



# Impactos das Tecnologias na Engenharia Química

---

Carmen Lúcia Voigt  
(Organizadora)

**Atena**  
Editora

Ano 2019

Carmen Lúcia Voigt  
(Organizadora)

# Impactos das Tecnologias na Engenharia Química

Atena Editora  
2019

2019 by Atena Editora

Copyright © da Atena Editora

Editora Chefe: Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

Diagramação e Edição de Arte: Natália Sandrini e Lorena Prestes

Revisão: Os autores

### Conselho Editorial

- Prof. Dr. Alan Mario Zuffo – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul  
Prof. Dr. Álvaro Augusto de Borba Barreto – Universidade Federal de Pelotas  
Prof. Dr. Antonio Carlos Frasson – Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Prof. Dr. Antonio Isidro-Filho – Universidade de Brasília  
Profª Drª Cristina Gaio – Universidade de Lisboa  
Prof. Dr. Constantino Ribeiro de Oliveira Junior – Universidade Estadual de Ponta Grossa  
Profª Drª Daiane Garabeli Trojan – Universidade Norte do Paraná  
Prof. Dr. Darllan Collins da Cunha e Silva – Universidade Estadual Paulista  
Profª Drª Deusilene Souza Vieira Dall’Acqua – Universidade Federal de Rondônia  
Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Prof. Dr. Fábio Steiner – Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul  
Prof. Dr. Gianfábio Pimentel Franco – Universidade Federal de Santa Maria  
Prof. Dr. Gilmei Fleck – Universidade Estadual do Oeste do Paraná  
Profª Drª Girlene Santos de Souza – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia  
Profª Drª Ivone Goulart Lopes – Istituto Internazionele delle Figlie de Maria Ausiliatrice  
Profª Drª Juliane Sant’Ana Bento – Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Prof. Dr. Julio Candido de Meirelles Junior – Universidade Federal Fluminense  
Prof. Dr. Jorge González Aguilera – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul  
Profª Drª Lina Maria Gonçalves – Universidade Federal do Tocantins  
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte  
Profª Drª Paola Andressa Scortegagna – Universidade Estadual de Ponta Grossa  
Profª Drª Raissa Rachel Salustriano da Silva Matos – Universidade Federal do Maranhão  
Prof. Dr. Ronilson Freitas de Souza – Universidade do Estado do Pará  
Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista  
Prof. Dr. Urandi João Rodrigues Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará  
Prof. Dr. Valdemar Antonio Paffaro Junior – Universidade Federal de Alfenas  
Profª Drª Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande  
Profª Drª Vanessa Lima Gonçalves – Universidade Estadual de Ponta Grossa  
Prof. Dr. Willian Douglas Guilherme – Universidade Federal do Tocantins

#### Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) (eDOC BRASIL, Belo Horizonte/MG)

I34 Impactos das tecnologias na engenharia química [recurso eletrônico] /  
Organizadora Carmen Lúcia Voigt. – Ponta Grossa (PR): Atena  
Editora, 2019. – (Impactos das Tecnologias na Engenharia  
Química; v. 1)

Formato: PDF  
Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader.  
Modo de acesso: World Wide Web.  
Inclui bibliografia  
ISBN 978-85-7247-237-1  
DOI 10.22533/at.ed.371190304

1. Engenharia química – Pesquisa – Brasil. I. Voigt, Carmen  
Lúcia. II. Série.

CDD 660.76

**Elaborado por Maurício Amormino Júnior – CRB6/2422**

O conteúdo dos artigos e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de  
responsabilidade exclusiva dos autores.

2019

Permitido o download da obra e o compartilhamento desde que sejam atribuídos créditos aos  
autores, mas sem a possibilidade de alterá-la de nenhuma forma ou utilizá-la para fins comerciais.

[www.atenaeditora.com.br](http://www.atenaeditora.com.br)

## APRESENTAÇÃO

Inovações tecnológicas surgem a todo o momento, em todo o mundo, sendo utilizadas como uma ferramenta estratégica para manutenção e crescimento dos negócios nas indústrias. A Engenharia Química foi uma das carreiras que mais contribuiu para a evolução da Era Industrial para a Era Moderna.

A preocupação em desenvolver produtos e processos de produção torna a Engenharia Química responsável por pesquisas e projetos em relação aos materiais que passam por mudanças físicas e químicas, adquirindo outras características.

A Engenharia Química trabalha com a manipulação de compostos e substâncias para se criar novos produtos. Estes produtos proporcionam uma melhoria na qualidade de vida humana, pois além de pesquisas relacionadas, existe a preocupação em viabilizar as invenções, criar métodos baratos e eficientes de fabricação em massa, implementando processos químico-industriais cada vez melhores, mais econômicos e mais ecológicos.

Neste primeiro volume, organizado para você, apresentamos o papel do Engenheiro Químico no mercado de trabalho, pois este aplica conhecimentos adquiridos no estudo de Química e de Engenharia para criar soluções voltadas à produção ou ao uso de substâncias químicas. É o profissional que constrói um elo entre a ciência e a manufatura. Cabe ao engenheiro químico lidar com a formulação e a solução de problemas associados à indústria química, bem como trabalhar na operação e manutenção de sistemas. Também são expostos, neste volume, trabalhos relacionados ao ensino teórico e prático de Engenharia Química.

Além disso, encontram-se trabalhos relacionados com aplicações estatísticas, simulações e otimização de processos para melhoria de utilização de produtos e subprodutos. Assim como são expostos trabalhos de caracterização de materiais e alterações em processos químicos utilizando novas técnicas de análise de produto, avaliando comportamento, característica de sistemas, propriedades físico-químicas e alteração de composição de produtos já utilizados no mercado.

Baseado nestes trabalhos, convidamos você a aperfeiçoar seus conhecimentos na área da Engenharia Química. Os trabalhos selecionados oportunizam uma nova visão de materiais, processos e técnicas na área, mostrando o impacto tecnológico no desenvolvimento da indústria e sua relação direta com a sociedade e meio ambiente.

Boa leitura.

Carmen Lúcia Voigt

## SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1</b> .....	<b>1</b>
O PAPEL DO ENGENHEIRO QUÍMICO NO MERCADO DE TRABALHO: PRODUÇÃO DE UM GUIA PRÁTICO DIGITAL DESTINADO AOS GRADUANDOS E DEMAIS INTERESSADOS NA PROFISSÃO	
Raphael Carlos Rosa Pereira Eder Dias da Silva	
<b>DOI 10.22533/at.ed.3711903041</b>	
<b>CAPÍTULO 2</b> .....	<b>8</b>
GAMEQ: JOGO PARA O ENSINO NA ENGENHARIA QUIMICA	
Riccardo Cafagna Miguel do Valle Fróes Negreiros Falcão Felipe Emmanouil Martires Stamoglou Ana Lucia Barbosa de Souza Ewerton Emmanuel da Silva Calixto Fernando Luiz Pellegrini Pessoa	
<b>DOI 10.22533/at.ed.3711903042</b>	
<b>CAPÍTULO 3</b> .....	<b>17</b>
ELABORAÇÃO E AUTOMAÇÃO DE PROTÓTIPO DE REATOR CSTR CONSTRUÍDO COM MATERIAIS DE BAIXO CUSTO VOLTADO À EDUCAÇÃO DE ENGENHARIA QUÍMICA	
Cristiane Daliassi Ramos de Souza Sauro Franceschi de Carvalho Emeson de Souza Lemos Kevelyn Carolina Motta Sbravati	
<b>DOI 10.22533/at.ed.3711903043</b>	
<b>CAPÍTULO 4</b> .....	<b>27</b>
PROJETO DE DIMENSIONAMENTO DE MÓDULO CONTÍNUO A PARTIR DE MATERIAIS DE BAIXO CUSTO COMO IMPLEMENTAÇÃO DO ENSINO EXPERIMENTAL DE ENGENHARIA QUÍMICA	
Cristiane Daliassi Ramos de Souza Igor Moraes Bezerra Calixto Sauro Franceschi de Carvalho Matheus Macedo Teixeira Rafaela Misseia Cinque de Lima Marco Antônio de Alcântara Rocha	
<b>DOI 10.22533/at.ed.3711903044</b>	
<b>CAPÍTULO 5</b> .....	<b>36</b>
O SIMULADOR DO FUTURO APLICADO À INDÚSTRIA	
Fernanda Martins	
<b>DOI 10.22533/at.ed.3711903045</b>	
<b>CAPÍTULO 6</b> .....	<b>43</b>
TERMODINÂMICA QUÍMICA – COMPREENDENDO DE FORÇAS INTERMOLECULARES A COEFICIENTE DE ATIVIDADE	
Lisandra Ferreira de Lima Admilson Lopes Vieira	
<b>DOI 10.22533/at.ed.3711903046</b>	

