

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA

ISABELA BANDEIRA DA MOTA CARVALHO

UMA COMPREENSÃO DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM REATORES DE LEITO
FIXO

Uberlândia

2026

ISABELA BANDEIRA DA MOTA CARVALHO

UMA COMPREENSÃO DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM REATORES DE LEITO
FIXO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia Química.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Yanne Novais Kyriakidis

Uberlândia

2026

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA**

Faculdade de Engenharia Química

Av. João Naves de Ávila, 2121, Bloco 1K - Bairro Santa Mônica, Uberlândia-MG, CEP 38400-902

Telefone: (34) 3239-4285 - secdireq@feq.ufu.br - www.feq.ufu.br

**ATA DE DEFESA - GRADUAÇÃO**

Curso de Graduação em:	Engenharia Química				
Defesa de:	Trabalho de Conclusão de Curso (Turma C33 - 2025/2)				
Data:	16/03/2026	Hora de início:	14h00min	Hora de encerramento:	15h00min
Matrícula do Discente:	12111EQU063				
Nome do Discente:	Isabela Bandeira da Mota Carvalho				
Título do Trabalho:	Uma compreensão da transferência de calor em reatores de leito fixo				

A defesa do Trabalho de Conclusão de Curso ocorreu na **plataforma Google Meet** e a Banca Examinadora assim composta: **Prof. Danylo de Oliveira Silva - FEQUI/UFU**, **Prof. Ricardo Amâncio Malagoni - FEQUI/UFU** e **Prof.^a Yanne Novais Kyriakidis - FEQUI/UFU**, orientadora da candidata.

Iniciando os trabalhos, a presidente da mesa, **Prof.^a Yanne Novais Kyriakidis - FEQUI/UFU**, apresentou a Comissão Examinadora e a candidata e concedeu à discente a palavra, para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação da discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do curso.

A seguir o senhor(a) presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos(às) examinadores(as), que passaram a arguir o(a) candidato(a). Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o(a) candidato(a):

Aprovada.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Yanne Novais Kyriakidis, Professor(a) do Magistério Superior**, em 16/03/2026, às 15:10, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Danylo de Oliveira Silva, Professor(a) do Magistério Superior**, em 16/03/2026, às 15:10, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Ricardo Amâncio Malagoni, Professor(a) do Magistério Superior**, em 16/03/2026, às 15:10, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **7144673** e o código CRC **D95A17CA**.

AGRADECIMENTOS

À minha família, à minha mãe, Dulcelena, pelo apoio constante e por nunca medir esforços para que eu pudesse alcançar meus objetivos. À minha irmã, Isadora, pelo incentivo e companheirismo em todos os momentos.

À minha orientadora, Yanne, pela dedicação, paciência e orientação ao longo do desenvolvimento deste trabalho. Agradeço pelas valiosas contribuições, pelo apoio acadêmico e pela confiança depositada, fundamentais para a concretização desta pesquisa e para o meu crescimento acadêmico.

Aos professores do curso, pelos ensinamentos transmitidos ao longo da graduação, que contribuíram significativamente para minha formação acadêmica, profissional e pessoal.

Aos meus amigos, que estiveram presentes durante essa caminhada, oferecendo apoio, companheirismo e momentos de descontração que tornaram essa jornada mais leve e significativa.

À Universidade Federal de Uberlândia, pela oportunidade de uma educação pública de qualidade, pela infraestrutura oferecida e pelo ambiente acadêmico que possibilitou meu desenvolvimento intelectual e profissional.

Por fim, agradeço a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a conclusão desta etapa tão importante da minha vida acadêmica.

RESUMO

A transferência de calor em leitos fixos constitui um dos temas centrais da Engenharia Química, especialmente em processos que envolvem reatores catalíticos e microreatores. Esses sistemas são caracterizados pela presença de partículas sólidas dispostas de forma estacionária, formando um meio poroso através do qual um fluido pode escoar. No que tange ao fenômeno térmico em leitos fixos, sua complexidade decorre da interação simultânea entre condução no sólido e condução e convecção no fluido. Nesse sentido, este trabalho apresentou uma revisão bibliográfica de estudos que investigaram a transferência de calor em reatores de leito fixo por meio de três abordagens complementares: macroscópica, numérica detalhada e do método da sonda térmica. A partir do estudo de Jorge et al. (1999), identificou-se que a resistência térmica da parede é desprezível frente às resistências interna e externa, variando conforme a temperatura. Em contrapartida, a simulação numérica de Das et al. (2017) demonstrou que modelos homogêneos não capturam adequadamente as variações locais de escoamento e temperatura, especialmente nas regiões próximas às paredes. Por fim, o método da sonda térmica de Ge et al. (2020) apresentou-se como uma alternativa prática e de baixo custo para determinar a condutividade térmica efetiva, com precisão superior a 97% após calibração. Conclui-se que a integração dessas metodologias é essencial para a otimização de sistemas porosos e o projeto eficiente de reatores catalíticos.

Palavras-chave: Modelagem de transporte térmico; Simulação numérica; Meios porosos; Condutividade térmica efetiva.

ABSTRACT

Heat transfer in fixed beds constitutes one of the central topics in Chemical Engineering, especially in processes involving catalytic reactors and microreactors. These systems are characterized by the presence of stationary solid particles arranged to form a porous medium through which a fluid can flow. With regard to the thermal phenomenon in fixed beds, its complexity arises from the simultaneous interaction between conduction in the solid and conduction and convection in the fluid. In this context, this work presented a literature review of studies that investigate heat transfer in fixed-bed reactors through three complementary approaches: macroscopic experimental methods, fully resolved numerical simulations, and the thermal probe method. Based on the study by Jorge et al. (1999), it was identified that the wall thermal resistance is negligible compared to the internal and external resistances, varying with temperature. In contrast, the numerical simulations performed by Das et al. (2017) demonstrated that homogeneous models do not adequately capture local variations in flow and temperature, particularly in regions close to the walls. Finally, the thermal probe method proposed by Ge et al. (2020) proved to be a practical and low-cost alternative for determining the effective thermal conductivity, achieving an accuracy greater than 97% after calibration. It is concluded that the integration of these methodologies is essential for the optimization of porous systems and the efficient design of catalytic reactors.

Keywords: Thermal transport modeling; Numerical simulation; Porous media; Effective thermal conductivity.

SUMÁRIO

1 Introdução	7
2 Metodologia	8
3 Revisão bibliográfica	10
3.1 Parâmetros de escoamento em leitos porosos	10
3.1.1 Número de Reynolds	10
3.1.2 Equação da continuidade	12
3.1.3 Lei de Darcy	13
3.1.4 Equação de Ergun para perda de carga	15
3.2.1 Princípios de troca térmica	16
3.2 Modelagem do escoamento em leitos fixos	16
3.2.2 Modelagem matemática de transferência de calor em leitos fixos	17
3.2.3 Influência da geometria das partículas no raio hidráulico e no escoamento	18
3.2.4 Relação entre o número de Reynolds e o número de Euler em leitos fixos	20
3.3 Transferência de calor em reatores de leito fixo: uma abordagem experimental	22
3.4 Simulação numérica da transferência de calor em leitos fixos	25
3.5 Determinação da condutividade térmica efetiva por sonda térmica	28
3.6 Análise comparativa entre os três estudos	37
3.7 Perspectivas para estudos futuros	40
4 Conclusão	41
Referências	42

1 INTRODUÇÃO

A Engenharia Química configura-se como um campo do conhecimento essencial à transformação de matérias-primas em produtos com valor agregado, desempenhando papel estratégico no desenvolvimento industrial e tecnológico da sociedade contemporânea. Nesse contexto, os fenômenos de transporte constituem a base teórica e prática sobre a qual se estruturam inúmeros processos, sendo a transferência de calor um dos mecanismos mais relevantes.

Assim, este fenômeno encontra-se presente em grande parte das operações unitárias típicas da indústria de processos, como reações químicas, etapas de destilação, secagem, cristalização, entre outras, influenciando diretamente a eficiência energética, a estabilidade operacional e a qualidade dos produtos obtidos.

Dessa forma, a transferência de calor não se limita a um conceito teórico, mas constitui um fenômeno físico intrínseco às operações industriais, cuja compreensão demanda, por parte do engenheiro, não apenas domínio das formulações matemáticas que o descrevem, como também sensibilidade para reconhecer suas implicações práticas, suas limitações em diferentes contextos e os desafios decorrentes de sua aplicação em sistemas complexos.

No âmbito dos processos industriais que envolvem a manipulação de materiais particulados, os sistemas de leito fixo são relevantes por sua simplicidade construtiva e amplitude de suas aplicações.

Desse modo, o objetivo geral deste trabalho foi realizar uma revisão bibliográfica com o intuito de analisar e comparar diferentes abordagens da transferência de calor em reatores de leito fixo, considerando métodos experimentais clássicos, simulações numéricas totalmente resolvidas e técnicas experimentais modernas de medição da condutividade térmica efetiva.

Além disso, buscou-se analisar os resultados obtidos por diferentes autores, bem como compreender como cada abordagem contribui para a descrição do comportamento térmico do leito e comparar criticamente três estudos destacando vantagens, limitações práticas e potenciais de aplicação.

2 METODOLOGIA

A metodologia deste trabalho consistiu na elaboração de uma revisão bibliográfica voltada à análise dos princípios, aplicações, fenômenos de transporte e avanços tecnológicos relacionados a sistemas de leito fixo. A revisão foi conduzida com base em critérios rigorosos de busca, seleção e síntese, de modo a garantir abrangência científica, atualidade e consistência metodológica.

Inicialmente, foram consultadas diversas bases de dados reconhecidas na área da engenharia, com destaque para Science Direct, Scielo e Google Scholar. A escolha por múltiplas plataformas foi essencial para ampliar o alcance da pesquisa, permitindo localizar estudos experimentais, teóricos, modelagens matemáticas, revisões recentes e trabalhos aplicados a processos industriais envolvendo leitos fixos.

A busca foi realizada utilizando combinações de palavras-chave que representassem de forma precisa os diferentes aspectos que compõem o tema. Entre os principais termos empregados encontram-se: *“Fixed bed”*, *“Porous bed”*, *“Heat transfer”*, *“Bed porosity”*, *Heat transfer*, *“Thermal performance”*, *“Packed bed”*, *“Thermal conductivity”*, *“Temperature distribution”*.

Além disso, durante a triagem inicial, foram identificados diversos trabalhos relacionados a secadores de leito fixo, especialmente focados em operações de secagem de grãos, alimentos, biomassas ou produtos farmacêuticos. Embora esses sistemas utilizem configurações semelhantes, eles foram excluídos da revisão, pois seu foco experimental e teórico concentra-se majoritariamente em fenômenos específicos de secagem, e não em transferência de calor, queda de pressão, comportamento fluido ou modelagem de escoamento em leitos particulados, que constituem o eixo central deste estudo. Assim, foram mantidos apenas os artigos cuja abordagem estivesse diretamente relacionada ao entendimento dos mecanismos de transporte de calor e do desempenho operacional de leitos fixos.

