelada com dimensões específicas, e o material escolhido, “water, liquid”, teve suas propriedades automaticamente atribuídas pelo software. Uma das faces do cilindro recebeu concentração constante, e o coeficiente de difusão foi fixado em $1e-9$ m²/s. A análise gráfica dos resultados permitiu observar o gradiente de concentração no interior do cilindro, evidenciando o padrão de difusão ao longo do domínio. A simulação mostrou-se eficiente para representar fenômenos de transporte de massa, oferecendo suporte para estudos em diferentes áreas da engenharia.

Palavras-chave: difusão, cilindro, COMSOL Multiphysics®, transporte de massa.

Abstract: This work presents a computational simulation of the transport of a diluted species in a cylinder containing liquid water, using the Transport of Diluted Species (tds) module of COMSOL Multiphysics®. The objective was to analyze the diffusion behavior in a steady state, considering real physical properties and defined boundary conditions. The geometry of the cylinder was modeled with specific dimensions, and the chosen material, “water, liquid”, had its properties automatically assigned by the software. One of the faces of the cylinder received a constant concentration, and the diffusion coefficient was fixed at $1e-9$ m²/s. The graphical analysis of the results allowed observing the concentration gradient inside the cylinder, evidencing the diffusion pattern along the domain. The simulation proved to be efficient to represent mass transport phenomena, offering support for studies in different areas of engineering.

Key-words: diffusion, cylinder, COMSOL Multiphysics®, mass transport.

¹ Aluna do curso de Engenharia Química, pela UNIFATEB, campus Telêmaco Borba – e-mail: <alinecorrea299@gmail.com>.

² Professor do curso de Engenharia Química, pela UNIFATEB, campus Telêmaco Borba – e-mail: <erickson.lima@unifateb.edu.br>.

³ Professor do curso de Engenharia Química, pela UNIFATEB, campus Telêmaco Borba – e-mail: <marco.souza@unifateb.edu.br>.



EPIC 2025

XII ENCONTRO DE PESQUISA, XVI ENCONTRO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E
II ENCONTRO DE ENSINO E EXTENSÃO UNIVERSITÁRIA



1. INTRODUÇÃO

A compreensão e a modelagem da transferência de massa por difusão são fundamentais em diversas áreas da engenharia, como processos químicos, biotecnológicos, ambientais e farmacêuticos. Este trabalho investiga a simulação da difusão de uma espécie química diluída em meio líquido, dentro de um domínio cilíndrico tridimensional, utilizando o *software* COMSOL multiphysics®. A análise é realizada em regime estacionário, considerando exclusivamente o transporte difusivo, sem reações químicas ou escoamento convectivo. As condições de contorno adotadas incluem uma superfície com concentração constante e as demais impermeáveis (fluxo nulo).

A fundamentação teórica apoia-se na segunda lei de Fick, que relaciona a variação temporal da concentração ao seu gradiente (BIRD *et al.*, 2002). O método dos elementos finitos, aplicado por meio do COMSOL, tem se consolidado como ferramenta eficaz para resolver equações diferenciais parciais em problemas de transporte. Moreira (2014), destaca que a modelagem computacional em geometria tridimensional proporciona maior precisão na análise dos perfis de concentração em sistemas reais.

O problema central consiste em determinar a distribuição da concentração da espécie química no cilindro sob a ação exclusiva da difusão, com uma face impondo concentração constante e as demais funcionando como barreiras ao fluxo de massa. Espera-se que a concentração se distribua em gradiente, sendo máxima próxima à face com concentração fixa e diminuindo progressivamente até o equilíbrio difusivo nas superfícies isoladas.

A justificativa do estudo está na sua relevância prática e pedagógica, pois a simulação numérica permite reduzir custos experimentais e oferece recursos visuais para o entendimento de fenômenos complexos. Além disso, a familiarização com ferramentas como o COMSOL prepara profissionais para atuar com maior domínio técnico em ambientes industriais e acadêmicos.

A metodologia envolve a criação da geometria tridimensional do cilindro, definição das propriedades da espécie (como coeficiente de difusão), aplicação das condições de contorno, escolha de malha adequada e resolução do problema em



regime estacionário. Esta pesquisa visa demonstrar a importância da modelagem computacional como ferramenta de apoio à análise de fenômenos físico-químicos, contribuindo para o desenvolvimento de projetos em engenharia, sem pretender apresentar conclusões definitivas ou soluções específicas.

2. DESENVOLVIMENTO

2.1. REFERENCIAL TEÓRICO

Para Incropera *et al.* (2003), a transferência de massa é um fenômeno físico fundamental presente em diversos sistemas naturais e industriais, sendo caracterizada pelo transporte de uma substância de uma região de maior concentração para outra de menor concentração. No contexto deste estudo, a análise se baseia na difusão molecular em um corpo cilíndrico, processo descrito matematicamente pelas Leis de Fick.

Segundo Organista (2024), a Primeira Lei de Fick estabelece que o fluxo difusivo é proporcional ao gradiente de concentração. Essa relação, apresentada por Adolf Fick em 1855, é formulada por:

$$J = -D \frac{dC}{dx}$$

Em que J é o fluxo de massa, D o coeficiente de difusão e C a concentração da espécie. A Segunda Lei de Fick, por sua vez, descreve como a concentração varia no tempo e no espaço, sendo expressa por uma equação diferencial parcial de segunda ordem (Gama, 2022):

$$\nabla \cdot (-D \nabla C) = 0$$

Onde D é o coeficiente de difusão e C é a concentração da espécie.

De acordo com Çengel (2009), os mecanismos de transporte de massa podem ser classificados em difusão molecular, difusão turbulenta e convecção. Neste estudo, considera-se exclusivamente a difusão molecular, que predomina em meios estáticos ou com baixas velocidades de escoamento. Essa escolha justifica-se pela ausência de forças externas ou gradientes térmicos significativos no sistema analisado.

Conforme Ibiapina (2019), o transporte difusivo é dominante em sistemas estagnados ou onde há barreiras impermeáveis ao fluxo, como ocorre neste modelo.



A análise da difusão sob diferentes geometrias e condições de contorno é essencial para o projeto de dispositivos como reatores, biorreatores e sensores.