<b>CAPÍTULO 7 .....</b>	<b>53</b>
DETERMINAÇÃO DE CURVAS DE EQUILÍBRIO SÓLIDO-LÍQUIDO DE SOLVENTES EUTÉTICOS PROFUNDOS (DES) EMPREGANDO A CALORIMETRIA EXPLORATÓRIA DIFERENCIAL (DSC)	
Helena Pletsch Mariana Carolina Gipiela Corrêa Dias Marcos Rogério Mafra	
<b>DOI 10.22533/at.ed.3711903047</b>	
<b>CAPÍTULO 8 .....</b>	<b>59</b>
ANÁLISE E DIAGNÓSTICO DE FALHAS POR TÉCNICAS ESTATÍSTICAS APLICADAS A SISTEMAS DE BOMBEAMENTO HIDRÁULICO	
Rebeca Albino de Jesus Ezequiel José da Silva Honorato Fábio George Nogueira Cruz José Nilton Silva	
<b>DOI 10.22533/at.ed.3711903048</b>	
<b>CAPÍTULO 9 .....</b>	<b>73</b>
COMPARAÇÃO DE PERFIS DE VELOCIDADE OBTIDOS POR TUBO DE PITOT E POR SOFTWARE DE SIMULAÇÃO ANSYS CFX	
Victor Felipe Arthur Coutinho Ladeia Rosilanny Soares Carvalho Anna Clara Marques de Queiroz João Carlos Gonçalves	
<b>DOI 10.22533/at.ed.3711903049</b>	
<b>CAPÍTULO 10 .....</b>	<b>80</b>
ENGENHARIA DE PROCESSOS: DIMENSIONAMENTO, SIMULAÇÃO E ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DE SISTEMAS DE EVAPORAÇÃO MÚLTIPLO EFEITO DE INDÚSTRIAS DE CELULOSE <i>KRAFT</i>	
Jamilly Marques Gasparoni Cássia Regina Santos Nunes Almeida Gustavo Matheus de Almeida	
<b>DOI 10.22533/at.ed.37119030410</b>	
<b>CAPÍTULO 11 .....</b>	<b>96</b>
PROJETO DE HIDROCICLONES USANDO OTIMIZAÇÃO ROBUSTA E ESTUDO DO EFEITO DA ROBUSTEZ	
Vitor Alves Garcia Fran Sérgio Lobato Luiz Gustavo Martins Vieira	
<b>DOI 10.22533/at.ed.37119030411</b>	
<b>CAPÍTULO 12 .....</b>	<b>111</b>
SELEÇÃO DE VARIÁVEIS E CONTROLE DE COMPOSIÇÃO POR INFERÊNCIA DE TEMPERATURA EM PROCESSO PRODUTIVO DO ETILBENZENO	
Arioston Araújo de Moraes Júnior Leopoldo Oswaldo Alcazar Rojas Paulo Romero de Araujo Mariz Emanuella Francisca de Lacerda Vieira Marcelo da Silva Pedro Jonas Laedson Marinho da Silva Santos	
<b>DOI 10.22533/at.ed.37119030412</b>	

<b>CAPÍTULO 13</b> .....	<b>119</b>
INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DE PH, TEMPERATURA E TEMPO DE VAPORIZAÇÃO NO PROCESSO DE TINGIMENTO DE TECIDOS	
Wanyr Romero Ferreira Wilson Costa Resende Aline Pereira Leite Nunes	
<b>DOI 10.22533/at.ed.37119030413</b>	
<b>CAPÍTULO 14</b> .....	<b>128</b>
ANÁLISE CORROSIVA DO AÇO 304 QUANDO SUBMETIDO AO PROCEDIMENTO DE GALVANOPLASTIA	
Renata de Oliveira Marinho Marcelo Batista Queiroz Eudesio Oliveira Vilar Márcia Cristina de Sousa	
<b>DOI 10.22533/at.ed.37119030414</b>	
<b>CAPÍTULO 15</b> .....	<b>140</b>
EFEITO DA DENSIDADE DE CORRENTE NO PROCESSO DE OBTENÇÃO DE REVESTIMENTOS DE Co-W OBTIDOS POR ELETRODEPOSIÇÃO	
Arthur Filgueira de Almeida Bianca Oliveira Evaristo Josiane Dantas Costa Mikarla Baía de Sousa Nathália Cristina Morais Lia Fook Renato Alexandre Costa de Santana Ana Regina Nascimento Campos	
<b>DOI 10.22533/at.ed.37119030415</b>	
<b>CAPÍTULO 16</b> .....	<b>148</b>
FILTRO DE KALMAN ESTENDIDO E REDE NEURAL ARTIFICIAL NA ESTIMATIVA DE CONCENTRAÇÃO EM UM REATOR QUÍMICO NÃO ISOTÉRMICO	
Arioston Araújo de Moraes Júnior Leopoldo Oswaldo Alcazar Rojas Marcelo da Silva Pedro Paulo Romero de Araujo Mariz Emanuella Francisca de Lacerda Vieira Jonas Laedson Marinho da Silva Santos Rodrigo Marinho Guimarães	
<b>DOI 10.22533/at.ed.37119030416</b>	
<b>CAPÍTULO 17</b> .....	<b>153</b>
COMPÓSITO DE NANOCELULOSE BACTERIANA E NANOTUBOS DE CARBONO	
Guilherme Colla Vinícius Heidemann de Souza Fernanda Vieira Berti Luismar Marques Porto	
<b>DOI 10.22533/at.ed.37119030417</b>	