Desse modo, foram considerados artigos redigidos em inglês e em português, desde que estivessem disponíveis integralmente para consulta. Trabalhos clássicos foram utilizados para contextualização teórica, tais como modelos tradicionais de transferência de calor em meios porosos e equações para queda de pressão.

No total, foram identificados 112 artigos, que posteriormente foram submetidos à etapa de remoção de duplicatas. Após esse processo, deu-se início à triagem inicial, na qual os títulos e resumos foram analisados com o objetivo de excluir trabalhos que não apresentavam relação direta com leitos fixos ou que exploravam o tema de forma excessivamente superficial. Nessa etapa,

considerou-se a relevância científica, clareza metodológica, aplicabilidade ao tema e aderência ao objetivo deste trabalho. Foram excluídos artigos que continham metodologias incompletas, e ausência de relação com fenômenos de transporte ou modelagem de leitos fixos.

Após essa análise, 3 artigos foram selecionados para compor o corpo central da revisão. Essas publicações representaram uma amostragem consistente e abordaram, de forma abrangente, parâmetros fundamentais como condutividade térmica efetiva, distribuição de temperatura, influência do tamanho das partículas e comportamento térmico em condições variáveis de operação.

Todos os artigos selecionados foram lidos integralmente e analisados, extraindo as informações com o objetivo de comparar, visando construir uma compreensão ampla sobre o comportamento de sistemas de leito fixo e sustentar a discussão apresentada nos capítulos seguintes. Assim, a metodologia adotada garantiu que o conjunto de trabalhos analisados representasse, com fidelidade, o estado da arte referente à operação, modelagem, transporte de calor e aplicação industrial de leitos fixos.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

De acordo com a metodologia adotada, a revisão bibliográfica foi organizada em duas etapas. Inicialmente, foram apresentados os fundamentos teóricos sobre escoamento e fenômenos de transporte em leitos fixos. Em seguida, realizou-se uma discussão individual de cada um dos três estudos selecionados, com ênfase em seus objetivos, abordagens metodológicas e principais resultados. Por fim, foi feita uma análise comparativa entre os trabalhos, destacando suas principais contribuições para o entendimento desses sistemas.

3.1 PARÂMETROS DE ESCOAMENTO EM LEITOS POROSOS

O estudo do escoamento em meios porosos baseia-se na interação entre as propriedades do fluido e a configuração do empacotamento, fatores que influenciam diretamente o transporte de massa, energia e quantidade de movimento. Nesse cenário, para descrever esse fenômeno com precisão, é necessário definir parâmetros hidrodinâmicos que identifiquem o regime de fluxo, além de aplicar leis de conservação e modelos constitutivos adequados para o sistema. Assim, o uso do número de Reynolds, em conjunto com a equação da continuidade, a Lei de Darcy e a Equação de Ergun, estabelece os fundamentos teóricos essenciais para analisar o comportamento do fluido em leitos fixos.

3.1.1 NÚMERO DE REYNOLDS

O número de Reynolds é um parâmetro adimensional que permite determinar o regime de escoamento de um fluido, sendo importante na caracterização da predominância dos efeitos viscosos ou inerciais no escoamento, o que é essencial para o projeto e operação de sistemas como reatores de leito fixo, filtros industriais e leitos catalíticos. Ele é calculado considerando a densidade do fluido (ρ), a velocidade superficial (v), o diâmetro das partículas (dp) e a viscosidade dinâmica (μ), conforme a Equação 1 (Bird et al., 2004):

$$Re = \frac{\rho v dp}{\mu} \quad (1)$$

A interpretação do número de Reynolds segue critérios que delimitam diferentes regimes de escoamento, conforme a Tabela 1.

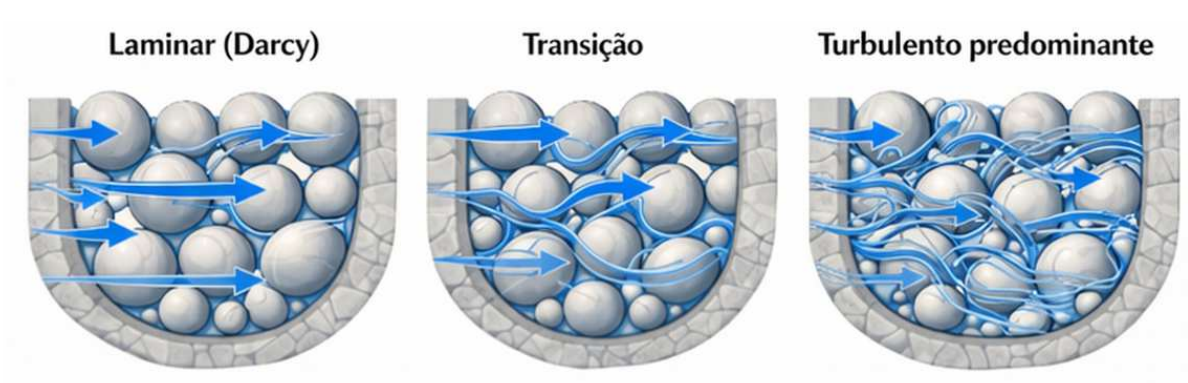
Tabela 1 – Classificação do regime de escoamento em leitos fixos, segundo a classificação feita por Bird et al. (2004).

Número de Reynolds (Re)	Regime de escoamento
$4 < Re < 25$	Laminar (Darcy)
$25 < Re < 1000$	Transição
$1000 < Re < 2000$	Turbulento predominante

Fonte: Elaborado pela autora.

Essa classificação é amplamente utilizada na Engenharia Química e em operações unitárias, pois influencia diretamente no dimensionamento de equipamentos e na modelagem do escoamento através de leitos porosos. A Figura 1 apresenta esquematicamente os diferentes regimes de escoamento e seus padrões de velocidade.

Figura 1: Representação esquemática dos regimes de escoamento em leitos fixos.



Fonte: Imagem gerada por Inteligência Artificial.

No regime de escoamento laminar, o fluido se desloca de forma lenta, ordenada e previsível, sendo típico de baixas velocidades e baixos números de Reynolds. Nessa condição, as forças viscosas predominam os efeitos inerciais, resultando em menores perdas de carga associadas ao atrito (Bird et al., 2004).

Em contraste, o escoamento turbulento caracteriza-se por um movimento rápido, instável e desordenado, no qual as forças inerciais passam a dominar sobre os efeitos viscosos. Assim, esse regime favorece a mistura do fluido e aumenta a eficiência dos processos de transferência de calor e massa, porém, implica em maior resistência ao escoamento e em um aumento da perda de carga. Em leitos fixos, pequenas variações na vazão sob regime turbulento podem causar alterações expressivas no comportamento hidráulico do sistema, o que torna sua modelagem mais complexa (Bird et al., 2004).

Embora o número de Reynolds seja um parâmetro fundamental para a caracterização do regime de escoamento em leitos porosos, a análise completa do comportamento do fluido requer a aplicação das equações de conservação que regem os fenômenos de transporte. Nesse contexto, a equação da continuidade surge como o princípio básico para garantir a conservação da matéria ao longo do leito poroso, permitindo uma modelagem matemática mais precisa.

3.1.2 EQUAÇÃO DA CONTINUIDADE

A equação da continuidade, que representa o balanço de massa em um sistema de escoamento, é o princípio fundamental para a análise de fluidos em qualquer meio, incluindo leitos fixos. Ela expressa a conservação da massa, afirmando que a massa não pode ser criada nem destruída dentro de um volume de controle. Em termos matemáticos, para um fluido compressível, a equação da continuidade é dada pela Equação 2 (Perry et al., 1997).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0 \quad (2)$$

Em que ρ é a densidade do fluido (kg/m^3), v é o vetor velocidade do escoamento (m/s), $\frac{\partial \rho}{\partial t}$ representa a taxa de variação temporal da densidade, e $\nabla \cdot (\rho v)$ é a divergência do fluxo de massa.

Assim, a Equação 2 é a base para os balanços de massa em engenharia, garantindo que a variação de massa dentro de um volume é igual à diferença entre o fluxo de entrada e de saída. Para fluidos incompressíveis, essa relação se reduz a uma condição de divergência nula do vetor velocidade, simplificando muitos modelos matemáticos. A Equação 2 é a base para o desenvolvimento de modelos mais complexos de transporte, pois estabelece as restrições fundamentais que qualquer solução deve satisfazer, sendo a base de vários cálculos da engenharia (Perry et al., 1997).

3.1.3 LEI DE DARCY

O estudo do escoamento em leitos fixos envolve a aplicação da equação da continuidade em conjunto com modelos que descrevem o comportamento do fluido ao atravessar o meio poroso, formado por partículas sólidas empacotadas. Para escoamentos em regime laminar, caracterizados por baixas velocidades onde os efeitos inerciais são desprezíveis, a Equação 3, conhecida como Lei de Darcy, que é amplamente utilizada como modelo fundamental para relacionar a velocidade do fluido ao gradiente de pressão, permeabilidade do meio e viscosidade do fluido newtoniano (Bird et al., 2004; Freeze et al., 1979).

$$v = - \left(\frac{K}{\mu} \right) (\nabla P - \rho g) \quad (3)$$

A Equação 3 define que a velocidade do fluido é proporcional ao gradiente de pressão e à permeabilidade do meio, sendo inversamente proporcional à viscosidade. Onde v é a velocidade superficial do fluido, ou seja, a vazão volumétrica dividida pela área da seção transversal do leito (m/s), K representa a permeabilidade intrínseca do meio poroso (m^2), μ é a viscosidade dinâmica do fluido ($\text{Pa}\cdot\text{s}$), que influencia a resistência viscosa ao escoamento, ρ é a densidade do fluido (kg/m^3), g é a aceleração da gravidade e ∇P é o gradiente de pressão ao longo do meio poroso (Pa/m).

A permeabilidade é uma propriedade física do meio que expressa sua capacidade de permitir a passagem do fluido, e é fortemente influenciada pela porosidade, forma das partículas e seu empacotamento. Altas permeabilidades indicam meios menos restritivos, facilitando o escoamento, enquanto valores baixos indicam meios compactos e com maior resistência ao fluxo (Bird et al., 2004; Freeze et al., 1979).

A aplicação da Lei de Darcy fundamenta-se em hipóteses simplificadoras essenciais para a modelagem do fluxo. Entre as principais, destacam-se o regime permanente e o escoamento laminar, assumindo-se a incompressibilidade do fluido e a isotropia do meio poroso. Adicionalmente, pressupõe-se um comportamento newtoniano, o que assegura a constância da viscosidade em todo o domínio do escoamento sob as condições analisadas. Entretanto, essas condições nem sempre são atendidas em sistemas industriais reais, o que limita a aplicação direta desta Lei na prática (Bird et al., 2004; Freeze et al., 1979).