O coeficiente de difusão D é influenciado por fatores como temperatura, viscosidade do meio, diâmetro molecular e massa molar do soluto. Valores típicos podem ser encontrados em bancos de dados experimentais e literatura técnica (CREMASCO, 2015).

A modelagem matemática da difusão em coordenadas cilíndricas é especialmente importante para representar geometrias reais, como tubos, vasos e fibras. Em situações em que a complexidade geométrica impede soluções analíticas, utilizam-se ferramentas computacionais como o COMSOL Multiphysics®, que emprega o Método dos Elementos Finitos (MEF) para resolver equações diferenciais parciais (MARQUES, 2015).

Segundo Silvano e Costa (2012), o COMSOL Multiphysics® é amplamente utilizado na simulação de fenômenos físico-químicos em geometrias complexas. Sua interface modular permite incluir múltiplos fenômenos acoplados (como calor, massa e fluidos) e oferece recursos didáticos relevantes para o ensino de engenharia. A flexibilidade do ambiente de simulação facilita a visualização tridimensional da difusão e a interpretação dos resultados.

Adicionalmente, destaca-se a importância da visualização computacional na aprendizagem dos fenômenos de transporte. A simulação auxilia na compreensão da evolução espacial e temporal das variáveis envolvidas, promovendo o raciocínio crítico e a análise multidisciplinar (MARQUES, 2015).

Diante desse embasamento teórico, a simulação da difusão em domínios cilíndricos mostra-se não apenas viável, mas essencial para compreender e prever o comportamento de sistemas reais na engenharia.

2.1.1. Características do meio de transporte

Segundo Cremasco (2019), o meio de transporte, no qual ocorre o processo de difusão, exerce papel fundamental na dinâmica do transporte de massa. No caso do transporte de espécies diluídas em líquidos, como no presente estudo, diversas



propriedades físicas e químicas do meio influenciam diretamente a taxa e o perfil de difusão.

Para Morais (2021), uma das características mais importantes é o coeficiente de difusão (D), que quantifica a facilidade com que as moléculas da espécie transportada se movimentam através do fluido. Esse coeficiente depende de fatores como a temperatura, a viscosidade do líquido e o tamanho das moléculas da substância difusa. Segundo a Lei de Stokes-Einstein, o coeficiente de difusão é inversamente proporcional à viscosidade do meio e ao raio da molécula, e diretamente proporcional à temperatura absoluta, o que indica que fluidos mais viscosos dificultam a movimentação molecular, reduzindo a difusão.

Além disso, conforme Araujo (2017), as condições do meio, como a temperatura, influenciam significativamente o comportamento do transporte. Com o aumento da temperatura, ocorre maior agitação térmica das moléculas, promovendo um aumento na mobilidade molecular e, conseqüentemente, um coeficiente de difusão maior. Por outro lado, temperaturas muito baixas podem reduzir o transporte devido à diminuição da energia cinética das moléculas.

Outros fatores que podem afetar o transporte de massa incluem a presença de impurezas ou partículas suspensas no líquido, que podem criar barreiras físicas ou alterar as propriedades do fluido, e o gradiente de concentração imposto, que é o principal agente motriz do processo difusivo (MOREIRA, 2014).

Entender e definir corretamente essas propriedades do meio é fundamental para o desenvolvimento de modelos numéricos confiáveis, uma vez que o sucesso da simulação depende diretamente da fidelidade dos parâmetros utilizados, garantindo que os resultados reflitam adequadamente o comportamento físico do sistema real.

2.2. METODOLOGIA

Este trabalho segue uma abordagem metodológica de natureza quantitativa e explicativa. A natureza quantitativa está evidenciada pelo uso de simulações computacionais realizadas no software, ferramenta que permite a resolução de equações diferenciais parciais associadas ao transporte de massa em meios contínuos. O modelo físico adotado foi um cilindro tridimensional, onde se considerou



a difusão de uma espécie química, com uma de suas superfícies submetida a uma condição de concentração fixa, enquanto as demais apresentaram condições de isolamento (sem fluxo difusivo).

A abordagem explicativa se justifica pela intenção de compreender como as propriedades físicas do meio e as condições de contorno influenciam a distribuição de concentração ao longo do domínio cilíndrico. O estudo investigou a formação de gradientes de concentração e os perfis de difusão estabelecidos ao longo do tempo até o alcance do estado estacionário.

De acordo com Gil (2008), a pesquisa explicativa busca identificar os fatores que contribuem para a ocorrência de fenômenos específicos, enquanto a pesquisa quantitativa se caracteriza pela análise objetiva de dados numéricos. Assim, a metodologia aqui adotada combina essas abordagens ao simular o transporte difusivo em um sistema geométrico definido, permitindo a visualização e análise precisa da dinâmica da transferência de massa.

2.2.1. Materiais definidos para a simulação

Para a modelagem foi utilizado o software COMSOL Multiphysics®, que permite a resolução de fenômenos físicos complexos, como o transporte de massa por difusão. O domínio geométrico adotado foi um cilindro tridimensional com 10 cm de altura e 5 cm de raio. O material definido no ambiente de simulação foi “*water, liquid*” (água líquida), selecionado a partir da biblioteca de materiais do COMSOL, o que permitiu utilizar automaticamente suas propriedades físico-químicas padrão, como densidade, viscosidade e coeficiente de difusão.

A escolha da água líquida como meio difusivo deve-se à sua ampla aplicabilidade em processos de transporte de massa, especialmente em contextos ambientais, biológicos e industriais. O coeficiente de difusão da espécie química dissolvida foi mantido em $1 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$, valor típico para moléculas diluídas em água.