<b>CAPÍTULO 18</b> .....	<b>160</b>
IMOBILIZAÇÃO DE COLÁGENO HUMANO TIPO I EM MEMBRANAS DE NANOCELULOSE BACTERIANA	
Ana Carolina Jorge Meyer Emily Marques dos Reis Luismar Marques Porto	
<b>DOI 10.22533/at.ed.37119030418</b>	
<b>CAPÍTULO 19</b> .....	<b>167</b>
CENTRIFUGATION STEP CONTROL OF CELLULOSE NANOCRYSTALS SUSPENSION BY pH AND TURBIDITY MEASUREMENTS	
Mayara Felix Santana Bárbara Castro Moreira Flávia Mitsue Yamashita Nilda de Fátima Ferreira Soares José Mauro de Almeida Alvaro Vianna Novaes de Carvalho Teixeira Deusanilde de Jesus Silva	
<b>DOI 10.22533/at.ed.37119030419</b>	
<b>CAPÍTULO 20</b> .....	<b>173</b>
ESTUDO TERMODINÂMICO DA ADSORÇÃO DO CORANTE CRISTAL VIOLETA EM NANOTUBOS DE CARBONO FUNCIONALIZADOS	
Leonardo Martins Vargas Gabriel Facciochi Dörtzbacher Guilherme Luiz Dotto	
<b>DOI 10.22533/at.ed.37119030420</b>	
<b>CAPÍTULO 21</b> .....	<b>181</b>
ESTUDO DA REOLOGIA E DA SALINIDADE DE MICROEMULSÕES À BASE DE GLICERINA PARA SEREM UTILIZADAS NA RECUPERAÇÃO DE PETRÓLEO	
Amanda Brito de Carvalho Fabiola Dias da Silva Curbelo Elayne Andrade Araújo Alfredo Ismael Curbelo Garnica	
<b>DOI 10.22533/at.ed.37119030421</b>	
<b>CAPÍTULO 22</b> .....	<b>196</b>
ORGANOFILIZAÇÃO DE ARGILAS BENTONÍICAS PARA APLICAÇÃO EM FLUIDOS DE PERFURAÇÃO BASE MICROEMULSIONADA	
Renata Rodrigues Magalhães Roxana Pereira Fernandes de Sousa Alfredo Ismael Curbelo Garnica Fabiola Dias da Silva Curbelo Thaine Taumaturgo Caminha	
<b>DOI 10.22533/at.ed.37119030422</b>	

<b>CAPÍTULO 23 .....</b>	<b>201</b>
PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS E VOLUMÉTRICAS DO QUEROSENE DE AVIAÇÃO E DO BIOQUEROSENE	
<p>Idila Rafaela Carvalho Gonçalves  Ana Clara Cazarin Queiroz  Luciana Loureiro de Pinho Rolemberg de Andrade  Silvia Maria Zanini Sebrão  Krishnaswamy Rajagopal</p>	
<b>DOI 10.22533/at.ed.37119030423</b>	
<b>CAPÍTULO 24 .....</b>	<b>210</b>
AVALIAÇÃO REOLÓGICA DE TINTAS ACRÍLICAS COMERCIAIS E ADITIVADAS COM CARGA CONDUTORA	
<p>Alex da Silva Sirqueira  Monica Cristina dos Santos Vieira  Monica Feijó Naccache  Stanley Pires de Alcântara</p>	
<b>DOI 10.22533/at.ed.37119030424</b>	
<b>CAPÍTULO 25 .....</b>	<b>222</b>
EFEITO DA ADIÇÃO DA CINZA GASEIFICADA DE CARVÃO PULVERIZADO NA FORMULAÇÃO DE CERÂMICA VERMELHA	
<p>Gabryella Cerri Mendonça  Cristiano Corrêa Ferreira</p>	
<b>DOI 10.22533/at.ed.37119030425</b>	
<b>CAPÍTULO 26 .....</b>	<b>232</b>
TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM SISTEMAS PARTICULADOS: DETERMINAÇÃO DA CONDUTIVIDADE TÉRMICA EFETIVA DE FERTILIZANTES GRANULADOS NA ESTAGNAÇÃO DE AR	
<p>Hugo Perazzini  Maise Tonon Bitti Perazzini  Rayssa Caroline Ribeiro Bernardes  João Marcos Cardoso Silva</p>	
<b>DOI 10.22533/at.ed.37119030426</b>	
<b>CAPÍTULO 27 .....</b>	<b>248</b>
DETERMINAÇÃO DA SOLUBILIDADE DA UREIA EM SOLUÇÕES AQUOSAS DE ETANOL	
<p>Raquel de Oliveira Silva  Ana Paula Silva Capuci  Raíssa Araújo de Oliveira Campos  Ricardo Amâncio Malagoni</p>	
<b>DOI 10.22533/at.ed.37119030427</b>	
<b>CAPÍTULO 28 .....</b>	<b>255</b>
CALIBRAÇÃO DE MEDIDORES DE VAZÃO COM ALTAS VAZÕES E VISCOSIDADES ELEVADAS: UMA ALTERNATIVA TÉCNICA À LEGISLAÇÃO BRASILEIRA DE ROYALTIES E PARTICIPAÇÕES ESPECIAIS	
<p>Carlos Eduardo Ribeiro de Barros Barateiro  Romulo Carlos da Silva Emerik</p>	
<b>DOI 10.22533/at.ed.37119030428</b>	
<b>SOBRE A ORGANIZADORA.....</b>	<b>271</b>

## TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM SISTEMAS PARTICULADOS: DETERMINAÇÃO DA CONDUTIVIDADE TÉRMICA EFETIVA DE FERTILIZANTES GRANULADOS NA ESTAGNAÇÃO DE AR

**Hugo Perazzini**

perazzini@unifei.edu.br

**Maisa Tonon Bitti Perazzini**

**Rayssa Caroline Ribeiro Bernardes**

**João Marcos Cardoso Silva**

Universidade Federal de Itajubá, Instituto de Recursos Naturais, Itajubá – MG

**RESUMO:** Neste trabalho, foi determinada a condutividade térmica efetiva na estagnação de um meio poroso não-consolidado de partículas de fertilizante superfosfato simples. A metodologia empregada foi a da sonda linear em regime transiente, a qual consiste em uma fonte de calor infinitesimal, linear e contínua, inserida em um meio infinito e isotrópico. A condutividade térmica efetiva foi estimada para meios porosos constituídos de diferentes tamanhos de partícula e distintos conteúdos de umidade. Os resultados mostraram que a condutividade térmica efetiva diminuiu com o aumento do diâmetro de partícula para um meio poroso saturado de ar, confirmando a expectativa teórica. Por outro lado, mesmo para baixas potências de aquecimento utilizadas neste trabalho, foi verificado um aumento irregular da condutividade térmica efetiva com o conteúdo de umidade, indicando um possível efeito de uma resistência térmica de contato de diferentes magnitudes, a qual pode estar

influenciada pelo grau de compactação do leito. Tais resultados indicam a contribuição de uma condutividade térmica equivalente na condutividade térmica efetiva na estagnação, a qual neste trabalho é sugerida sua associação com a difusividade efetiva de vapor no ar, a fim de considerar os efeitos da propriedade estrutural do meio poroso estudado nos resultados obtidos.

**PALAVRAS-CHAVE:** Difusividade térmica efetiva; leito fixo; meios porosos; pseudo-homogêneo; sonda linear.

### 1 | INTRODUÇÃO

O estudo da transferência de calor em um sistema cilíndrico, constituído de uma matriz sólida, porosa e rígida, submetido a um escoamento monofásico ou bifásico de fluidos, tem sido objeto de estudo de vários pesquisadores ao longo dos anos, principalmente, por estarem estes meios porosos presentes em diversas aplicações da engenharia, tais como em operações que envolvem sistemas catalíticos, operações de adsorção e secagem.