Nesse contexto, a porosidade assume papel central na descrição do escoamento em meios porosos, pois representa a fração do volume do leito ocupada pelo fluido em oposição ao volume ocupado pelas partículas sólidas. Uma menor porosidade implica maior resistência ao escoamento, pois o fluido encontra um caminho mais restrito. Essa característica impacta diretamente a perda de carga e, conseqüentemente, o consumo energético necessário para manter o fluxo no sistema (Geankoplis, 1993; McCabe et al., 1985).

A validade da Lei de Darcy está restrita a escoamentos laminares em meios porosos, geralmente associados a números de Reynolds muito baixos, tipicamente inferiores a 1. Nessas condições, o escoamento é dominado pelas forças viscosas, e a velocidade do fluido apresenta relação linear com o gradiente de pressão. No entanto, à medida que o número de Reynolds aumenta, os efeitos inerciais passam a se tornar significativos, o que compromete essa relação linear. Nessa situação, a Lei de Darcy deixa de ser adequada para descrever o escoamento, tornando necessária a utilização de modelos mais abrangentes, como a Equação de Ergun, que incorpora tanto os efeitos viscosos quanto os inerciais (Bird et al., 2004; McCabe et al., 1985).

3.1.4 EQUAÇÃO DE ERGUN PARA PERDA DE CARGA

Para condições de escoamento em leitos fixos onde as velocidades do fluido aumentam além do regime laminar, surgem efeitos inerciais que não são capturados pela Lei de Darcy. Nessa situação, o comportamento do fluido apresenta características transitórias ou até turbulentas, o que implica que a resistência ao escoamento deixa de ser proporcional apenas ao gradiente de pressão e passa a depender também do quadrado da velocidade, tornando-se não linear. Essa dependência quadrática em relação à velocidade decorre do aumento da resistência devido à energia cinética do fluido, evidenciando a limitação da Lei de Darcy em regimes não laminares (Kunii, 1991).

A Equação de Ergun, que é uma correlação empírica que combina os efeitos viscosos, dominantes em baixas velocidades, com os efeitos inerciais, que se tornam relevantes conforme o aumento do escoamento. Essa fórmula é essencial para o cálculo da queda de pressão ao longo de um leito fixo, permitindo prever a perda de carga por unidade de comprimento do meio poroso, conforme expressa na Equação 5 (Ergun, 1952; Kunii, 1991).

$$\frac{\Delta P}{L} = \left[\frac{150 (1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \right] \cdot \left(\frac{\mu v}{dp^2} \right) + \left[\frac{1.75 (1-\varepsilon)}{\varepsilon^3} \right] \cdot \left(\frac{\rho v^2}{dp} \right) \quad (5)$$

Em que $\frac{\Delta P}{L}$ é a perda de carga por unidade de comprimento (Pa/m), ε representa a porosidade do leito (adimensional), μ é a viscosidade dinâmica do fluido (Pa·s), válida apenas para fluidos newtonianos, v é a velocidade superficial do fluido (m/s), dp é o diâmetro médio das partículas (m) e ρ é a densidade do fluido (kg/m³).

O primeiro termo do lado direito da equação representa as perdas devido ao atrito viscoso e domina em regimes laminares, enquanto o segundo termo considera os efeitos inerciais que crescem com o quadrado da velocidade, tornando-se relevantes para fluxos turbulentos ou de transição (McCabe et al., 1985).

A Equação de Ergun é amplamente utilizada em Engenharia Química porque descreve de forma adequada as perdas de carga em leitos fixos em diferentes condições de operação. Sua aplicação prática é fundamental para evitar problemas como queda de pressão excessiva, que pode acarretar aumento no consumo de energia e desgaste dos equipamentos, sendo amplamente utilizada

para dimensionamento de colunas recheadas e cálculo da queda de pressão em operações industriais (Bird et al., 2004).

3.2.1 PRINCÍPIOS DE TROCA TÉRMICA

A transferência de calor é um fenômeno fundamental nos processos químicos e pode ocorrer por três mecanismos principais: condução, convecção e radiação. A condução ocorre pela propagação de energia térmica em um meio sólido ou fluido estacionário devido à interação molecular. Sua intensidade depende da condutividade térmica que, por sua vez, é a propriedade física que caracteriza a capacidade de um material de conduzir calor. Materiais com alta condutividade, como metais, apresentam maior eficiência na propagação do calor, enquanto materiais como cerâmicas e polímeros possuem condutividade significativamente menor, oferecendo maior resistência térmica ao processo de transferência (Foust et al., 1960; Incropera et al., 2003).

A transferência de calor por convecção ocorre apenas em fluidos, e está associada ao movimento do próprio fluido, seja provocado por diferenças de densidade decorrentes de variações de temperatura ou por transporte de energia térmica de uma região para outra. Em contraste, a radiação térmica caracteriza-se por ser o único modo de transferência de calor que independe da presença de um meio material, uma vez que a energia é transmitida por meio de ondas eletromagnéticas. Enquanto a convecção depende do escoamento e das propriedades do fluido, a radiação depende da temperatura da superfície e de suas características radiantes (Çengel *et al.*, 2012; Incropera et al., 2003).

3.2 MODELAGEM DO ESCOAMENTO EM LEITOS FIXOS

Nesse contexto, a modelagem do escoamento em leitos fixos requer a utilização de parâmetros geométricos e adimensionais capazes de representar, de forma simplificada, a complexidade estrutural do meio poroso. Assim, torna-se necessário analisar a influência da geometria das partículas sobre o raio hidráulico e os efeitos dessa geometria no escoamento, bem como a relação entre os números de Reynolds e Euler, amplamente empregada em correlações clássicas para a descrição da perda de carga e dos diferentes regimes de escoamento em leitos fixos (Kunii, 1991).

3.2.2 MODELAGEM MATEMÁTICA DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM LEITOS FIXOS

A transferência de calor em leitos fixos ocupa uma posição central nos processos industriais químicos. Esse tipo de sistema caracteriza-se pela imobilidade das partículas sólidas, que, ao se manterem estaticamente organizadas, formam canais porosos atravessados por fluidos.

Assim, a análise da transferência de calor em reatores de leito fixo é essencial para a previsão do comportamento térmico do sistema e, conseqüentemente, para o dimensionamento e otimização de processos químicos e catalíticos. A equação de balanço de energia para um fluido homogêneo escoando em um tubo empacotado, com a hipótese de simetria cilíndrica pode ser descrita pela Equação 4 (Freire et al., 2009).

$$\varepsilon \rho u c_p \frac{\partial T}{\partial z} = K_r \frac{1}{r} \frac{\partial(r \frac{\partial T}{\partial r})}{\partial r} + K_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (4)$$

Na Equação 4, ε representa a porosidade do leito (adimensional), ρ é a densidade do fluido ($\frac{kg}{m^3}$), u é componente axial do vetor velocidade ($\frac{m}{s}$), c_p o calor específico do fluido ($\frac{J}{kg.K}$), $\frac{\partial T}{\partial z}$ representa o gradiente de temperatura na direção axial, r é o raio local do leito, K_r o componente radial e K_z o componente axial do tensor de condutividade térmica efetivo ($\frac{W}{m.K}$).

A condutividade térmica efetiva representa a capacidade global de um meio heterogêneo, como um meio poroso ou um leito particulado, de conduzir calor considerando simultaneamente as contribuições do sólido e do fluido presente nos poros. Assim, esse parâmetro equivale a uma propriedade macroscópica do sistema, que não corresponde à condutividade térmica de nenhuma das fases isoladamente, mas ao comportamento térmico do conjunto. Seu valor depende da porosidade do meio, das propriedades térmicas do sólido e do fluido, da geometria e do empacotamento das partículas, do grau de saturação, sendo fundamental para a modelagem e o dimensionamento de processos de transferência de calor em meios porosos (Kaviany, 1995; Nield, 1999).

Desse modo, o primeiro termo à direita que envolve o coeficiente $K_r \frac{1}{r} \frac{\partial(r \frac{\partial T}{\partial r})}{\partial r}$, refere-se à dispersão térmica radial no interior do leito fixo. Esse termo é de fundamental importância quando existe troca de calor significativa entre a parede do leito e o fluido, pois considera a variação da

temperatura em função do raio do tubo. O segundo termo à direita, associado ao coeficiente $K_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}$, representa a dispersão ou condução efetiva de calor ao longo da direção axial (Freire et al., 2009).

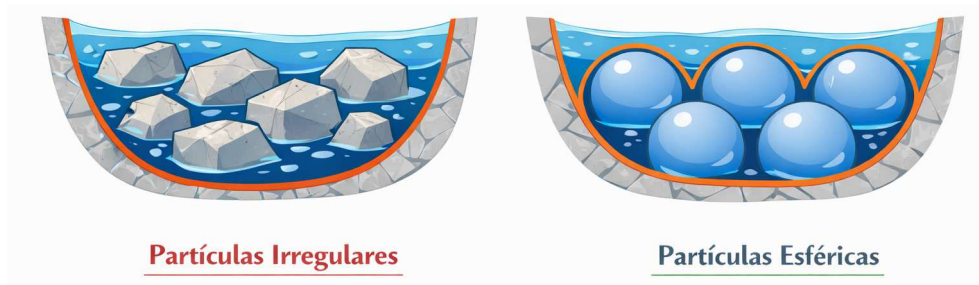
Fisicamente, a Equação 4 estabelece que o transporte convectivo de energia realizado pelo fluido em movimento é balanceado pelos efeitos de dispersão térmica nas direções radial e axial. Nesse modelo as propriedades térmicas efetivas, como condutividades radiais e axiais, englobam os efeitos combinados da fase sólida e da fase fluida (Freire et al., 2009). O uso desta formulação permite compreender a distribuição de temperatura no sistema e prever possíveis gradientes térmicos, os quais, por exemplo, podem afetar diretamente o desempenho de reações químicas.

3.2.3 INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA DAS PARTÍCULAS NO RAIOS HIDRÁULICO E NO ESCOAMENTO

Partículas esféricas são frequentemente adotadas como modelo idealizado em estudos de meios porosos por sua simplicidade geométrica, resultando em uma estrutura de leito mais previsível e viabilizando o uso de correlações clássicas, além de reduzir a complexidade das interações entre fluido e sólido e o custo computacional dos modelos.

Entretanto, grande parte das partículas reais apresentam geometria irregular, como catalisadores, grãos de areia e minérios, apresentando características geométricas que distanciam do modelo esférico idealizado. A forma não esférica influencia diretamente a estrutura do leito particulado, alterando a porosidade, a área superficial específica e a distribuição dos poros, o que se reflete em modificações nos padrões de escoamento, na perda de carga e nos mecanismos de transferência de calor e massa. Um esquema ilustrativo está representado na Figura 2, na qual estabelece um comparativo visual entre a geometria esférica e não esférica.