2.2.2. Procedimentos no COMSOL Multiphysics®

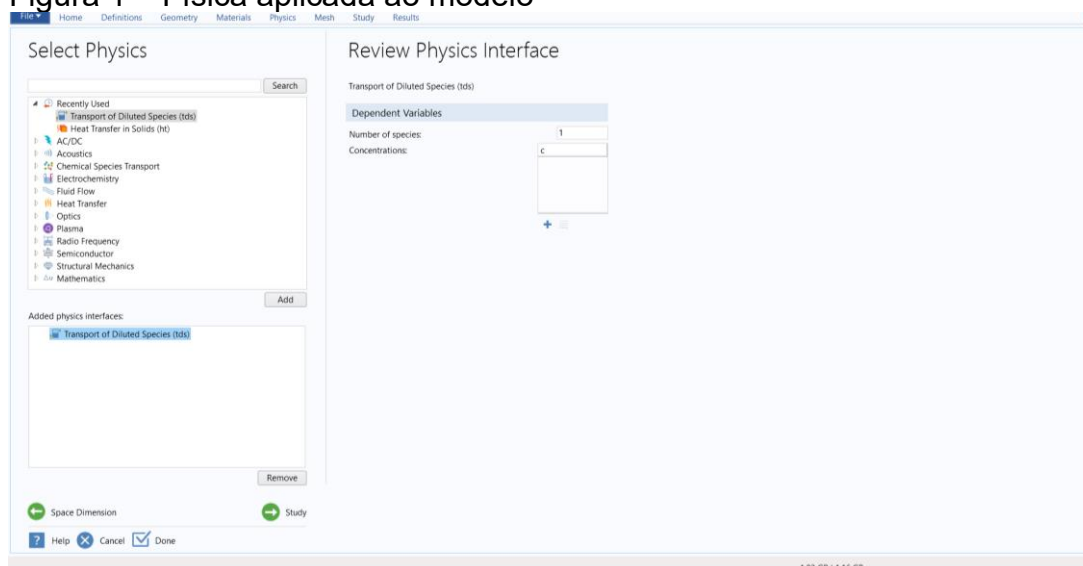
Para iniciar uma nova modelagem no COMSOL Multiphysics, deve-se abrir o software e selecionar a opção “*Model Wizard*” na tela inicial. Em seguida, será exibida



a interface para a definição da dimensão espacial da simulação. Neste estudo, optou-se pela modelagem em três dimensões (3D), uma vez que a geometria do corpo físico analisado apresenta variação em todas as direções espaciais.

Na etapa seguinte, realiza-se a seleção da física a ser aplicada ao modelo, como ilustrada na Figura 1. Para este caso, escolheu-se o módulo “*Transport of Diluted Species (tds)*”, que é adequado para a análise da transferência de massa por difusão de espécies químicas diluídas em um solvente, como ocorre na simulação da propagação de concentração em meios líquidos. Posteriormente, define-se o tipo de estudo a ser executado, o COMSOL oferece as opções de análise em regime estacionário (Stationary) ou transitório (*Time Dependent*).

Figura 1 – Física aplicada ao modelo



Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

Neste trabalho, adotou-se o regime estacionário, no qual se considera que a distribuição de concentração no interior do meio não varia com o tempo, ou seja, o sistema atingiu um equilíbrio de difusão, com fluxo constante e sem acúmulo de massa no domínio.

Com essas configurações iniciais definidas, prossegue-se com a construção da geometria e a atribuição dos parâmetros físicos e condições de contorno necessários para a simulação.

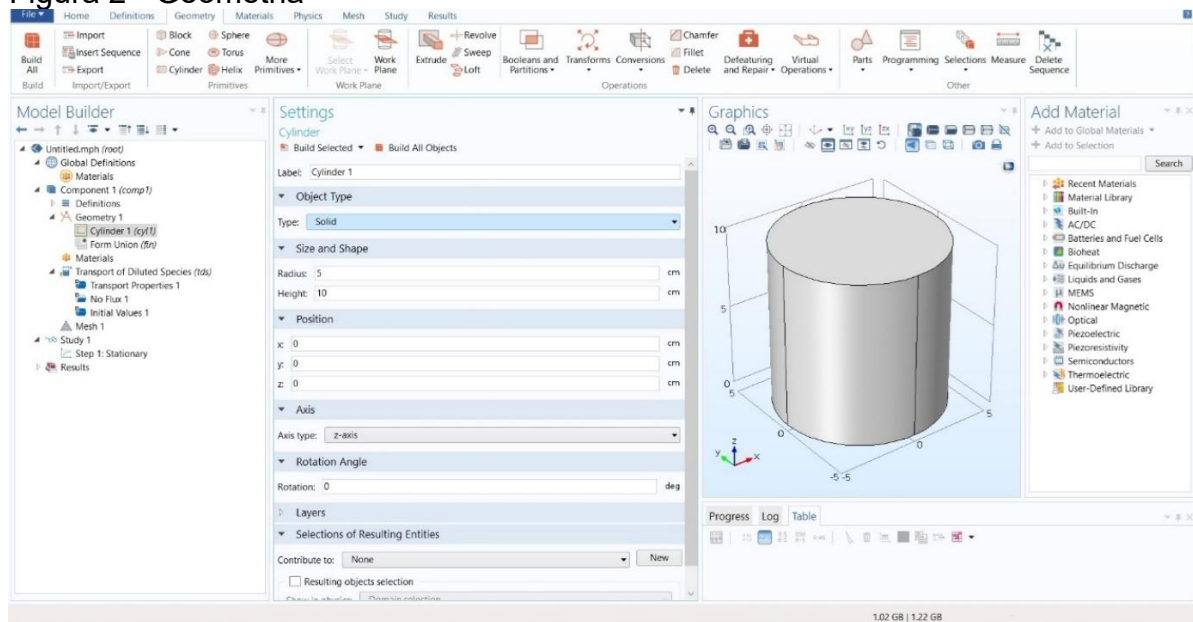
2.2.3. Geometria



Na inicialização do *software*, o usuário pode definir o sistema de unidades a ser utilizado durante a modelagem. Para este estudo, optou-se pelo uso de centímetros (cm) como unidade de medida, a fim de facilitar a inserção e interpretação das dimensões geométricas.

A construção da geometria é realizada por meio da aba “*Geometry*”, onde se seleciona a opção “*Cylinder*” para representar o corpo sólido a ser simulado. Ao inserir este componente, a interface permite a definição das dimensões do cilindro, especificando os valores de altura e raio. A Figura 2 ilustra a etapa de definição geométrica com os respectivos parâmetros dimensionais aplicados.