No processo de produção de fertilizantes, a secagem é uma das operações unitárias mais importantes, empregada para se obter um produto final seco dentro das especificações

estipuladas pelo mercado. Nessa operação, ocorre a transferência de calor, simultânea à transferência de massa, entre o ar e as partículas de fertilizantes sob a ação de diferentes mecanismos de transporte. A facilidade com que o transporte de energia é estabelecido entre as fases envolvidas na secagem é representada pela condutividade térmica efetiva, um parâmetro térmico que engloba diferentes mecanismos de transferência de calor, tais como a condução de calor através do sólido, do contato sólido-sólido, convecção sólido-fluido-sólido e radiação, quando a temperatura do sistema for suficientemente alta. A determinação da condutividade térmica efetiva tem sido o principal objetivo dos estudos de transferência de calor em meios porosos, visto que, a partir dela, é possível conhecer o campo de temperatura do corpo, uma vez conhecidas as características físicas do meio poroso. No entanto, este parâmetro também possui significativa importância quando aplicado às operações de separação térmica, sobretudo na secagem de fertilizantes, o qual é empregado em estudos de análise, otimização e projeto de secadores industriais.

A condutividade térmica efetiva é um parâmetro que pode ser determinado em laboratório por meio de diferentes técnicas experimentais (FREIRE, 1979; TSOTSAS e MARTIN, 1987). Muitas dessas técnicas não requerem um aparato experimental sofisticado, entretanto, a simplicidade dos métodos experimentais é apenas aparente, visto que uma estimativa fisicamente consistente da condutividade térmica efetiva é de difícil obtenção, pois há uma dependência muito forte deste parâmetro com as propriedades físicas e estruturais e do grau de saturação do meio poroso. Keey (1992) apresentou em seu trabalho uma série de correlações que indicam um decréscimo da condutividade térmica efetiva com o aumento da porosidade do leito. Maroulis et al. (2002), por sua vez, verificaram que a condutividade térmica efetiva de um total de treze materiais sólidos alimentícios testados aumentou com o aumento do conteúdo de umidade. Resultados semelhantes também foram obtidos por Thoméo, Costa e Lopes Filho (2001), Kocabiyik, Kayisoglu e Tezer (2009) e Mahapatra, Lan e Harris (2011) para grãos de feijão, sementes de abóbora e farinha de arroz, respectivamente. A determinação da condutividade térmica efetiva de materiais particulados porosos, higroscópicos e de natureza inorgânica, é pouco reportada na literatura, sendo que não foram encontrados trabalhos que investigassem o efeito da umidade e do tamanho de partículas na condutividade térmica de fertilizantes granulados.

Como na secagem as partículas de fertilizantes estão parcialmente saturadas de água e podem apresentar uma distribuição irregular de tamanhos, é importante caracterizar a transferência de calor com base nestes dois fatores. Deste modo, o objetivo deste trabalho foi estudar a transferência de calor em um leito de partículas de fertilizantes com base na determinação da condutividade térmica efetiva e analisar a influência da umidade e do tamanho das partículas neste parâmetro. Os resultados que serão apresentados poderão ser utilizados para compreender melhor o acoplamento da transferência de calor e massa e auxiliar no desenvolvimento de novas tecnologias para a secagem de fertilizantes.

## 2 | MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Material particulado estudado

O material particulado utilizado foi um fertilizante granulado do tipo superfosfato simples, produzido pela Heringer Fertilizantes S.A. Foram empregados nos experimentos fertilizantes com dois diâmetros médios de partícula: 2,0 mm e 2,36 mm, ambos obtidos a partir de uma análise granulométrica de uma amostra de fertilizantes. Para a primeira etapa do estudo, utilizou-se o material seco em estufa a  $103 \pm 5^\circ\text{C}$ , a fim de garantir um meio poroso saturado de ar. Antes dos experimentos de transferência de calor serem realizados, as amostras foram acomodadas em um dessecador por um período de aproximadamente 1 h para atingirem a temperatura ambiente. Na segunda etapa do estudo, analisou-se a influência da umidade na transferência de calor no meio parcialmente saturado de água. Para isso, foram utilizados dois procedimentos de umidificação. No primeiro, as amostras foram imersas em água por um período de 24 e 48 horas e em seguida realizado um peneiramento para a retirada da água em excesso, obtendo um conteúdo de umidade inicial médio igual a aproximadamente 20% e 23% (base úmida), respectivamente. A umidade em base úmida foi determinada a partir da relação entre a massa de água contida no material pela massa de material úmido. No segundo procedimento, as partículas foram colocadas em peneiras suspensas em água no interior de um recipiente hermeticamente fechado, permanecendo por um período de 24 h. Neste segundo método, o fertilizante foi umidificado sem o contato direto com a água, obtendo-se um conteúdo de umidade médio de aproximadamente 13% em base úmida.

### 2.2 Aparato experimental

O método experimental de determinação da condutividade térmica efetiva na estagnação foi o método da sonda linear. Dentre as técnicas experimentais disponíveis, utilizou-se esta por ser uma das mais utilizadas, por ser de simples concepção e operação, por ser aplicada tanto para materiais particulados ou soluções poliméricas e por ser ideal para situações nas quais são utilizados meios porosos parcialmente saturados de água, devido à necessidade de um curto tempo de residência do material no interior da célula para que as medidas possam ser realizadas. A variável tempo também será investigada neste trabalho. Dessa forma, foi construído um aparato experimental com base em uma análise das metodologias experimentais apresentadas na literatura, procurando obter a melhor configuração possível da célula de medidas a fim de minimizar os erros associados às medidas de temperatura.

A célula de medidas, de geometria cilíndrica, foi construída a partir de um tubo de aço inox de 5 cm de diâmetro e 30 cm de altura, revestido com espuma de poliuretano de 1,25 cm de espessura em ambas as suas extremidades, com o intuito de minimizar as perdas de calor por essas regiões. O isolante térmico foi revestido

com uma camada de nylon de 0,1 cm de espessura. A fonte de calor consistiu de uma sonda constituída de um cilindro de aço inox de 16 cm de diâmetro e 26,5 cm de comprimento, contendo uma resistência bobinada homogeneamente em seu interior. Para a medida da temperatura média do meio, foi instalado um termopar tipo K junto à superfície da sonda, a qual foi acoplada a uma tampa também construída em nylon, inserida na extremidade superior da célula. Uma fonte elétrica de corrente contínua (Instrutherm, DC Power Supply FA – 3003) foi conectada diretamente à sonda, o que permitiu a escolha da potência de aquecimento desejada. O termopar foi conectado a um sistema de aquisição de dados (Asko, AK176), cuja comunicação foi feita por meio de um *software* (Datalogger linker) instalado em um computador. O intervalo de aquisição dos dados foi de cinco segundos. A Figura 1 apresenta o esquema do sistema experimental utilizado.