Figura 2: Comparação esquemática de diferentes geometrias em meios porosos



Fonte: Imagem gerada por Inteligência Artificial.

Em função dessa maior complexidade geométrica, a modelagem de leitos com partículas não esféricas exige abordagens que considerem os efeitos da forma das partículas sobre o comportamento global do sistema, sendo frequentemente usadas correções geométricas ou parâmetros equivalentes para representar adequadamente os fenômenos de transporte em análises de engenharia (White, 2011).

Nesse contexto, o raio hidráulico é utilizado como um parâmetro representativo por considerar os efeitos da geometria das partículas na descrição dos canais de escoamento, sendo expresso na Equação (6) (White, 2011):

$$R_h = \frac{A}{P} \quad (6)$$

A Equação 6 mostra que o raio hidráulico (R_h) é a razão entre a área ocupada pelo fluido e a superfície de contato com as paredes, responsável pela resistência ao escoamento, sendo expresso em metros (m). Nessa relação, A é a área molhada (m^2), correspondente à área da seção transversal efetivamente preenchida pelo fluido e P é o perímetro molhado (m), definido como o comprimento da interface entre o fluido e as paredes do canal (White, 2011).

O raio hidráulico está associado à facilidade com que o fluido escoar entre as superfícies sólidas, uma vez que partículas com geometria não esférica apresentam maior área de contato com o fluido e, consequentemente, aumentam o perímetro molhado. Assim, ocorre a redução do valor do raio hidráulico, o que intensifica a resistência ao escoamento devido ao aumento do efeito de

parede. Por outro lado, partículas com formato mais próximo ao esférico possuem menor superfície de contato e, portanto, resultam em maiores valores de raio hidráulico, favorecendo o escoamento e promovendo menores perdas de carga (Porto, 2006).

Adicionalmente à influência da morfologia das partículas, o efeito de parede é um fator determinante na hidrodinâmica de leitos fixos, tendo maior intensidade em sistemas cuja razão entre o diâmetro da coluna e o diâmetro da partícula é reduzida. Nessas condições, a porosidade deixa de ser uniforme e passa a apresentar variações locais, especialmente ao longo do raio da coluna. Observa-se, em geral, maior porosidade nas proximidades da parede, associado a um empacotamento mais ordenado das partículas, enquanto na região central do leito o arranjo tende a ser mais aleatório e a porosidade mais homogênea (Bird et al., 2004; Freire et al., 2009).

Além disso, a distribuição de tamanhos das partículas exerce influência direta sobre a porosidade do leito, uma vez que partículas menores podem ocupar os vazios entre partículas maiores e aumentar a resistência ao escoamento. Outro ponto relevante é a hipótese de temperatura de parede constante que é frequentemente adotada, mas nem sempre é capaz de representar adequadamente os resultados experimentais por não considerar a dispersão axial de calor ou a porosidade variável perto da parede (Freire et al., 2009; Kunii, 1991).

Assim, essa heterogeneidade estrutural favorece a formação de caminhos preferenciais de escoamento, o que altera o perfil de velocidades do fluido ao longo da seção transversal e modifica a resistência hidráulica. Consequentemente, a queda de pressão estimada por correlações como a Equação de Ergun pode apresentar desvios quando o efeito de parede não é considerado. Além disso, o efeito de parede também interfere nos processos de transferência de calor e massa, pois a variação da porosidade local afeta a condutividade térmica efetiva e os coeficientes de transferência convectiva próximos à parede do reator, influenciando o desempenho térmico global do sistema (Freire et al., 2009; Ziolkowska, 1988).

3.2.4 RELAÇÃO ENTRE O NÚMERO DE REYNOLDS E O NÚMERO DE EULER EM LEITOS FIXOS

O número de Euler é um parâmetro adimensional que expressa a relação entre a queda de pressão no escoamento e as forças inerciais associadas ao movimento do fluido. Em leitos fixos, esse número é definido pela relação apresentada na Equação 7 (Fox et al., 2011):

$$Eu = \frac{\Delta P}{\frac{1}{2} \rho v^2} \quad (7)$$

Em que ΔP representa a queda de pressão ao longo do leito (Pa), ρ é a densidade do fluido (kg/m^3) e v^2 é a velocidade superficial do escoamento (m/s).

A relação entre o número de Euler e o número de Reynolds em meios porosos não é linear, uma vez que os mecanismos de dissipação de energia variam conforme o regime de escoamento. Para valores baixos de Reynolds predominam os efeitos viscosos, o que caracteriza um regime laminar, no qual a perda de carga é aproximadamente proporcional à velocidade do fluido. Nessa condição, o número de Euler apresenta dependência inversa em relação ao número de Reynolds (Bird et al., 2004).

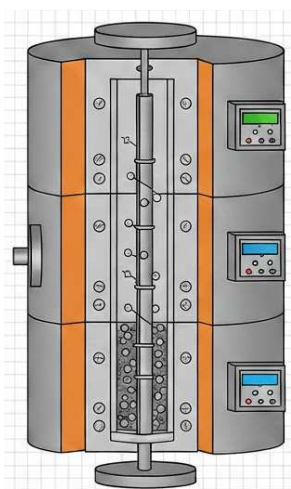
Por outro lado, com o aumento do número de Reynolds, os efeitos inerciais tornam-se maiores, de modo que passam a ocorrer desvios da linearidade entre a queda de pressão e a velocidade do fluido. No regime de transição e em regimes de Reynolds elevados, a perda de carga passa a apresentar um comportamento aproximadamente quadrático em relação à velocidade do fluido, o que faz com que o número de Euler tenda a assumir valores aproximadamente constantes. Desse modo, esse comportamento evidencia a forte não linearidade da relação entre o número de Euler e Reynolds em leitos fixos (Bird et al., 2004).

Do ponto de vista de projeto de equipamentos, a relação entre os números adimensionais é fundamental, pois pequenas variações na vazão em regimes de Reynolds elevados podem levar a aumentos significativos na perda de carga e no consumo energético do sistema. Além disso, com base nos princípios descritos por Bird et al., (2004), a análise conjunta dos números de Reynolds e Euler, associada à Equação de Ergun, fornece uma base teórica sólida para compreender o comportamento de escoamentos em meios porosos e como variações de vazão impactam o desempenho desses sistemas.

3.3 TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM REATORES DE LEITO FIXO : UMA ABORDAGEM EXPERIMENTAL

O conhecimento da forma como se dá a transferência de calor em reatores de leito fixo é um aspecto fundamental para o desempenho eficiente desses sistemas, especialmente quando operam em altas temperaturas. No estudo experimental realizado por Jorge et al (1999), foram realizados experimentos com um reator tubular aquecido por forno elétrico, investigando como o calor é transferido do forno até o leito fixo sem que ocorram reações químicas de modo a isolar apenas os efeitos térmicos do sistema conforme está representado na Figura 3.

Figura 3: Esquema ilustrativo do sistema.



Fonte: Imagem gerada por Inteligência Artificial, baseada em Jorge et al. (1999).

O material utilizado como meio poroso foi um catalisador industrial, cujas propriedades influenciam diretamente o comportamento térmico do sistema. A análise detalhada das temperaturas ao longo do reator permitiu compreender as variações térmicas internas e as resistências envolvidas na transferência de calor, ressaltando a importância de considerar as diferentes etapas desse processo para uma avaliação precisa (Jorge et al., 1999).

Ar em temperatura inferior à da parede do reator foi alimentado na entrada e aquecido progressivamente ao longo do escoamento axial através do leito. Adicionalmente, perfis de temperatura do fluido foram medidos com termopares ao longo do comprimento do reator, comparados com um modelo matemático, cujos parâmetros foram estimados por meio do método

dos mínimos quadrados, para estimar o coeficiente global de transferência de calor e o coeficiente de transferência de calor interno e externo (Jorge et al., 1999).

Foram medidos experimentalmente ao longo do comprimento do reator os perfis de temperatura do forno, da parede do reator e do centro do leito catalítico. As medições evidenciaram que as temperaturas não permanecem uniformes nem ao longo do eixo do reator nem na direção radial. Observou-se a presença de variação axial, associada às mudanças nas condições térmicas ao longo do comprimento do tubo, e de variação radial, caracterizada pelo gradiente térmico existente entre o forno, a parede do reator e o centro do leito. Esses resultados confirmam a existência de resistências térmicas distintas no sistema e reforçam a necessidade de considerar tanto os gradientes axiais quanto radiais na análise do sistema (Jorge et al., 1999).

A avaliação do coeficiente de transferência de calor nesse estudo mostrou que a resistência térmica total pode ser dividida em três componentes principais: a resistência externa, que compreende o ambiente do forno, a resistência da parede do reator e a resistência interna, referente ao próprio leito catalítico (Jorge et al., 1999).

A resistência térmica associada à condução na parede do reator foi estimada a partir da espessura do tubo e da condutividade térmica do aço inoxidável, sendo posteriormente comparada às resistências externa e interna obtidas experimentalmente. Verificou-se que a resistência da parede apresentou valores significativamente menores em relação às demais resistências ao longo de toda a faixa de temperaturas investigada. Dessa forma, sua contribuição para a resistência térmica global mostrou-se desprezível, o que facilitou a análise. Além disso, os resultados indicaram que, em temperaturas mais baixas, a resistência externa é o fator limitante, enquanto em temperaturas elevadas, as resistências interna e externa passam a ter influência semelhante sobre o processo (Jorge et al., 1999).

Outro ponto relevante do estudo foi a dificuldade de medir diretamente a temperatura da parede do reator, pois esta varia ao longo do comprimento do equipamento, principalmente em temperaturas mais elevadas observou-se experimentalmente um aumento da variação axial da temperatura da parede do reator, comportamento que pode ser atribuído ao aumento da contribuição da radiação térmica, cuja intensidade cresce fortemente com a temperatura (Jorge et al., 1999).

Para contornar essa limitação, Jorge et al. (1999) propuseram uma abordagem alternativa, utilizando a variação axial da temperatura da parede do reator, aproximada por uma função linear, o

que permitiu melhorar o ajuste do modelo aos dados experimentais e estimar com maior precisão os coeficientes de transferência de calor interno e externo.

O comportamento exponencial é típico de sistemas com coeficientes e condições de contorno constantes. Entretanto, no estudo de Jorge et al. (1999), a temperatura do forno e o coeficiente externo variam axialmente, principalmente devido à contribuição da radiação térmica. Consequentemente, o gradiente axial de temperatura da parede torna-se aproximadamente constante no intervalo analisado, resultando em um perfil que pode ser adequadamente aproximado por uma função linear.