Figura 2 - Geometria



Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

Para finalizar a definição da geometria e visualizar o modelo tridimensional, é necessário clicar na opção “*Build All Objects*”. Essa ação gera a forma do cilindro com as dimensões previamente especificadas, permitindo a visualização completa da estrutura no ambiente de modelagem.

2.2.4. Material

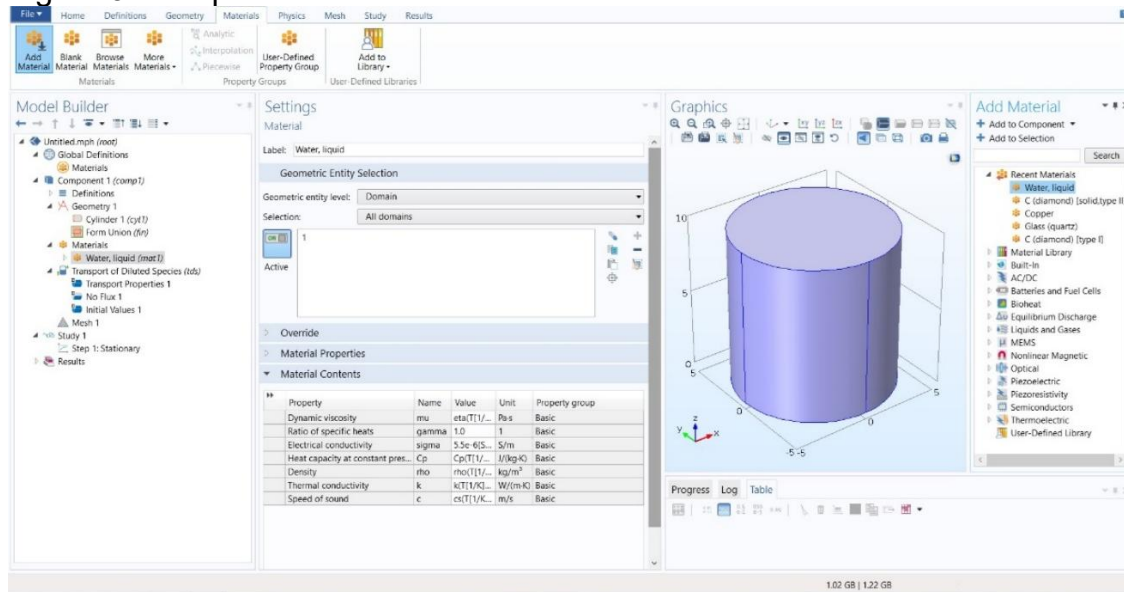
A definição do material utilizado na simulação é realizada por meio da aba “*Materials*”. Para isso, deve-se selecionar a opção “*Add Material*” e, em seguida,



utilizar o campo de busca para localizar o material desejado. Neste trabalho, foi empregado o uso da água em sua forma líquida (“*water, liquid*”).

Após a seleção, suas propriedades, como densidade, viscosidade são automaticamente atribuídas pelo software, conforme os valores disponíveis em sua base de dados, como observado na Figura 3.

Figura 3 – Propriedades



Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

A definição do material é essencial na simulação, pois assegura que as propriedades físico-químicas do meio sejam corretamente representadas. Essas propriedades são fundamentais para representar com realismo o fenômeno de difusão. Conforme destacado por Incropera *et al.* (2007), a definição precisa dos materiais é indispensável para prever corretamente os fenômenos de transporte em simulações computacionais.

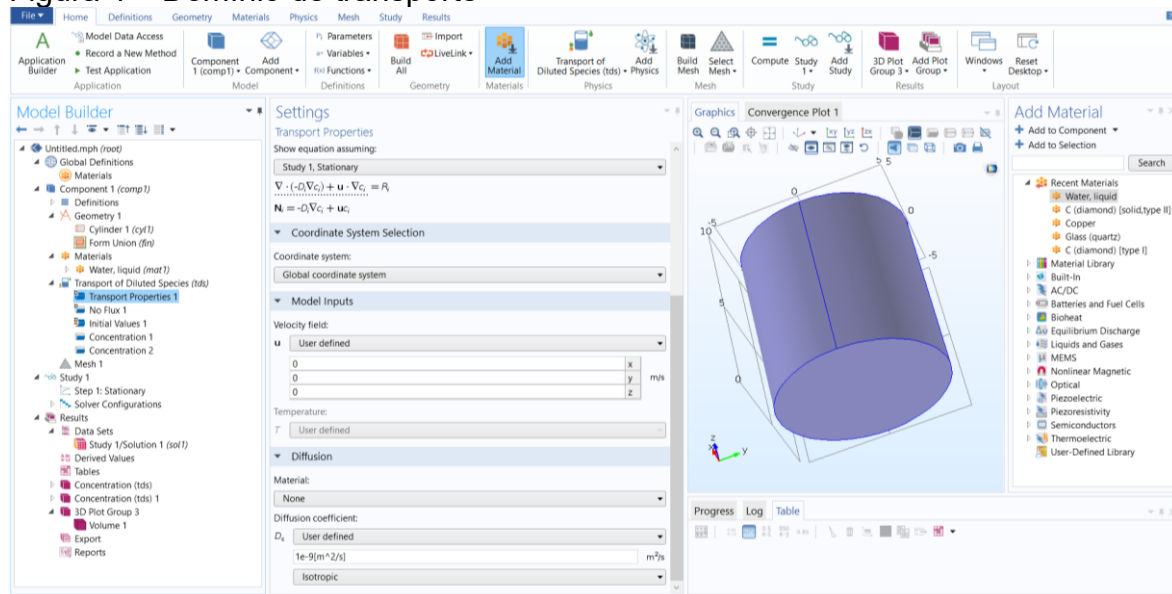
2.2.5. Domínio de transporte

Após a construção da geometria cilíndrica e a atribuição do material, é necessário definir os parâmetros de transporte de massa no interior do domínio. Para isso, acessa-se o módulo “*Transport of Diluted Species (tds)*” e, em seguida, clica-se em “*Transport Properties*”, que é a interface onde se especificam as propriedades físicas da difusão da espécie diluída.