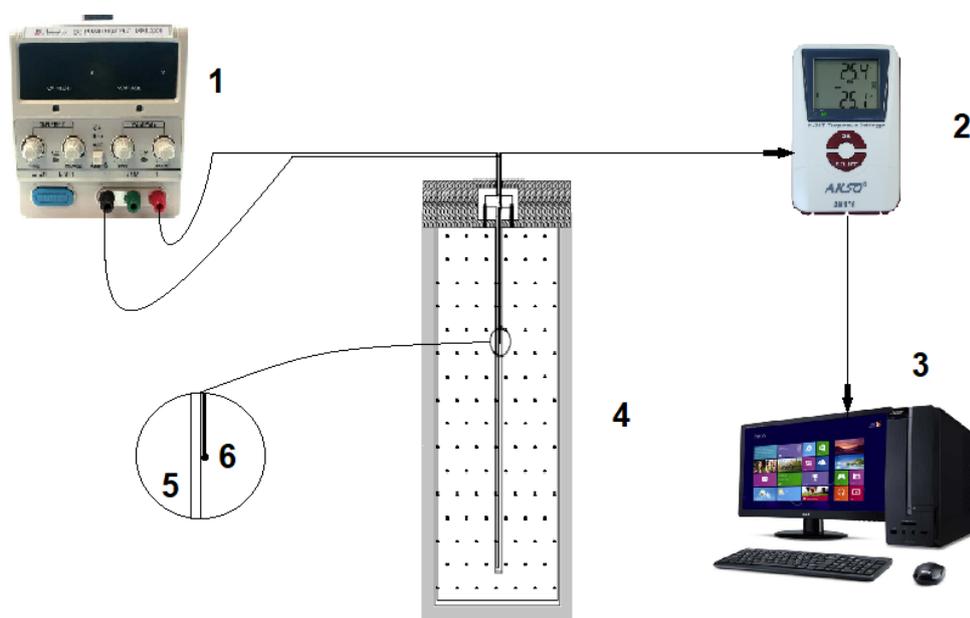


Figura 1: Sistema experimental para a determinação da condutividade térmica na estagnação.

(1) Fonte de aquecimento; (2) Registrador de dados; (3) Computador; (4) Célula de medidas; (5) Sonda linear; (6) Termopar tipo K.

Fonte: Acervo dos autores (2018).

## 2.3 Metodologia experimental

Os experimentos tiveram início inserindo as partículas de fertilizante na extremidade superior da célula de medidas, seguido de sucessivas agitações do leito e movimentos intercalados, de modo a preencher todo o seu volume e garantir uma compactação uniforme das partículas. Em seguida, a sonda foi inserida no leito de partículas com o auxílio da tampa. Uma vez constatada a vedação da célula e atingido o equilíbrio térmico entre o sistema particulado e a temperatura ambiente, foi selecionada a intensidade da corrente na fonte elétrica e dado início ao aquecimento

e à aquisição dos dados de temperatura média do material particulado em função do tempo. A fim de verificar a influência do tempo na determinação da condutividade térmica efetiva, os experimentos tiveram duração de 40 minutos, 1h e 4 h. Para garantir um meio poroso com propriedades físicas estruturais constantes durante as repetições dos experimentos, após os tempos de aquecimento estipulados, a fonte elétrica foi desligada e aguardou-se até que a temperatura do meio se igualasse à temperatura inicialmente medida, dando início novamente ao procedimento experimental. Assim, a célula foi preenchida com o material particulado somente no início do primeiro experimento. Os estudos de transferência de calor foram conduzidos para as taxas de aquecimento de  $3,7 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}$  (intensidade de corrente de 7,4 V e 0,13 A). A baixa potência utilizada teve o intuito de minimizar os efeitos da transferência de massa pela evaporação de água (para os experimentos realizados com o meio poroso parcialmente saturado de água), da radiação e os efeitos da convecção natural, os quais não são contemplados pelo modelo matemático utilizado neste trabalho para a determinação da condutividade térmica, o qual é apresentado em seguida.

## 2.4 Considerações teóricas sobre o método da sonda linear

O método da sonda linear é fundamentado na Lei de Fourier da condução de calor, o qual é matematicamente representado pela equação geral da condução de calor para coordenadas cilíndricas e propriedades físicas constantes:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = k_{eff} \left( \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \dot{q}_G \quad (1)$$

A Equação (1) está sujeita às seguintes condições inicial e de contorno, supondo um problema unidimensional (transferência de calor ocorre na direção radial), sem geração de calor pelo meio poroso, potência de aquecimento constante, a sonda é longa e fina e o meio poroso é infinito (SOUZA, PIMENTEL e ORLANDE, 1999):

$$C.I.: t = 0 \text{ e } r > 0: T(r, t) = T_0 \quad (2)$$

$$C.C.1: t > 0 \text{ e } r \rightarrow 0: \lim_{r \rightarrow 0} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right) = -\frac{Q}{2\pi k_{eff}} \quad (3)$$

$$C.C.2: t > 0 \text{ e } r \rightarrow \infty: \lim_{r \rightarrow \infty} \Delta T(r, t) = 0 \quad (4)$$

A partir de simplificações da solução analítica, obtida a partir da aplicação das condições anteriormente apresentadas, a condutividade térmica efetiva pode ser

calculada a partir da seguinte equação (SOUZA, PIMENTEL e ORLANDE, 1999):

$$k_{eff} = \frac{Q}{4\pi(d\Delta T/d\ln t)} \quad (5)$$

Com a Equação (5), pode-se determinar a condutividade térmica efetiva na estagnação. Assim, em um gráfico de temperatura em função do tempo linearizado, tem-se uma porção linear cujo coeficiente angular corresponde a  $\frac{Q}{4\pi k_{eff}}$ , conforme mostra a Equação (6).

$$\alpha = \frac{Q}{4\pi k_{eff}} \quad (6)$$

É oportuno ressaltar que para se obter resultados experimentais representativos, devem ser evitados gradientes de temperatura na amostra até o início do experimento e que o isolamento da parede externa à célula de medição seja eficiente.

### 3 | APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

#### 3.1 Calibração da célula de medidas

Com o propósito de se obter confiabilidade nos resultados que seriam obtidos, foram inicialmente realizados testes de calibração do equipamento experimental proposto. Para isso, foi escolhido um material de referência, de condutividade térmica conhecida, visando à comparação entre os dados obtidos e aqueles apresentados pela literatura. O material escolhido para a calibração da célula foram esferas de vidro, com diâmetro de partícula entre 0,84 mm e 1,00 mm. Foi realizado um total de dez experimentos. Os dados de temperatura média do meio poroso em função do logaritmo do tempo são apresentados na Figura 2 para o primeiro experimento realizado, a partir dos quais foi possível estimar a condutividade térmica efetiva na estagnação, para cada caso analisado. A Figura 3 mostra, para o mesmo experimento, o trecho linear de dados escolhido para se determinar o coeficiente angular da reta, a fim de se utilizar na Equação (6) para a determinação de  $k_{eff}$ .

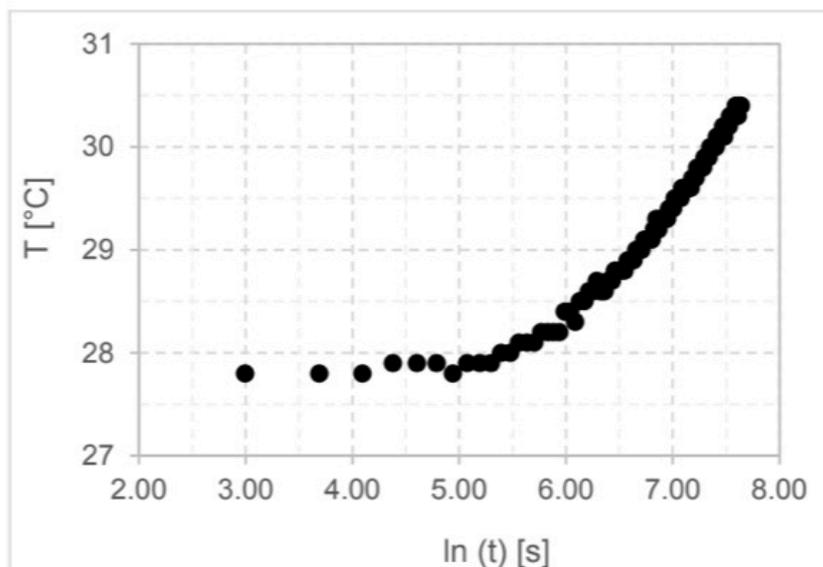


Figura 2: Temperatura do meio poroso em função do tempo para o experimento nº 1.