Por fim, a influência da vazão do gás e da temperatura do forno sobre os coeficientes de transferência de calor foi investigada. Observou-se que o coeficiente convectivo interno, associado à transferência de calor entre a parede interna do reator e o gás que escoava pelo leito catalítico, aumenta com a vazão do gás e com a temperatura da parede, uma vez que o incremento da vazão intensifica a convecção forçada no interior do leito, reduzindo a resistência térmica interna e favorecendo a transferência de calor entre a parede do reator e o meio reacional (Jorge et al., 1999).

Em contrapartida, o coeficiente externo, que engloba os efeitos da radiação térmica do forno e da convecção natural do ar ao redor, mostrou-se mais sensível às variações da temperatura do forno, pois é predominantemente controlado pela radiação térmica e pela convecção natural ao redor do reator, apresentando baixa dependência da vazão do escoamento interno. Essas informações são fundamentais para a otimização da operação de reatores de leito fixo, pois indicam quais parâmetros devem ser priorizados para garantir eficiência térmica e desempenho adequado do processo catalítico (Jorge et al., 1999).

Portanto, em baixas temperaturas, a transferência de calor é limitada pela baixa eficiência da radiação e da convecção natural no forno, tornando a resistência externa dominante. Já em altas temperaturas, o forte aumento da radiação reduz significativamente essa resistência, fazendo com que a resistência interna associada ao leito catalítico passe a controlar o processo (Jorge et al., 1999). Isso permite identificar condições favoráveis à formação de pontos quentes no leito catalítico e, assim, orientar a operação do reator de forma mais segura e estável.

A confiabilidade dos resultados foi verificada pela boa concordância entre os perfis de temperatura medidos experimentalmente, as previsões do modelo ajustadas por mínimos quadrados e as tendências esperadas pela teoria da transferência de calor. Os perfis axiais de temperatura

previstos reproduziram adequadamente os dados experimentais, indicando que o modelo é capaz de descrever de forma consistente o comportamento térmico do sistema (Jorge et al., 1999).

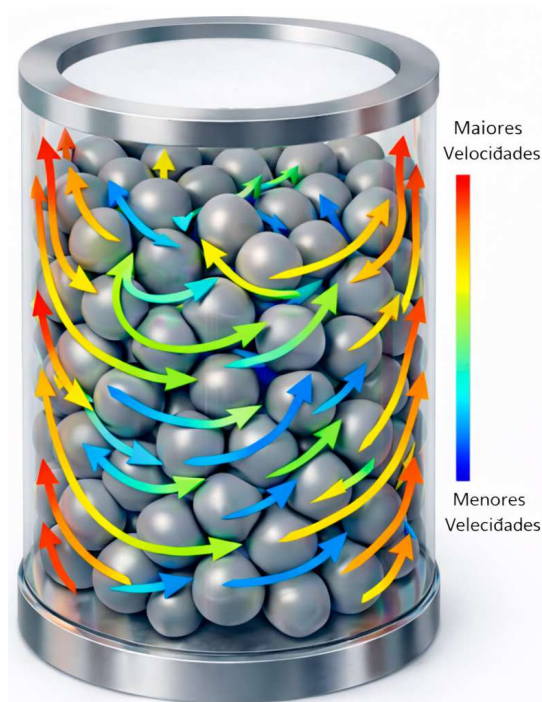
3.4 SIMULAÇÃO NUMÉRICA DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM LEITOS FIXOS

Em outro estudo realizado por Das et al. (2017), foram utilizadas simulações numéricas diretas para analisar o escoamento e a transferência de calor em leitos fixos compostos por esferas dispostas de forma aleatória. Para isso, foi aplicado o Método de Contorno Imerso (IBM) com uma malha cartesiana fixa, possibilitando a captura de efeitos locais dos campos de velocidade e temperatura em estruturas tridimensionais complexas, permitindo a resolução direta das equações de escoamento sem a necessidade de adaptar a malha às superfícies das partículas.

O escoamento e a transferência de calor foram analisados por meio de simulações numéricas totalmente resolvidas e sem o uso de modelos com contas simplificadas, considerando um empacotamento aleatório de partículas, inicialmente submetidas à deposição por queda e colisão até atingirem uma configuração estática, a partir da qual as simulações foram realizadas com as partículas em repouso. O objetivo central da simulação numérica foi resolver as variáveis físicas do fluido que escoam pelos poros entre as partículas por meio da transferência de calor da parede do reator para o leito fixo (Das et al., 2017).

Além disso, Das et al. (2017) analisaram numericamente o campo tridimensional de velocidade em leitos fixos por meio de simulação CFD. Na Figura 4 as setas com diferentes direções representam o desvio do escoamento ao contornar as partículas esféricas, evidenciando que o fluido não se desloca de forma retilínea, mas sofre constantes mudanças de direção devido ao empacotamento. A variação na intensidade da cor das setas ilustra as flutuações locais de velocidade, associadas à formação de regiões de aceleração e zonas de menor velocidade entre as partículas em razão do empacotamento aleatório.

Figura 4: Representação esquemática do leito fixo com campo de velocidade.



Fonte: Figura gerada por Inteligência Artificial, baseada em Das et al. (2017).

Além disso, a intensificação do escoamento próximo à parede da coluna foi destacada para representar o aumento da porosidade local nesta região. A representação das partículas como esferas regulares segue a modelagem adotada no estudo, que utilizou geometrias ideais para isolar os efeitos estruturais do empacotamento (Das et al., 2017).

Nesse contexto, os autores utilizaram como parâmetro geométrico adimensional a razão entre o diâmetro interno da coluna do reator e o diâmetro das partículas do leito (N). Esse parâmetro indica o quão estreita é a coluna em relação ao tamanho das partículas (Das et al., 2017). Valores reduzidos de N indicam que a coluna é mais estreita, fazendo com que a parede influencie fortemente o empacotamento das partículas, o escoamento do fluido e a transferência de calor. Por outro lado, valores elevados de N indicam colunas mais largas, nas quais os efeitos de parede são menos relevantes e o comportamento do leito se aproxima do observado no interior da região central.

Verificou-se também que o regime de transferência de calor depende do número de Reynolds, para valores baixos, a condução térmica tem papel dominante, enquanto para valores moderados e elevados, a convecção passa a ser o principal mecanismo de transferência de calor.

Embora os padrões locais de escoamento e temperatura mudem significativamente com N , o coeficiente global de transferência de calor varia pouco, indicando que os efeitos de parede afetam principalmente o comportamento local (Das et al., 2017).

Entretanto, para a queda de pressão, especialmente em colunas com baixa razão entre o diâmetro da coluna e o diâmetro da partícula, a presença da parede exerce influência significativa, pois altera o arranjo das partículas próximas à superfície e modifica o perfil de porosidade, aumentando a resistência ao escoamento (Das et al., 2017).

Adicionalmente, observou-se que a variação da condutividade térmica das partículas sólidas exerce influência limitada sobre o coeficiente global de transferência de calor, especialmente em regimes com maior número de Reynolds, indicando que o transporte convectivo no fluido é o mecanismo predominante e a influência da condutividade térmica das partículas sólidas no resultado global é pequena. Esse comportamento ocorre porque, sob condição de temperatura de parede constante, a transferência de calor é limitada pela pequena área de contato entre as partículas e a parede da coluna e, conseqüentemente, a condução direta pelo sólido contribui minimamente para o processo, tornando o sistema pouco sensível a variações nas propriedades térmicas do material sólido (Das et al., 2017).

Por fim, Das et al. (2017) verificaram se o tamanho da malha utilizada na simulação poderia influenciar os resultados, testando malhas mais refinadas e comparando os valores obtidos. Como os resultados praticamente não mudaram com o refinamento, concluíram que a malha escolhida era adequada e não interferia de forma significativa nos resultados da simulação.

Portanto, esses resultados indicaram que tratar o leito como homogêneo pode levar a erros, pois o empacotamento cria regiões com comportamentos diferentes de escoamento e transferência de calor. Assim, as simulações completamente resolvidas, como as utilizadas por Das et al. (2017), mostram-se essenciais para capturar com precisão essas variações locais e fornecer uma representação mais fiel do comportamento térmico em leitos porosos.

3.5 DETERMINAÇÃO DA CONDUTIVIDADE TÉRMICA EFETIVA POR SONDA TÉRMICA

A transferência de calor em leitos fixos é essencial na Engenharia Química, especialmente em reatores catalíticos e microreatores. Nesses sistemas, partículas sólidas constituem um meio poroso pelo qual o fluido escoar. O processo térmico envolve a combinação de condução no sólido com condução e convecção no fluido. Nesse sentido, a condutividade térmica efetiva surge como um parâmetro macroscópico fundamental, capaz de representar de forma integrada os mecanismos microscópicos de transferência de calor no meio poroso (Ge et al., 2020; Kaviani, 1995).

Nesse contexto, a correta determinação da condutividade térmica efetiva é essencial para o projeto e a operação segura de equipamentos industriais, bem como para a modelagem matemática e a simulação computacional de processos térmicos. Em aplicações modernas, como microreatores, essa necessidade torna-se ainda mais crítica, uma vez que pequenas variações de temperatura podem afetar significativamente o desempenho do sistema, a seletividade de reações químicas e a estabilidade de sistemas biológicos. Entretanto, a medição direta da temperatura interna em leitos fixos é dificultada pelo pequeno tamanho dos dispositivos, pela fragilidade dos materiais e pela possibilidade de perturbação do próprio campo térmico durante a medição (Ge et al. 2020; Pupleschi et al., 2017).

Diante dessas limitações, métodos experimentais baseados em medições transientes de temperatura têm se destacado, em especial o método da sonda térmica. Esse método apresenta vantagens importantes em relação aos métodos em regime estacionário, como menor tempo de medição, maior adaptabilidade a materiais heterogêneos e menor influência da redistribuição de umidade em materiais porosos. Assim, o estudo conduzido por Ge et al. (2020) apresentou uma análise detalhada da condutividade térmica efetiva de materiais porosos constituídos por micropartículas em leitos fixos, utilizando o método da sonda térmica. Dessa forma, esse estudo de caso teve como objetivo compreender como características físicas do leito e variáveis operacionais influenciam a transferência de calor por meio de um método online para a determinação da condutividade térmica efetiva em leitos fixos de micropartículas, utilizando uma sonda térmica e agulha.

Adicionalmente, Ge et al. (2020), buscaram analisar a influência do diâmetro das partículas, da porosidade do leito e das trocas iônicas no comportamento da transferência de calor, bem como verificar, por meio de calibração experimental e simulação numérica, a precisão do método e o impacto da sonda no campo de temperatura do sistema.

Nesse cenário, o dispositivo experimental analisado foi desenvolvido com o objetivo de permitir medições confiáveis em condições próximas às reais de operação. A sonda térmica utilizada apresenta uma estrutura coaxial composta por um termopar de cobre-constantan posicionado no interior de um tubo de aço inoxidável, responsável pela medição precisa da temperatura. O aquecimento foi promovido por um fio de aquecimento de constantan enrolado em espiral ao redor desse tubo, configuração que permite uma geração de calor mais uniforme ao longo da sonda e reduz a formação de gradientes térmicos indesejados (Ge et al., 2020).