No campo “*Diffusion coefficient*”, conforme mostra a Figura 4, foi inserido o valor $1e-9$ [m^2/s], que representa um valor típico para o coeficiente de difusão de pequenas moléculas dissolvidas em água, segundo dados da literatura (INCROPERA *et al.*, 2007). Esse valor caracteriza a taxa com que a espécie se espalha pelo meio líquido, sendo essencial para que a equação de difusão de Fick seja corretamente resolvida durante a simulação.

Figura 4 – Domínio de transporte



Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

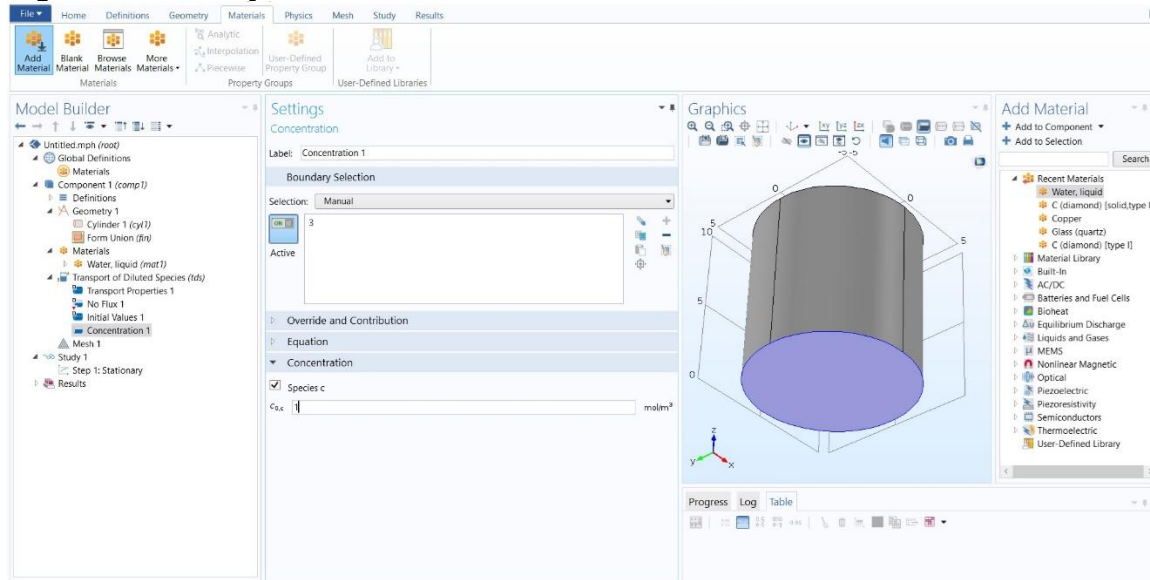
A entrada correta do coeficiente garante que o modelo computacional reflita adequadamente o fenômeno físico estudado, possibilitando uma análise precisa da distribuição de concentração ao longo do tempo e do espaço dentro do domínio cilíndrico (MOREIRA, 2014).

2.2.6. Condições de contorno

Conforme definido nas condições de contorno da simulação, uma das faces do cilindro foi mantida com uma concentração constante de $1 \text{ mol}/m^3$, representando uma fonte contínua de espécie diluída. Essa condição foi aplicada por meio da opção “*Concentration*”, acessada clicando com o botão direito sobre o módulo “*Transport of Diluted Species (tds)*”. Após selecionar essa opção, definiu-se a superfície plana superior do cilindro, sendo a face de número 3, como a região onde a concentração é mantida constante, assim como ilustrado na Figura 5.



Figura 5 – Condições de contorno



Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

As demais superfícies do cilindro foram configuradas com a condição “*Concentration*”, definindo o valor de 0 mol/m^3 indicando que não há fluxo de massa através dessas fronteiras. Essa configuração representa um sistema fechado lateralmente, no qual a difusão da espécie ocorre apenas no interior do domínio, sem perdas pelas superfícies laterais ou pela base. Essas condições asseguram uma análise do comportamento da difusão exclusivamente a partir da superfície com concentração imposta, permitindo observar o gradiente de concentração ao longo do volume do cilindro.

2.2.7. Malha (*Mesh*)

Segundo Miranda (2017), a malha consiste na subdivisão da geometria do modelo em pequenos elementos finitos, sobre os quais as equações diferenciais parciais que regem o fenômeno físico são resolvidas numericamente. A precisão dos resultados obtidos na simulação depende diretamente da qualidade e da densidade dessa malha.

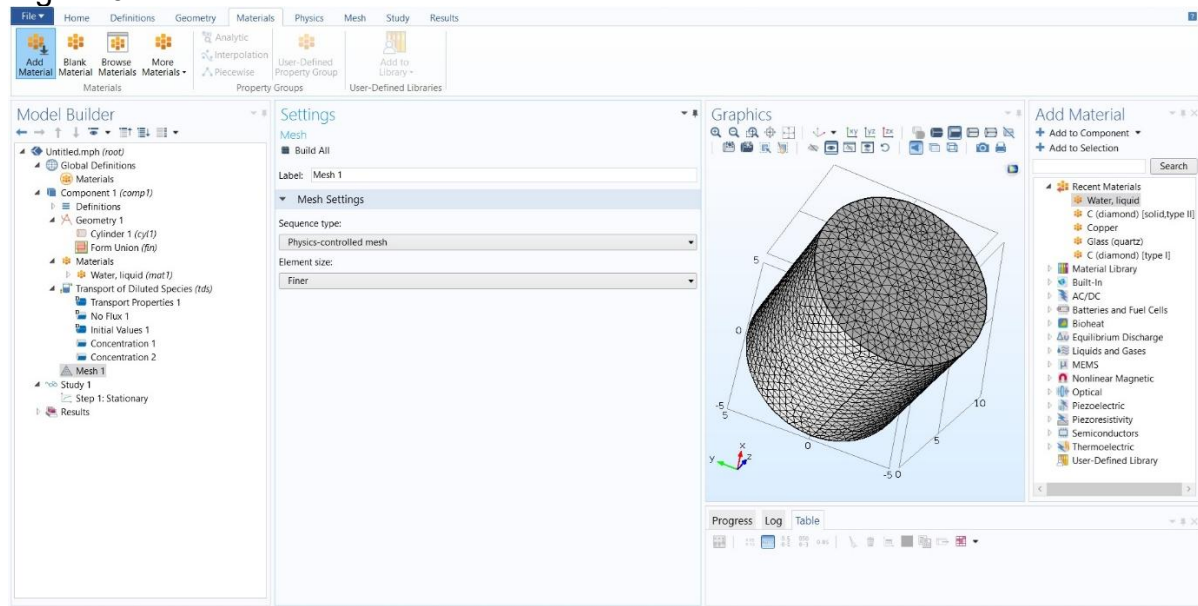
A geração da malha no COMSOL Multiphysics é realizada por meio da aba “*Mesh*”, onde o usuário pode optar por uma malha automática controlada pela física do problema ou definir diferentes níveis de refinamento da malha, como fina (*finer*),