Fonte: Acervo dos autores (2018).

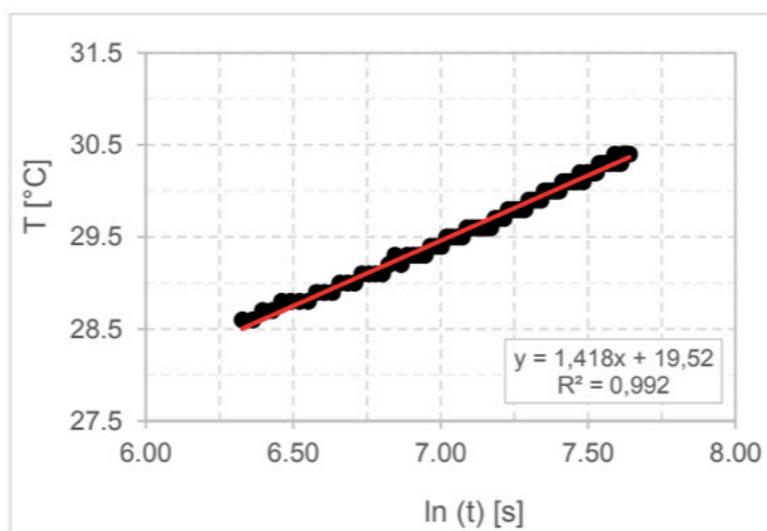


Figura 3: Trecho linear de dados escolhida para o experimento nº 1.

Fonte: Acervo dos autores (2018).

O critério utilizado para a escolha dos dados apresentados na Figura 3 foi para aqueles conjuntos de dados que forneceria um elevado coeficiente de terminação (neste trabalho, maior do que 0,99), mesma metodologia utilizada por Goedeken, Shah e Tong (1998). A mesma metodologia foi aplicada para os demais experimentos realizados neste trabalho.

Para a condutividade térmica efetiva das esferas de vidro, foi obtido um valor médio igual a  $0,213 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$  ( $0,030 \text{ cal}\cdot\text{cm}^{-1}\text{min}^{-1}\text{°C}^{-1}$ ). Sabendo que o desvio padrão expressa o grau de dispersão dos dados individuais em torno de uma média populacional e que é uma das medidas mais comuns de dispersão estatística, calculou-se o mesmo para as estimativas da condutividade térmica efetiva. Assim, foi obtido um desvio padrão de 4,5% e uma variância de 0,2%, o que mostra que os dados são

reprodutíveis. O valor obtido experimentalmente está bem próximo daquele obtido por Freire (1979) para esferas de vidro, que foi de  $0,033 \text{ cal}\cdot\text{cm}^{-1}\text{min}^{-1}\text{°C}^{-1}$ .

### 3.2 Influência do diâmetro de partícula

Uma análise da influência do tamanho das partículas na condutividade térmica efetiva do meio poroso saturado de ar pode ser feita com base nos dados apresentados na Tabela 1. Para este conjunto de experimentos, também foi realizado um total de dez experimentos. A metodologia de cálculo de  $k_{eff}$  foi a mesma daquela apresentada no item 3.1.

Diâmetro de partícula [mm]	Tempo de aquecimento [h]	$k_{eff}$ [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$ ]	$R^2$ [-]	Desvio padrão [%]
2,00	1	0,398	0,973	10,7
2,00	4	0,159	0,995	5,3
2,36	1	0,383	0,965	4,4
2,36	4	0,144	0,994	1,9

Tabela 1: Condutividade térmica efetiva para diferentes tamanhos de partícula.

Fonte: Acervo dos autores (2018).

É possível notar que a condutividade térmica efetiva é menor para aqueles meios porosos não-consolidados com partículas de maior diâmetro, devido a uma maior presença de ar nos poros. Resultados semelhantes também foram verificados para outros materiais particulados (TAVMAN, 1996; GOEDEKEN, SHAH e TONG, 1998; PERAZZINI, 2014; CARSON, 2015).

O tempo do experimento também foi uma variável que influenciou significativamente nos resultados, conforme mostra a Tabela 1. Nota-se que, para todos os diâmetros de partícula estudados, foram obtidos valores distintos de  $k_{eff}$  para diferentes tempos de aquecimento, sendo os menores valores obtidos para um tempo total de 4 horas. Dois pontos podem ser levantados para explicar estes resultados. Primeiro, conforme pode ser verificado na Equação (6), o cálculo de  $k_{eff}$  é dependente do coeficiente angular do trecho linear escolhido, afetando diretamente a determinação deste parâmetro, mesmo para os casos em que os valores do desvio padrão não foram muito elevados. Os experimentos de menor duração não forneceram uma porção linear representativa para que se fosse possível obter dados com boa confiabilidade. Este fato é confirmado em face aos valores do coeficiente de determinação obtidos para os experimentos de 1 h de duração, cujos valores foram menores. Segundo, a influência da temperatura inicial do meio. Assim, novos experimentos foram realizados para temperaturas iniciais semelhantes, obtendo-se um valor de condutividade térmica efetiva igual a  $0,132 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$  com um desvio padrão de 1,2%, valor médio próximo daqueles obtidos para os experimentos de 4 h de duração.

### 3.3 Influência da umidade

A influência da saturação de água na condutividade térmica efetiva pode ser verificada com base nos dados apresentados na Tabela 2 para meios porosos não-consolidados de partículas de fertilizantes de 2,36 mm.

Umidade (base úmida) [%]	Tempo de aquecimento [h]	$k_{eff}$ [ $W \cdot m^{-1} K^{-1}$ ]	$R^2$ [-]	Desvio padrão [%]
13	1	0,356	0,992	5,1
20	4	0,178	0,995	5,3
23	1	0,276	0,993	5,2

Tabela 2: Condutividade térmica efetiva para diferentes conteúdos de umidade.

Fonte: Acervo dos autores (2018).

A metodologia de cálculo de  $k_{eff}$  foi a mesma daquela apresentada no item 3.1. Foi realizado um total de duas repetições apenas para cada experimento, visando minimizar a evaporação da água no interior da célula. Foi escolhido um valor de umidade (20%) que se situava entre um valor médio dentro o intervalo de umidade estudado para analisar os efeitos do tempo de aquecimento de quatro horas.

Os resultados contrariaram o esperado inicialmente, de que a condutividade térmica efetiva seria maior para casos em que a umidade do meio poroso também seria maior, uma vez que a condutividade térmica da água é muito maior que a do ar. Uma dependência linear da condutividade térmica efetiva com o conteúdo de umidade já foi verificado pela literatura para diferentes materiais particulados (AVIARA e HAQUE, 2001; THOMÉO, COSTA e LOPES FILHO, 2004; CAI et al., 2018), sobretudo para aqueles submetidos à mesma técnica experimental utilizada neste trabalho (DESHPANDE, BAL e OJHA, 1996; IKEGWU e EZEH, 2012). De fato, pode ser constatado um aumento de  $k_{eff}$  para um aumento de apenas 3% na umidade das partículas. Entretanto, uma dependência linear da condutividade térmica com a umidade, por sua vez, não pode ser constatada, visto que foi observado um decréscimo neste parâmetro para um aumento ainda maior da umidade, cerca de 7%. O que se obteve foi um aumento irregular da condutividade térmica efetiva com o conteúdo de umidade das partículas, conforme mostra a Figura 4.