Para garantir um contato térmico eficiente entre os componentes e minimizar perdas de calor, foi aplicada graxa termicamente condutora entre os tubos. A fixação no sistema experimental foi realizada por meio de um plugue rosqueado produzido por impressão 3D, o que assegurou maior estabilidade durante os ensaios e maior confiabilidade dos resultados obtidos, além de representar uma solução moderna e de baixo custo para sistemas experimentais de pequeno porte (Ge et al., 2020). A Figura 5 apresenta um diagrama esquemático para ilustrar a configuração da sonda térmica.

Figura 5: Diagrama esquemático da sonda térmica coaxial.

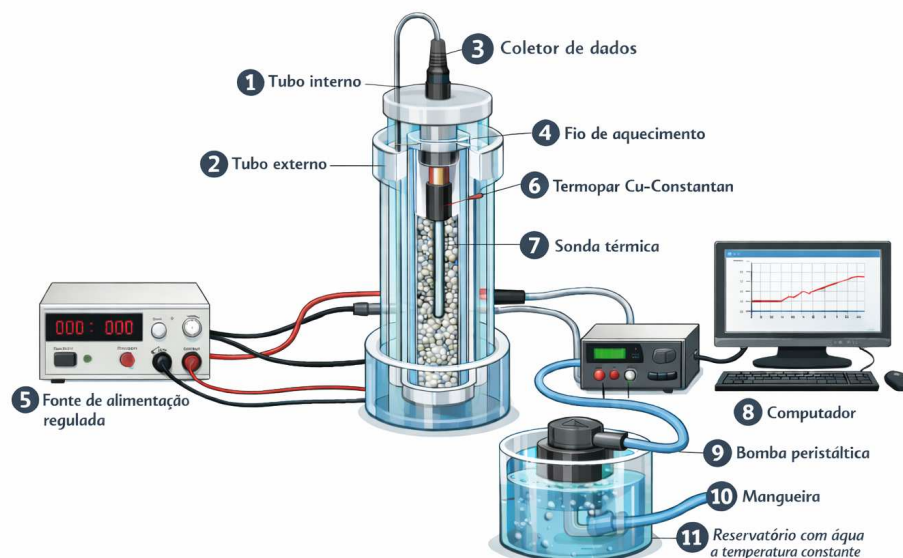


Fonte: Imagem gerada por Inteligência Artificial, baseada em Ge et al. (2020).

Assim, o leito fixo experimental foi construído a partir de um tubo interno de vidro de quartzo transparente, preenchido com micropartículas, e um tubo externo transmissor de infravermelho. Entre esses tubos há um espaço anular preenchido com ar, que atuou como isolamento térmico, reduzindo significativamente as perdas de calor para o ambiente. A condutividade térmica efetiva do leito fixo de micropartículas foi determinada por meio do método da sonda térmica, na qual uma sonda cilíndrica foi posicionada no centro do leito, previamente estabilizado em equilíbrio térmico (Ge et al., 2020).

Durante o experimento, uma potência elétrica constante foi aplicada ao fio de aquecimento da sonda, promovendo a dissipação de calor para o meio. A resposta térmica do sistema, registrada pelo termopar e adquirida por um sistema de aquisição de dados, permitiu a obtenção da curva temperatura *versus* tempo, a partir da qual foi calculada a condutividade térmica efetiva do leito fixo. O conjunto experimental foi envolvido por um tubo externo transparente à radiação infravermelha, o que possibilitou a análise qualitativa do campo de temperatura por meio de uma câmera termográfica. Adicionalmente, um sistema de circulação de água, controlado por uma bomba hidráulica, foi empregado para estabelecer condições de escoamento e garantir maior representatividade de condições operacionais reais. Um esquema representativo do aparato utilizado por Ge et al. (2020) é apresentado na Figura 6.

Figura 6: Esquema do método da sonda térmica aplicado à determinação da condutividade térmica efetiva no reator tubular.



Fonte: Imagem gerada por Inteligência Artificial, baseada em Ge et al. (2020).

Nesse sentido, os ensaios experimentais foram conduzidos, por Ge et al. (2020), em três etapas distintas utilizando partículas de resina de troca catiônica como material de enchimento do leito fixo, as quais foram previamente peneiradas e submetidas a diferentes condições de troca iônica, com o objetivo de investigar se alterações químicas internas poderiam influenciar o transporte de calor. Essas partículas apresentavam estrutura porosa e propriedades químicas que permitiram a troca de íons, característica relevante para processos de separação e reações químicas. Inicialmente, as partículas foram divididas em três grupos, sendo um grupo mantido sem tratamento adicional e os demais tratados por imersão em soluções de bicarbonato de sódio e de cloreto de sódio, de modo a alterar a composição iônica interna da resina.

Na primeira etapa, os experimentos térmicos foram realizados sem escoamento de fluido, utilizando a sonda térmica para aquecer o leito e registrar a resposta de temperatura após a estabilização térmica. Em uma segunda etapa, os ensaios foram repetidos com escoamento de água destilada a baixa vazão e temperatura controlada, injetada no leito por meio de uma bomba peristáltica, a fim de avaliar a influência do escoamento no comportamento térmico do sistema. Por fim, todo o procedimento experimental foi novamente realizado utilizando partículas de menor diâmetro, permitindo analisar o efeito do tamanho das partículas, da porosidade e das condições de troca iônica na condutividade térmica efetiva do leito fixo (Ge et al., 2020).

Para a aplicação do método da sonda térmica, foram adotadas suposições, considerando que o material analisado possuía volume suficientemente grande em relação à sonda, temperatura inicial uniforme e propriedades físicas constantes ao longo do experimento. Assumiu-se ainda que as partículas do leito apresentavam comportamento homogêneo e isotrópico, de modo que a transferência de calor ocorresse de forma semelhante em todas as direções (Ge et al., 2020).

Entretanto, como desvios podem ocorrer devido à diferença entre o modelo teórico e o sistema real, realizou-se a calibração da sonda utilizando o glicerol como amostra padrão, devido à sua condutividade térmica bem estabelecida na literatura e à sua maior estabilidade em ensaios transientes, o que reduz efeitos convectivos indesejados. A razão entre o valor medido experimentalmente e o valor reportado na literatura foi empregada como coeficiente de correção, permitindo ajustar os resultados experimentais (Ge et al., 2020).

A água destilada foi empregada posteriormente para validação do método, confirmando a confiabilidade dos resultados obtidos após a correção dos dados experimentais. Assim, os resultados mostraram que, após a calibração, o erro máximo das medições foi inferior a 2,97%, evidenciando a elevada precisão do método proposto (Ge et al., 2020).

Durante os ensaios, observou-se que a curva de temperatura obtida ao longo do tempo apresentou diferentes comportamentos. No estágio inicial do aquecimento, ocorreu um aumento rápido da temperatura, associado, segundo Ge et al. (2020), à redistribuição da graxa termicamente condutora e à presença de pequenas quantidades de ar na sonda, o que gerou valores de condutividade térmica inconsistentes.

Em seguida, o sistema atingiu uma condição mais estável, na qual o calor foi transferido de forma uniforme do elemento de aquecimento para o material do leito fixo, resultando em valores praticamente constantes de condutividade térmica, considerados representativos do material analisado. Em tempos mais longos, a transferência de calor para a superfície externa do sistema e as perdas térmicas para o ambiente passaram a influenciar as medições, tornando os dados inadequados para análise. Dessa forma, apenas a região estável da curva de temperatura foi utilizada para o cálculo da condutividade térmica efetiva do leito fixo Ge et al. (2020).

Assim, os resultados apresentados de Ge et al. (2020), indicaram que a condutividade térmica efetiva diminuiu com o aumento do tamanho das partículas no estado seco, devido ao aumento da porosidade e, conseqüentemente, da fração de ar no leito, que possui baixa capacidade de condução de calor. Por outro lado, em condição de baixa vazão da água destilada, o aumento do

tamanho das partículas resultou em maior condutividade térmica efetiva, uma vez que os espaços vazios passaram a ser ocupados por água, cuja condutividade térmica é de $0,605 \frac{W}{m \cdot K}$, que é superior à das partículas de resina, de modo que o fluido passa a desempenhar papel dominante no transporte de calor (Incropera et al., 2003). Além disso, o aumento da vazão intensifica os efeitos convectivos, contribuindo para uma maior taxa de transferência de calor no interior do leito.

Por outro lado, a análise do efeito da troca iônica nas partículas de resina revelou que as alterações químicas internas não exerceram influência significativa na condutividade térmica efetiva, tanto em condições secas quanto com escoamento líquido (Ge et al., 2020). Esse resultado possui grande relevância prática, pois indica que processos químicos e biológicos realizados em leitos fixos, como reações catalíticas e sistemas com enzimas imobilizadas, não sofrem interferência térmica significativa decorrente da troca iônica. Dessa forma, a modelagem térmica desses sistemas pode desconsiderar esse efeito, simplificando as análises e os projetos.

Adicionalmente ao método proposto também foi aplicado à medição da condutividade térmica efetiva de solos e areias provenientes de diferentes regiões. Amostras de solo da área urbana de Qingdao e de areia da primeira praia de Qingdao, bem como solo da região de Maidao, foram coletadas e submetidas a um processo de preparo que incluiu secagem ao ar e peneiramento para padronização do tamanho das partículas. Em seguida, as amostras de solo foram divididas em grupos e imersas separadamente em água destilada, solução de Na_2CO_3 a 9% e solução de $NaCl$ a 20%, permanecendo em repouso por um período prolongado (Ge et al., 2020). Essa etapa do estudo demonstrou que o método da sonda térmica é versátil e aplicável não apenas a materiais sintéticos, como resinas, mas também a materiais naturais complexos, ampliando significativamente seu campo de aplicação.

Após esse tratamento, os materiais foram filtrados, secos novamente e preenchidos em leitos fixos com massas iguais, sendo então submetidos às medições de condutividade térmica pelo método da sonda térmica. Em condições secas, os resultados mostraram valores praticamente constantes de condutividade térmica efetiva para um mesmo material, evidenciando a influência predominante das características físicas do meio poroso, como tamanho de partícula e porosidade (Ge et al., 2020).