extra-fina (*extra fine*) ou grossa (*coarse*), que podem ser selecionados manualmente conforme a complexidade da geometria ou a sensibilidade dos resultados esperados.

Para gerar a malha basta selecionar a que se deseja e clicar em “*Build All*”, o que resulta na criação de uma malha com nível de refinamento escolhido, como observado na Figura 6.

Figura 6 – Malha



Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

Para este trabalho foi utilizado a opção de “*finer*”, já que se deseja um resultado mais detalhado.

2.2.8. Estudo (*Study*)

A etapa seguinte consiste na execução da simulação. Para isso, deve-se acessar a aba “*Study*”, selecionar “*Step 1: Stationary*” e, em seguida, clicar em “*Compute*”.

Essa ação inicia o processo de resolução numérica das equações de transferência de massa no regime estacionário, com base nas condições de contorno, materiais e malha previamente definidos.

2.2.9. Resultados (*Results*)

Após a execução da simulação, a visualização da distribuição de concentração é realizada por meio da aba “*Results*”. Para analisar a variação da concentração ao



longo da superfície externa do cilindro, deve-se acessar “*Results*” e selecionar a opção “*Concentration (tds) 1*”. Essa visualização permite observar o gradiente de concentração gerado pela difusão da espécie diluída, de acordo com as condições de contorno previamente definidas, possibilitando a análise espacial do transporte de massa no domínio cilíndrico.

Para uma análise mais detalhada do comportamento de difusão no interior do cilindro, é possível adicionar cortes internos ao modelo. Para isso, deve-se acessar a aba “*Results*”, clicar em “*Concentration (tds)*”, o usuário pode definir planos de corte ao longo dos eixos x , y ou z , permitindo a visualização da distribuição interna da concentração da espécie diluída. Essa funcionalidade é particularmente útil para observar como a substância se difunde no volume do material em regime estacionário, evidenciando gradientes de concentração no domínio tridimensional.

2.3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados das simulações são apresentados por meio de figuras que ilustram a distribuição espacial da concentração da espécie diluída ao longo do cilindro. A condição simulada evidenciou o comportamento esperado do processo de difusão, revelando como a substância se propaga no meio líquido de forma gradual, influenciada pelas condições de contorno aplicadas.

Para essa análise, o COMSOL Multiphysics® disponibiliza recursos gráficos avançados que permitem visualizar, de maneira qualitativa e quantitativa, o transporte de massa no interior do domínio. A representação tridimensional obtida fornece uma compreensão clara do gradiente de concentração gerado, destacando as regiões com maior acúmulo da espécie e aquelas com menor concentração.

É importante salientar que, os resultados obtidos são aplicáveis em diversas áreas, como na otimização de processos industriais de mistura e transporte de solutos, no controle ambiental para dispersão de poluentes em corpos d’água, e em processos biomédicos que envolvem transporte de substâncias em fluidos corporais. A compreensão detalhada do gradiente de concentração possibilita o desenvolvimento de estratégias eficientes para controle e monitoramento desses processos.



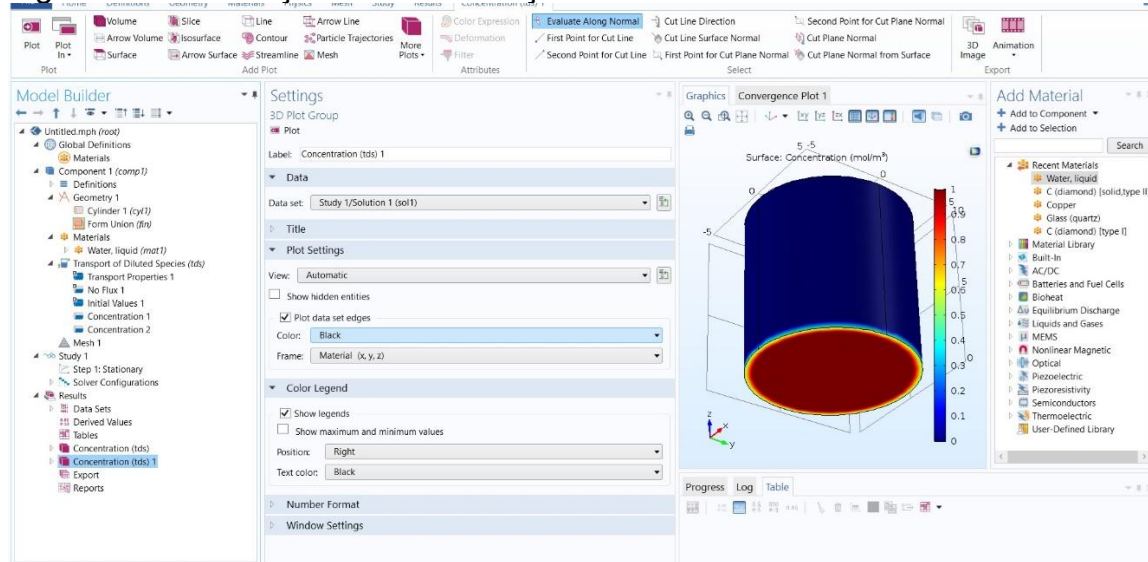
EPIC 2025



XII ENCONTRO DE PESQUISA, XVI ENCONTRO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E II ENCONTRO DE ENSINO E EXTENSÃO UNIVERSITÁRIA

A seguir, apresenta-se a Figura 7 gerada no ambiente “Results”, que ilustra esses padrões de distribuição no modelo cilíndrico.