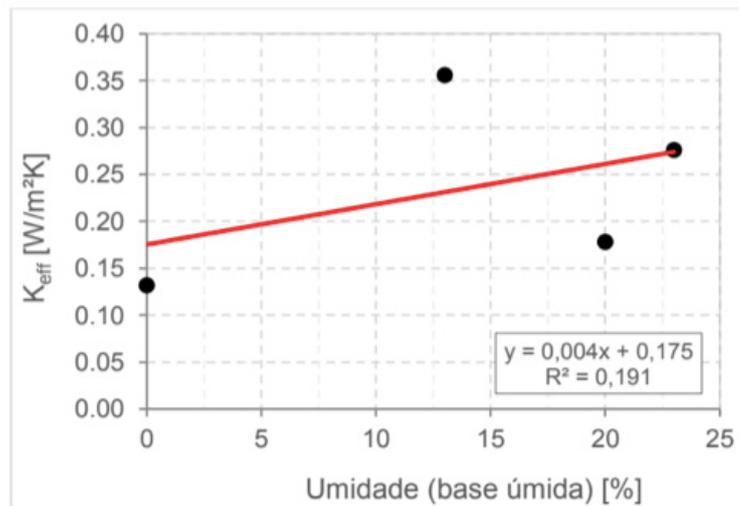


Figura 4: Condutividade térmica efetiva em função do conteúdo de umidade.

Fonte: Acervo dos autores (2018).

Resultados semelhantes também foram obtidos por Maroulis et al. (2002) para alguns alimentos, por Kwapinski e Tsotsas (2006) para um leito de partículas de zeólitas e por Casciatori et al. (2013) para polpa de laranja e farelo de trigo. Reforçando essas análises, a Figura 4 também apresenta um coeficiente angular da reta distante da unidade e um baixo valor de coeficiente de determinação.

Um ponto importante a ser destacado é que os resultados não foram influenciados significativamente por erros experimentais, face aos baixos valores de desvio padrão obtidos para cada caso analisado. Obtendo-se um limite de resultados possíveis para cada conteúdo de umidade a partir da consideração de um desvio padrão acima e abaixo dos valores de condutividade térmica obtidos para cada conteúdo de umidade (intervalo estatístico), é possível realizar uma interpretação direta da variação do conjunto de dados, que mostra que há uma expectativa de que aproximadamente 95% dos dados observados experimentalmente se localizem dentro do intervalo estatístico, caso as mesmas condições operacionais sejam conseguidas. Isso reforça a qualidade dos experimentos realizados, e mostra que os mesmos são reproduzíveis. O que de fato leva a diferentes valores de condutividade térmica efetiva são os diferentes coeficientes angulares que foram obtidos, os quais estão associados com a inclinação do trecho linear escolhido das curvas de temperatura em função de  $\ln(t)$ , vide Figura 5.

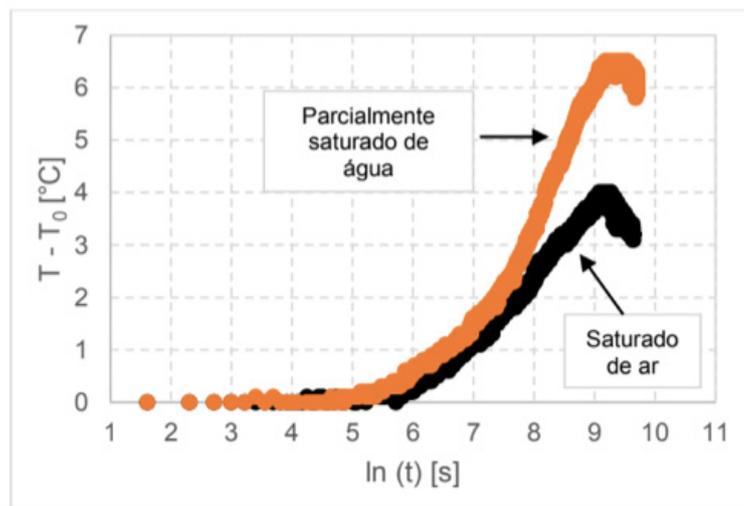


Figura 5: Temperatura em função do tempo para o meio poroso saturado de ar e parcialmente saturado de água.

Fonte: Acervo dos autores (2018).

Conforme mostra a Figura 5, é possível notar que a inclinação do trecho linear da curva para um meio poroso parcialmente saturado de água é mais pronunciado do que para um meio poroso saturado de ar, levando a um coeficiente angular maior e, conseqüentemente, a um menor valor da condutividade térmica efetiva. Por critério comparativo, são apresentados os dados de temperatura em função do tempo corrigidos pelo efeito da temperatura inicial ( $T - T_0$ ).

Tendo em vista que o meio poroso é caracterizado como pseudo-homogêneo e a condutividade térmica como um parâmetro efetivo, isto é, engloba a contribuição da transferência de calor por condução de cada fase característica do sistema analisado, os resultados sugerem que para um meio poroso parcialmente saturado de água, há uma contribuição de outros mecanismos de transferência, além da condução de calor, sobretudo do mecanismos de difusão de umidade, o que indica a presença do efeito de Dufour. Segundo Sakiyama e Yano (1990), em um meio poroso úmido, pode ocorrer uma contribuição do gradiente de concentração de pressão de vapor de água na propagação de calor no interior do corpo que influencia na evolução da temperatura com o tempo. Kwapinski e Tsotsas (2006), por sua vez, afirmaram que a dependência da condutividade térmica efetiva com a umidade pode ser devido a um processo de evaporação, difusão e recondensação do vapor na direção da redução de temperatura. Key (1992) indica que os sucessivos processos de evaporação e condensação que podem ocorrer no interior do corpo poroso, levando a um efeito conhecido como “efeito do tubo quente”, o que pode gerar ambigüidades na interpretação dos dados de condutividade térmica. Por outro lado, alguns resultados apresentados por Kwapinski e Tsotsas (2006) mostraram que, para uma determinada temperatura do sistema, a influência do conteúdo de umidade na condutividade térmica do leito foi muito pequena. Uma diferença um pouco mais expressiva foi constatada apenas para temperaturas mais elevadas (em torno de  $80^\circ\text{C}$ ) que, segundo Sakiyama e Yano (1990), deve-se

a uma forte dependência da pressão de vapor de água com elevados valores de temperatura. Goedecken, Shah e Tong (1998), em seu trabalho, concluíram que o efeito da porosidade na condutividade térmica efetiva na estagnação foi maior do que o efeito do conteúdo de umidade.

Com base nessas discussões apresentadas pela literatura, um dos fatores que podem ter contribuído com a dispersão dos dados de condutividade térmica efetiva com relação ao conteúdo de umidade, mesmo para baixos valores de temperatura no interior do leito, foi possivelmente a presença de uma resistência térmica de contato finita entre as partículas úmidas e a sonda aquecida, interferindo na condução de calor através dos meios porosos devido aos pontos de contato ser intercalados com espaços preenchidos por ar e por líquido, sendo que, nestes espaços, poderiam ter ocorrido fenômenos sucessivos de condensação e evaporação, sobretudo, influenciados pelo tempo de aquecimento. Como foram realizados experimentos para baixos valores de temperatura, a condutividade térmica efetiva de um meio parcialmente saturado de água também é fortemente dependente do arranjo das partículas que o constitui, o qual pode influenciar a resistência de contato. Melhor será, em estudos futuros, investigar a influência do empacotamento, bem como analisar o efeito da saturação de água para meios não-consolidados de outros diâmetros de partículas.