Os resultados apresentados indicaram que a condutividade térmica efetiva das partículas de resina em condições secas foi de $0,1489 \frac{W}{m \cdot K}$, valor que se encontra na mesma ordem de grandeza daqueles reportados na literatura para materiais semelhantes, cujos valores variam aproximadamente

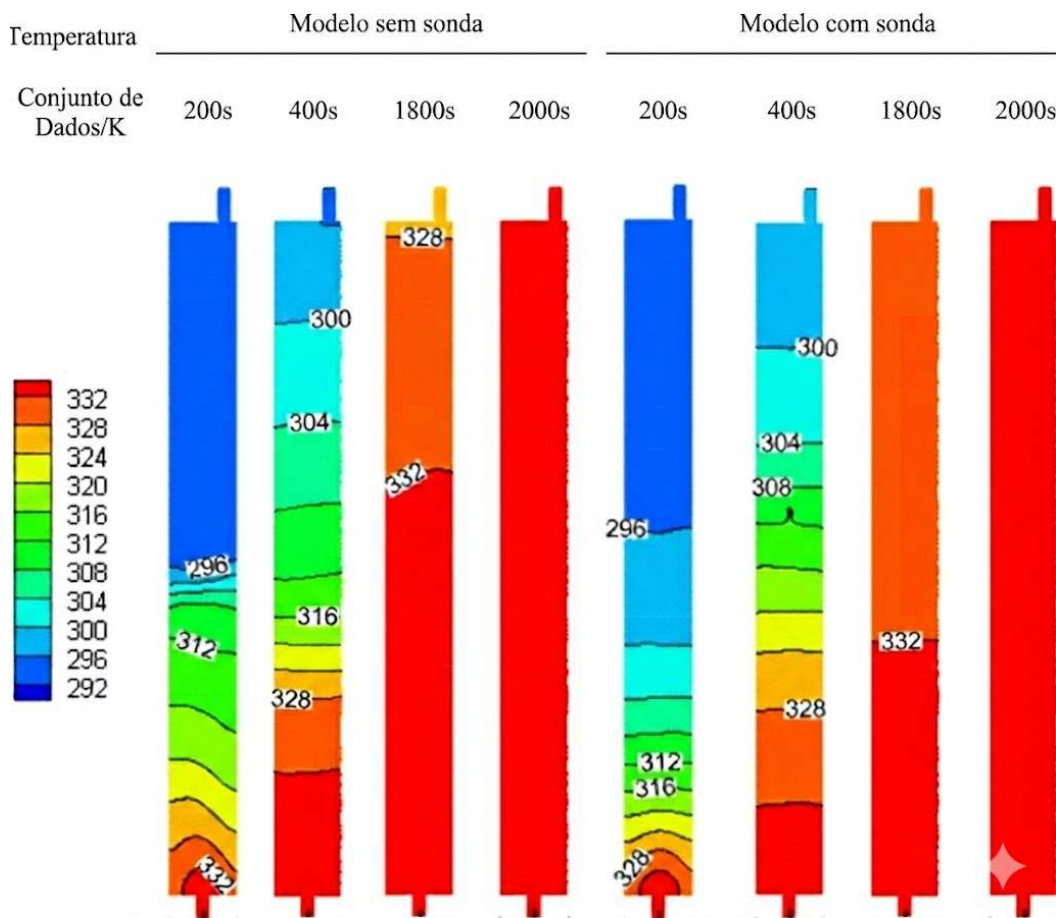
entre $0,11$ e $0,20 \frac{W}{m \cdot K}$, como exemplo a resina de troca catiônica Purolite, que possui o valor de $0,111 \frac{W}{m \cdot K}$ de acordo com Xu et al. (2011) (Ge et al., 2020). Essa proximidade confirma que o valor obtido experimentalmente é fisicamente consistente, as diferenças observadas nos valores de condutividade térmica podem ser atribuídas às variações na porosidade, na estrutura dos materiais e nas condições experimentais adotadas em cada estudo.

De forma semelhante, para os materiais naturais, a condutividade térmica efetiva obtida para o solo urbano seco foi de $0,023 \frac{W}{m \cdot K}$, enquanto a areia da praia apresentou $0,028 \frac{W}{m \cdot K}$ e o solo de Maidao $0,021 \frac{W}{m \cdot K}$. Esses resultados são compatíveis com dados reportados por outros autores para solos e areias secas, que apresentam valores próximos, como Yang et al. (2010), que reportou valores de condutividade térmica de $0,1924 \frac{W}{m \cdot K}$ para solo puro com 15% de umidade e de $0,2701 \frac{W}{m \cdot K}$ para areia de rio seca (Ge et al. 2020). Embora diferenças possam ocorrer devido a fatores como composição mineralógica, teor de umidade, tamanho médio das partículas e porosidade do leito, os dados obtidos foram próximos a outros da literatura.

Complementarmente aos experimentos, foram realizadas simulações numéricas tridimensionais utilizando ferramentas de dinâmica dos fluidos computacional. Modelos de leito fixo com e sem a presença da sonda térmica foram desenvolvidos, permitindo a análise do campo de temperatura sob condições operacionais idênticas às dos experimentos. Esse resultado confirma que o método de medição é pouco intrusivo e não compromete a validade dos dados experimentais, conforme a Figura 7.

A saída de água localizava-se no topo do leito fixo em função da configuração do escoamento axial adotada no modelo, na qual o fluido é introduzido pela base e percorre verticalmente o meio poroso até deixar o sistema pela extremidade superior. Durante o regime transiente, especialmente nos instantes intermediários da simulação, a diferença de temperatura observada concentrou-se principalmente nas proximidades da saída de água, associada à maior condutividade térmica do aço inoxidável em relação às partículas de resina, enquanto os perfis axiais e radiais médios permaneceram praticamente inalterados quando comparados ao modelo sem sonda (Ge et al., 2020).

Figura 7: Distribuição espacial da temperatura no leito fixo com a presença e a ausência de sonda térmica.



Fonte: Imagem extraída de Ge et al. (2020).

Por fim, aos 2000 s ambos os sistemas atingiram o regime permanente, apresentando temperatura homogênea de 333 K, o que validou a convergência da simulação com as condições estabelecidas (Ge et al., 2020). Dessa forma, a sonda provocou apenas alterações locais no campo térmico, sem impacto significativo na temperatura média do leito. Esse resultado confirma que o método de medição é pouco intrusivo e não compromete a validade dos dados experimentais, além de indicar que o modelo numérico empregado é capaz de representar adequadamente o comportamento térmico global do sistema.

Entretanto, esse método apresenta algumas limitações. A principal delas está relacionada às hipóteses simplificadoras do modelo teórico utilizado, como a consideração de meio infinito,

propriedades térmicas constantes e distribuição homogênea de temperatura, condições que nem sempre são plenamente atendidas em leitos fixos reais, especialmente em sistemas de dimensões reduzidas. Além disso, a presença da sonda, embora pouco intrusiva, pode alterar localmente o empacotamento das partículas e o escoamento do fluido, influenciando pontualmente o campo térmico (Ge et al., 2020).

Outro desafio foi garantir que a sonda estivesse completamente isolada de efeitos de parede, já que em dispositivos estreitos, o calor pode atingir as paredes laterais rapidamente, distorcendo a curva de aquecimento, violando a hipótese de meio infinito e distorcendo a estimativa da condutividade térmica. Esse fenômeno exigiu que o diâmetro do dispositivo fosse algumas vezes maior que o da sonda (Ge et al., 2020).

Além disso, os experimentos foram conduzidos predominantemente em baixas vazões e sem considerar variações locais de porosidade ao longo do leito, e considerando que a sonda gera um campo térmico radial idealizado, mas na prática o empacotamento ao redor da agulha pode causar assimetrias, não conduzindo o calor uniformemente em todas as direções (Ge et al., 2020).

Dessa forma, estudos futuros podem desenvolver sondas com diâmetros ainda menores e materiais de maior compatibilidade térmica com o meio poroso, bem como a incorporação de modelos teóricos mais avançados que considerem efeitos de convecção natural, variações locais de porosidade e vazões mais elevadas, ampliando a aplicabilidade industrial da metodologia.

Portanto, apesar das limitações, o artigo de Ge et al. (2020) contribuiu significativamente para a determinação da condutividade térmica efetiva em leitos porosos de micropartículas. A integração entre experimento e validação numérica conferiu confiabilidade ao método, ampliando a compreensão da transferência de calor em meios porosos.

3.6 ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE OS TRÊS ESTUDOS

A transferência de calor em reatores de leito fixo pode ser investigada por diferentes estratégias experimentais e numéricas. Neste contexto, este trabalho comparou os trabalhos de Jorge et al. (1999), Das et al. (2017) e Ge et al. (2020), permitindo evidenciar a evolução das metodologias empregadas e o tipo de contribuição que cada abordagem pode oferecer para a Engenharia Química.

O estudo de Jorge et al. (1999) apresentou uma contribuição fundamental ao propor uma decomposição clara das resistências térmicas envolvidas na transferência de calor em reatores de leito fixo, permitindo compreender a importância relativa das resistências externa, da parede do reator e do leito catalítico. Essa formulação é relevante para o dimensionamento térmico de reatores tubulares aquecidos externamente, pois permite que o engenheiro identifique em diferentes faixas de temperatura qual etapa controla o transporte de calor com base nas resistências e, assim, orientar decisões de projeto, como melhorias no sistema de aquecimento ou na geometria do reator.

Entretanto, sua abordagem é fortemente dependente de medições globais e de hipóteses simplificadoras sobre perfis térmicos médios, além de apresentar limitações práticas relacionadas à dificuldade experimental de medir a temperatura da parede ao longo do reator. Essas simplificações tendem a mascarar efeitos locais importantes, como a formação de zonas preferenciais de escoamento e variações espaciais de porosidade, que podem alterar significativamente os mecanismos de transferência de calor.

Assim, embora extremamente relevante para projetos preliminares de reatores, o estudo não captura com precisão os efeitos locais do meio poroso, o que limita sua aplicabilidade em situações com não uniformidades estruturais. Nesse sentido, trabalhos mais recentes baseados em simulações numéricas surgem como complementares, pois permitem acessar informações microscópicas que não são capturadas por abordagens macroscópicas.

Por sua vez, o trabalho de Das et al. (2017) representou avanço ao empregar simulações numéricas totalmente resolvidas, capazes de capturar variações locais de escoamento e transferência de calor em leitos empacotados tridimensionais. Os resultados indicaram que modelos que consideram o leito como uniforme têm limitações para representar corretamente regiões próximas à parede e zonas com empacotamento mais ordenado, mostrando a importância da estrutura interna do leito nos mecanismos de transferência de calor.

Esse tipo de abordagem possui grande valor como ferramenta de análise fundamental, pois permite compreender os mecanismos microscópicos que dão origem aos parâmetros efetivos utilizados em modelos macroscópicos. Dessa forma, os estudos numéricos totalmente resolvidos não substituem modelos globais de projeto, mas os complementam, fornecendo base física para o desenvolvimento de correlações mais complexas e para a interpretação de desvios observados em dados experimentais de reatores de leito fixo.

No entanto, apesar de sua elevada fidelidade física, trata-se de uma metodologia computacionalmente custosa e pouco compatível com as demandas de projeto e de tomada de decisão rápida típicas da prática industrial. Nesse sentido, surge a necessidade de métodos experimentais mais simples, rápidos e aplicáveis em dispositivos reais, capazes de medir diretamente propriedades termofísicas de forma prática e em condições operacionais representativas.