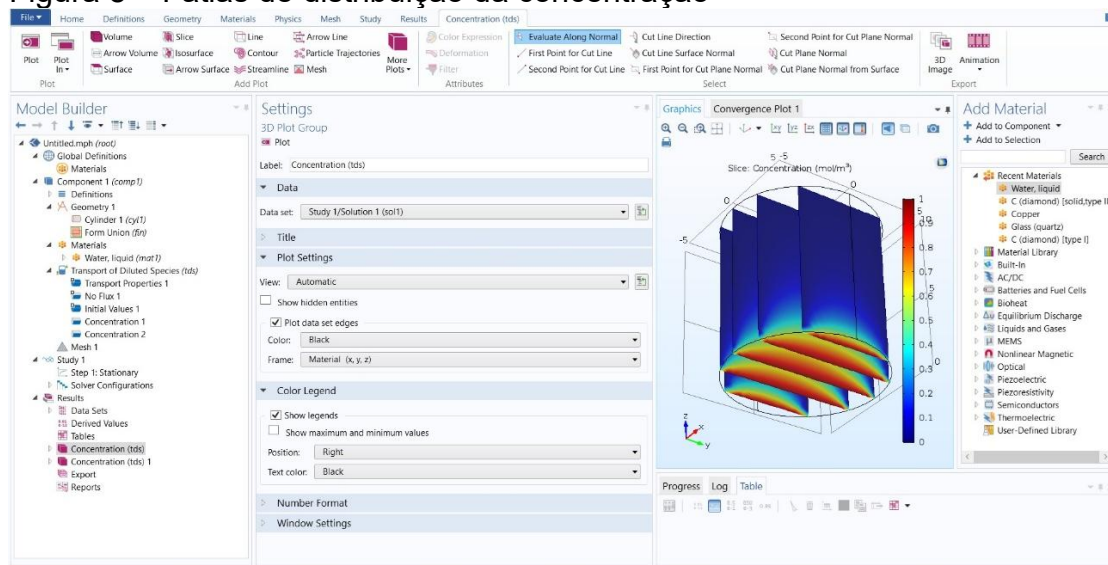
Figura 7 – Distribuição da concentração



Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

Na Figura 8 consegue-se observar que a face inferior do cilindro, onde foi aplicada a condição de concentração constante, apresenta o maior valor de concentração, indicado pela coloração vermelha intensa. À medida que nos afastamos dessa superfície, ocorre uma redução progressiva da concentração, representada pela transição gradual das cores do espectro térmico, até atingir as regiões superiores, onde os valores são significativamente menores.

Figura 8 – Fatias de distribuição da concentração



Fonte: Elaborado pelos autores (2025).



Esse gradiente é resultado direto do processo de difusão, conduzido pela diferença de concentração imposta nas condições de contorno. A direção do fluxo difusivo segue do meio mais concentrado para o menos concentrado, confirmando os princípios da Lei de Fick, que rege o transporte de espécies diluídas em meios contínuos.

A simulação mostra ainda que o perfil de distribuição é simétrico, o que é coerente com a geometria cilíndrica do domínio e a aplicação uniforme das condições iniciais. Isso indica que não houve perturbações externas nem variações nas propriedades físicas do meio que comprometessem a homogeneidade da difusão ao longo do volume.

Esses resultados reforçam a importância da correta definição dos parâmetros físicos, como o coeficiente de difusão, e das condições de contorno no modelo computacional, uma vez que determinam a acurácia e a representatividade da simulação frente a um problema físico real.

2.2.9. Limitações do modelo

Embora a simulação tenha fornecido resultados consistentes e coerentes com os princípios físicos da difusão, algumas limitações inerentes ao modelo numérico devem ser destacadas.

Primeiramente, o modelo considera o transporte de uma única espécie diluída em um meio homogêneo e isotrópico, sem levar em conta possíveis reações químicas, mudanças de fase ou interações complexas entre múltiplos componentes que podem ocorrer em sistemas reais.

Além disso, a simulação foi realizada em regime estacionário, desconsiderando os efeitos transientes que podem ser importantes em processos onde as concentrações variam significativamente ao longo do tempo antes do equilíbrio ser atingido.

Outro ponto relevante é a idealização das condições de contorno, que foram impostas como perfeitamente definidas e estáveis. Na prática, essas condições podem sofrer flutuações devido a variações ambientais, imperfeições na superfície do cilindro ou outros fatores externos.



EPIC 2025

XII ENCONTRO DE PESQUISA, XVI ENCONTRO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E
II ENCONTRO DE ENSINO E EXTENSÃO UNIVERSITÁRIA



Por fim, o modelo desconsidera a influência de efeitos convectivos ou turbulentos que podem ocorrer em sistemas onde há movimentação do fluido, restringindo a análise ao transporte difusivo puro. Essa simplificação limita a aplicação direta dos resultados para situações mais complexas, onde a convecção desempenha papel importante.

Essas limitações indicam a necessidade de complementar as simulações com estudos experimentais e modelos mais complexos para garantir uma representação mais realista dos fenômenos em sistemas industriais e ambientais.

3. INDICAÇÃO DAS FONTES CONSULTADAS

Neste trabalho, adotou-se o sistema de chamada autor-data, conforme as normas da ABNT (NBR 10520). As citações no corpo do texto indicam o sobrenome do autor seguido do ano da publicação da obra. Ao final do trabalho, as referências são apresentadas em ordem alfabética, conforme a NBR 6023.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A simulação computacional realizada com o auxílio do COMSOL Multiphysics® permitiu analisar o comportamento do transporte de uma espécie diluída no interior de um cilindro preenchido com água líquida, sob regime estacionário. Por meio do módulo “*Transport of Diluted Species*”, foi possível observar a formação de um gradiente de concentração que se estabelece de acordo com as condições de contorno impostas.

Os resultados evidenciaram a influência da geometria e das propriedades físicas do meio sobre a distribuição da espécie no domínio, mostrando regiões com maior e menor concentração de forma clara e precisa. A utilização de ferramentas gráficas, como cortes e visualizações tridimensionais, facilitou a interpretação qualitativa e quantitativa dos dados simulados.

Conclui-se que a simulação numérica é uma ferramenta eficaz para o estudo de fenômenos de difusão em meios líquidos, permitindo prever o comportamento do sistema antes mesmo da realização de experimentos físicos. Além disso, reforça-se a importância da correta definição das propriedades do material e das condições de contorno para garantir a confiabilidade dos resultados obtidos.



Este tipo de abordagem contribui significativamente para a compreensão de processos de transporte de massa em diferentes contextos, como em sistemas industriais, ambientais e biomédicos, demonstrando a versatilidade e a aplicabilidade do método numérico na engenharia e nas ciências aplicadas.

REFERÊNCIAS

ARAUJO, W. D. et al. **Modelagem matemática da secagem dos frutos de amendoim em camada delgada**. Revista Ciência Agronômica, v. 48, p. 448-457, 2017. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rca/a/79SMDYrqZKTW7rYfYx5p5GN/>. Acesso em: 15 mai. 2025.

BIRD, R. B.; STEWART, W. E.; LIGHTFOOT, E. N. **Transport Phenomena**. 2. ed. John Wiley & Sons, 2002.

ÇENGEL, Y. A. **Transferência de Calor e Massa**. São Paulo: McGraw-Hill, 2009, 928 p.

CREMASCO, M. A. **Difusão mássica**. Editora Blucher, 2019.

CREMASCO, M. A. **Fundamentos de transferência de massa**. Editora Blucher, 3. ed. 2015.

GAMA, R. P. S. et al. **A segunda lei de Fick com coeficiente de difusão dependente da concentração**. 2022. Disponível em: <https://www.bdtd.uerj.br:8443/bitstream/1/17744/2/Disserta%c3%a7%c3%a3o%20-%20Rog%c3%a9rio%20Pazetto%20Saldanha%20da%20Gama%20-%202022%20-%20Completo.pdf>. Acesso em: 14 mai. 2025.

IBIAPINA, A. et al. **Modelagem do fenômeno de transferência de massa na hidratação do cereal matinal**. Desaf UFT, p. 48-53, 2019. Disponível em: <https://core.ac.uk/download/pdf/267891785.pdf>. Acesso em: 14 mai. 2025.

INCROPERA, F. P. et al. **Transferência de calor e de Massa**. Editora LTC. 6. ed. 2003.

INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P.; BERGMAN, T. L.; LAVINE, A. S. **Fundamentals of Heat and Mass Transfer**. 6. ed. Hoboken: Wiley, 2007.

MARQUES, G. S. et al. **Utilização do programa computacional comsol multiphysics para obtenção de perfil de velocidade em regime de fluxo com deslizamento**. Blucher Chemical Engineering Proceedings, v. 1, n. 2, p. 5514-5520, 2015. Disponível em: <https://pdfs.semanticscholar.org/4acc/d7d79fb9cd3c9dc950764e8452aa627cc89a.pdf>. Acesso em: 14 mai. 2025.



MIRANDA, H. D. T. **Modelagem 2.5D do método eletromagnético marinho de fonte controlada utilizando COMSOL Multiphysics®**. 2017. 50 f. Trabalho de Curso (Bacharelado em Geofísica) - Faculdade de Geofísica, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 2017. Disponível em: <<http://bdm.ufpa.br/jspui/handle/prefix/900>>. Acesso em: 14 mai. 2025.

MORAIS, A. L. S.; PEREIRA, R. S. F.; OLIVEIRA, T. **Transferência de massa por meio de difusão em corpos porosos: aplicações industriais**. *Journal of Exact Sciences*, v. 31, n. 1, 2021. Disponível em: https://www.mastereditora.com.br/periodico/20211013_095620.pdf. Acesso em: 15 mai. 2025.

MOREIRA, M. A. **Modelos científicos, modelos mentais, modelagem computacional e modelagem matemática: aspectos epistemológicos e implicações para o ensino**. Revista brasileira de ensino de ciência e tecnologia. Ponta Grossa. Vol. 7, no. 2 (maio/ago. 2014), p. 1-20, 2014.

MOREIRA, C. **Difusão Facilitada**. Revista de Ciência Elementar, v. 2, n. 2, 2014. Disponível em: https://web.archive.org/web/20220301082119id_/https://rce.casadasciencias.org/rce/app/static/docs/artigos/2014-143.pdf. Acesso em: 15 mai. 2025.

ORGANISTA, J. **Modelagem e simulações numéricas das equações reativa-convectiva-difusiva com retardo para um sistema predador-presa**. Universidade Estadual de Londrina, 2024. Disponível em: https://bdtd.ibict.br/vufind/Record/UEL_0a82c8bc0c0efacd95d2c1a25b14596c. Acesso em: 14 mai. 2025.

SILVANO, G. L.; COSTA, K. Q. **Simulação no COMSOL de Diferentes Configurações de Nanoantenas Cilíndricas**. Anais do XXX Simpósio Brasileiro de Telecomunicações-SBrT, v. 12, 2012. Disponível em: https://sbrt.org.br/sbirt2012/publicacoes/97575_1.pdf. Acesso em: 14 mai. 2025.

CONTRIBUIÇÃO DOS AUTORES

Nome completo: Aline Sampaio Corrêa; Erickson Alex de Lima; Marco Antonio Cardoso de Souza.

Item de colaboração	Igual aos demais	Menor que os demais	Maior que os demais	Não participou deste item
Contextualização do trabalho	X			
Organização dos dados	X			
Análise formal dos dados	X			
Análise formal do texto	X			
Financiamento para desenvolvimento do trabalho	X			
Investigação e estudo	X			
Metodologia	X			



EPIC 2025



XII ENCONTRO DE PESQUISA, XVI ENCONTRO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E
II ENCONTRO DE ENSINO E EXTENSÃO UNIVERSITÁRIA

Administração de cronograma	X			
Administração de recursos	X			
Gestão do projeto	X			
Validação do projeto	X			
Marketing	X			
Escrita do trabalho	X			
Participação em reuniões	X			
Revisão do trabalho	X			
Participação na construção do protótipo	X			