Nesse contexto, o estudo de Ge et al. (2020) apresentou avanços relevantes em relação aos dois trabalhos anteriores ao propor um método experimental direto, online e de baixo custo para a determinação da condutividade térmica efetiva em leitos fixos de micropartículas. Diferentemente da abordagem global de Jorge et al. (1999), o método da sonda térmica permite obter um parâmetro térmico macroscópico a partir de medições transientes locais, com elevada precisão após calibração experimental. Em comparação com as simulações totalmente resolvidas de Das et al. (2017), o método proposto por Ge et al. (2020) destaca-se por sua viabilidade prática, rapidez de aplicação e potencial de uso em ambientes laboratoriais e industriais, inclusive em microreatores e sistemas de dimensões reduzidas.

Além disso, o trabalho de Ge et al. (2020) apresenta melhorias metodológicas importantes, como a validação cruzada entre experimento e simulação numérica, a análise da intrusividade da sonda térmica e a verificação de que sua presença não altera significativamente o campo térmico médio do leito. A calibração com fluidos de referência e a avaliação sistemática de incertezas reforçam a confiabilidade do método, enquanto a aplicação a diferentes materiais como resinas de troca iônica, solos e areias amplia o seu campo de aplicabilidade. Esses aspectos representam um avanço em relação às abordagens anteriores, que ou dependem fortemente de simplificações globais (Jorge et al., 1999) ou são de difícil implementação prática em escala aplicada (Das et al., 2017).

Dessa forma, a Tabela 2 permite uma visualização integrada das contribuições, vantagens e limitações de cada abordagem, servindo como base para a discussão crítica apresentada neste trabalho e para a compreensão do estado da arte sobre transferência de calor em leitos fixos.

Tabela 2 – Comparação entre as metodologias e resultados dos estudos analisados.

Critério	Jorge et al. (1999)	Das et al. (2017)	Ge et al. (2020)
Abordagem	Experimental e Modelagem Global	Simulação Numérica Direta (DNS/IBM)	Experimental (Sonda Térmica) e CFD
Objetivo	Resistências térmicas e coeficientes globais.	Escoamento e calor local em poros.	Condutividade térmica efetiva local.
Escala	Macroscópica (Global).	Microscópica (Local).	Mesoscópica (Local).
Principais resultados	Parede desprezível; resistência externa limita a baixas temperaturas.	O empacotamento na parede altera os padrões locais de escoamento.	Baixo custo e alta precisão; troca iônica não afeta troca térmica.
Limitações	Mascara efeitos locais e variações de porosidade.	Alto custo computacional para projetos rápidos.	Hipótese de meio infinito e intrusividade da sonda.

Fonte: Elaborado pela autora.

As limitações identificadas no próprio estudo, como as hipóteses simplificadoras do modelo teórico, os efeitos locais da presença da sonda e a restrição a baixas vazões, indicam que o método ainda pode ser aprimorado. Esses pontos evidenciam oportunidades para estudos futuros voltados ao desenvolvimento de sondas menos intrusivas e aplicações em regimes de escoamento e geometrias mais próximos dos sistemas industriais.

3.7 PERSPECTIVAS PARA ESTUDOS FUTUROS

Apesar dos avanços apresentados, a análise comparativa evidencia diversas oportunidades para aprofundamento das investigações sobre transferência de calor em reatores de leito fixo. Estudos futuros podem concentrar-se no desenvolvimento de metodologias híbridas que integrem abordagens experimentais e numéricas, buscando aliar a precisão das simulações de alta resolução com a aplicabilidade prática de técnicas experimentais. Nesse contexto, a utilização de ferramentas como CFD acopladas a dados experimentais em tempo real pode contribuir para a construção de modelos mais robustos e representativos.

Adicionalmente, há espaço para o aprimoramento do método da sonda térmica, especialmente no que se refere à redução de sua intrusividade e à validação em condições mais próximas das industriais, como regimes turbulentos, altas temperaturas e presença de reações químicas. A investigação de novos materiais e geometrias de sondas, bem como o uso de técnicas de medição não invasivas, como termografia infravermelha ou sensores distribuídos, também representa uma direção promissora.

Outro ponto relevante envolve a consideração de não idealidades estruturais dos leitos, como distribuição de tamanho de partículas, empacotamento não uniforme e efeitos de escala, que ainda são pouco explorados em modelos clássicos. A incorporação desses fatores pode levar ao desenvolvimento de correlações mais realistas para coeficientes de transferência de calor e propriedades efetivas.

Por fim, destaca-se a importância de estudos voltados à aplicação industrial, com foco na validação de modelos em unidades piloto e em escala real. Essas investigações podem contribuir significativamente para o projeto mais eficiente e seguro de reatores, especialmente em processos que demandam controle térmico rigoroso.

4 CONCLUSÃO

Portanto, diante das análises realizadas, é possível afirmar que os objetivos propostos neste trabalho foram atendidos. Este trabalho analisou, de forma integrada, três abordagens complementares para o estudo da transferência de calor em reatores de leito fixo, a análise experimental macroscópica de Jorge et al. (1999), as simulações numéricas totalmente resolvidas de Das et al. (2017) e o método experimental transiente por sonda térmica proposto por Ge et al. (2020). Dessa forma, nenhuma abordagem, isoladamente, foi suficiente para descrever plenamente a complexidade dos fenômenos térmicos em meios porosos.

Assim, a comparação entre as diferentes abordagens para o estudo da transferência de calor em reatores de leito fixo permitiu compreender como métodos experimentais clássicos, simulações numéricas totalmente resolvidas e técnicas modernas de medição da condutividade térmica efetiva se complementam na descrição do comportamento térmico do leito.

Nesse contexto, cada abordagem mostrou contribuições específicas: os modelos experimentais globais fornecem base para o projeto preliminar, as simulações totalmente resolvidas permitem entender os efeitos locais da microestrutura do empacotamento e os métodos experimentais modernos oferecem alternativas práticas e rápidas para obtenção de propriedades térmicas em sistemas reais.

Por fim, a compreensão combinada dos fenômenos em diferentes escalas permite projetar reatores de leito fixo mais eficientes e seguros do ponto de vista térmico, contribuindo diretamente para o desempenho e a confiabilidade de processos industriais. Essa integração metodológica representa um caminho promissor para aproximar a pesquisa acadêmica e aplicação industrial em sistemas de leitos fixos.

REFERÊNCIAS

BIRD, R. B.; STEWART, W. E.; LIGHTFOOT, E. N. **Transport phenomena**. 2. ed. New York: John Wiley & Sons, 2004.

ÇENGEL, Y. A.; GHAJAR, A. J. **Transferência de Calor e Massa: Uma Abordagem Prática**. 4. ed. Porto Alegre: AMGH, 2012.

DAS, S; DEEN, N G.; KUIPERS, J. A. M. A DNS study of flow and heat transfer through slender fixed-bed reactors randomly packed with spherical particles. **Chemical Engineering Science**, v. 160, 2017. DOI: 10.1016/j.ces.2016.11.008. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0009250916306005>. Acesso em: 16 dez. 2025.

ERGUN, S. **Fluid flow through packed columns**. Chemical Engineering Progress, v. 48, 1952.

FOUST, A. S.; WENZEL, L. A.; CLUMP, C. W.; MAUS, L.; ANDERSEN, L. B. **Principles of unit operations**. New York: John Wiley & Sons, 1960.

FOX, R. W.; McDONALD, A. T.; PRITCHARD, P. J. **Introduction to Fluid Mechanics**. 8. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2011.

FREEZE, R. A.; CHERRY, J. A. **Groundwater**. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1979.

FREIRE, J. T.; SILVEIRA, A. M. **Fenômenos de transporte em sistemas particulados: fundamentos e aplicações**. Rio de Janeiro: Interciência, 2009.

GE, R; ZHENG, Y. Measuring effective thermal conductivity of micro-particle porous materials in fixed bed by thermal probe method. **Heat and Mass Transfer**, v. 56, 2020. DOI: 10.1007/s00231-020-02892-z. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00231-020-02892-z>. Acesso em: 16 dez. 2025.

GEANKOPLIS, C. J. **Transport processes and unit operations**. 3. ed. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1993.

INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P. **Transferência de calor e massa**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2003.

JORGE, L. M. M.; JORGE, R. M. M.; FUJII, F.; GIUDICI, R. Evaluation of heat transfer in a catalytic fixed bed reactor at high temperatures. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, São Paulo, v. 16, n. 4, dez. 1999. DOI: 10.1590/S0104-66321999000400009. Disponível em: <https://www.scielo.br/bjce/a/JrR67NfgjvLQTHrfwZf7qR/?format=html&lang=en>. Acesso em: 16 dez. 2025.

KAVIANY, M. **Principles of heat transfer in porous media**. 2. ed. New York: Springer-Verlag, 1995.

KUNII, D.; LEVENSPIEL, O. **Fluidization engineering**. 2. ed. Boston: Butterworth-Heinemann, 1991.

MCCABE, W. L.; SMITH, J. C.; HARRIOTT, P. **Operações unitárias em Engenharia Química**. 4. ed. Madrid: McGraw-Hill Interamericana de España, 1991.

NIELD, D. A.; BEJAN, A. **Convection in Porous Media**. 2. ed. New York: Springer, 1999.

PERRY, R. H.; GREEN, D. W.; MALONEY, J. O. **Perry's chemical engineers' handbook**. 7. ed. New York: McGraw-Hill Professional, 1997.

PORTO, R. **Hidráulica básica**. 4. ed. São Carlos: EESC-USP, 2006.

PUPESCHI, S.; KNITTER, R.; KAMLAH, M. Condutividade térmica efetiva de leitos de seixos reprodutores de cerâmica avançada. **Journal of Nuclear Materials**, Karlsruhe, v. 486, 2017. DOI: 10.1016/j.fusengdes.2017.01.026. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0920379617300364>. Acesso em: 16 dez. 2025.

WHITE, F. M. *Fluid Mechanics*. 7. ed. New York: McGraw-Hill, 2011.

XU, Y.; WANG, L. P.; ZHONG, Y. Q.; ZHENG, Y.-H. **Experimental research on temperature distributions and effective thermal parameters of micro-particle packed bed with low velocity fluid**. Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities, 2011.

YANG, W. B.; DING, Y. F.; GUAN, L. J. **Measurement of thermal conductivity of wet soil by the heated probe method**. Refrigeration, Air Conditioning & Electric Power Machinery, 2010.

ZIOLKOWSKA, I.; ZIOLKOWSKI, D. Fluid flow inside packed beds. **Chemical Engineering and Processing: Process Intensification**, v. 23, 1988. DOI: 10.1016/0255-2701(88)80012-6.

Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0255270188800126>. Acesso em: 16 dez. 2025.