Fazendo um paralelo com o efeito do tubo quente, uma verificação na Equação (7), apresentada por Sakiyama e Yano (1990), mostra a contribuição da difusão de vapor de água no ar ( $k_v$ ) em uma condutividade térmica equivalente ( $k_{e,v}$ ) e que a relação entre essas duas variáveis são diretamente proporcionais.

$$k_v = \frac{D_{0,v}}{RT} \frac{P}{P - P_v} L_v \frac{dP_v}{dT} \quad (7)$$

Considerando as discussões anteriormente apresentadas, se as propriedades estruturais do meio poroso forem levadas em consideração (porosidade e tortuosidade), melhor seria escrever  $k_{e,v}$  em termos de uma difusividade efetiva de vapor, na forma:

$$D_{eff,v} = D_{0,v} \frac{\varepsilon}{\tau} \delta \quad (8)$$

A Equação proposta por Sakiyama e Yano (1990) fica, assim, escrita em termos de uma condutividade térmica equivalente efetiva:

$$k_{eff,v} = \frac{D_{eff,v}}{RT} \frac{P}{P - P_v} L_v \frac{dP_v}{dT} \quad (9)$$

Deste modo, fica mais claro analisar que, se a presença de uma resistência térmica de contato possuir diferentes magnitudes para cada caso, influenciada pelo grau de empacotamento do leito, uma condutividade térmica efetiva equivalente, que dependerá de um coeficiente efetivo de difusão de vapor, poderá contribuir no valor final da condutividade térmica efetiva na estagnação de um determinado meio poroso. Esta última, por sua vez, estará indiretamente influenciada por uma resistência térmica de contato, o que poderá explicar a dispersão dos dados de  $k_{eff}$  para diferentes conteúdos de umidade. Caso a resistência térmica de contato para cada caso analisado possua sua magnitude característica, ela poderá contribuir, em diferentes intensidades, com a pressão de vapor d'água, aumentando ou diminuindo a contribuição de uma condutividade térmica equivalente efetiva.

Convém destacar que, conforme apresentado no item 2.3, não foi realizado um novo empacotamento do leito para cada repetição, sendo as propriedades estruturais do meio poroso mantidas constantes. Assim, além da variável tempo, a resistência térmica de contato também pode ter sua contribuição na dispersão dos dados de condutividade térmica obtidos. Este fato revela que o empacotamento da célula, quando aplicado o método da sonda linear, deve ser realizado com cautela quando se deseja estimar a condutividade térmica efetiva de meios porosos higroscópicos e parcialmente saturados. É conveniente ressaltar também que a descrição da transferência de calor em meios porosos é muito difícil, sobretudo para meios constituídos por partículas higroscópicas e parcialmente saturados, uma vez que a análise da transferência de calor é «mascarada» pela transferência de massa.

## 4 | CONCLUSÕES

Neste trabalho, foi realizado um estudo da transferência de calor visando a determinação da condutividade térmica efetiva na estagnação de fertilizante granulado superfosfato simples, sendo analisada a influência do conteúdo de umidade e do diâmetro de partícula neste parâmetro térmico.

Com base nos resultados obtidos, pode-se afirmar que o aparato experimental utilizado e o método da sonda linear oferecem boa reprodutibilidade aos dados observados experimentalmente, sobretudo para os meios saturados de ar, face as baixos valores de desvio padrão obtidos. Por outro lado, nos ensaios realizados com o fertilizante saturado de água, ficou evidente que a metodologia experimental utilizada possui limitações quanto à determinação da condutividade térmica do meio poroso, sendo necessária a realização de estudos com outras técnicas experimentais a critério

comparativo. Os resultados obtidos mostraram que um procedimento experimental relativamente simples pode apresentar resultados inesperados, dificultando assim, interpretações acerca dos fenômenos envolvidos no problema.

O tamanho da partícula influenciou na condutividade térmica na estagnação, indicando uma influência das propriedades estruturais do meio poroso neste parâmetro térmico. Por outro lado, a condutividade térmica efetiva teve um aumento irregular com a umidade. Este resultado pode ser atribuído ao tempo de experimento realizado, o qual pode ter favorecido o efeito de Dufour e os sucessivos mecanismos de condensação e evaporação, e a uma condutividade térmica equivalente, que por sua vez, é influenciada pelas propriedades estruturais do meio poroso. Assim, é possível concluir que há uma contribuição de uma condutividade térmica equivalente efetiva na condutividade térmica efetiva dos meios porosos, sugerindo uma possível presença de uma resistência térmica de contato estabelecida entre a sonda e as partículas úmidas de fertilizantes, podendo caracterizar diferentes áreas de contato, a depender da maneira em que o leito de partículas é empacotado.

No contexto de engenharia, entretanto, pode-se dizer que qualquer progresso na área de fenômenos de transporte se torna válido e necessário para otimizar processos industriais, especialmente o processo de secagem, operação esta que está estritamente relacionado aos fenômenos de transferência de calor que ocorrem no meio poroso, caracterizados pela condutividade térmica efetiva.

## NOMENCLATURA

$C_p$	Calor específico	[J/kg·K]
$D_{o,v}$	Difusividade de vapor no ar	[m <sup>2</sup> /s]
$D_{eef,v}$	Difusividade efetiva de vapor	[m <sup>2</sup> /s]
$K_{eef,v}$	Condutividade térmica efetiva	[W/m <sup>2</sup> ·K]
$K_{eef,v}$	Condutividade térmica efetiva equivalente	[W/m <sup>2</sup> ·K]
$K_v$	Condutividade térmica equivalente	[W/m <sup>2</sup> ·K]
$L_v$	Calor latente de vaporização da água	[J/mol]
$P$	Pressão total do sistema	[Pa]
$P_v$	Pressão de vapor d'água	[Pa]
$\dot{q}_G$	Geração de energia por unidade de volume	[W/m <sup>3</sup> ]
$Q$	Taxa de aquecimento por unidade de comprimento	[W/m]
$r$	Coordenada radial	[-]
$R$	Constante dos gases ideais	[J/mol·K]
$t$	Tempo	[s]
$T$	Temperatura	[K]
$T_0$	Temperatura inicial	[K]
$z$	Coordenada axial	[-]
$\delta$	Fator constrictividade	[-]
$\varepsilon$	Porosidade	[-]
$\tau$	Tortuosidade	[-]

$\rho$	Massa específica	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\varphi$	Coordenada angular	[-]

## REFERÊNCIAS

AVIARA, N.A.; HAQUE, M.A. Moisture dependence of thermal properties of sheanut kernel. **Journal of Food Engineering**, v. 47, p. 109–113, 2001.

CAI, S.; ZHANG, B.; CUI, T.; GUO, H.; HUXFORD, J. Mesoscopic study of the effective thermal conductivity of dry and moist soil. **International Journal of Refrigeration** (2018) doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2018.10.023>.

CARSON, J. K. Thermal conductivity measurement and prediction of particulate foods. **International Journal of Food Properties**, v. 18, p. 2840–2849, 2015.

CASCIATORI, F. P. C.; LAURENTINO, C. L.; LOPES, K. C. M.; SOUZA, A. G.; THOMÉO, J. C. Stagnant effective thermal conductivity of agro-industrial residues for solid-state fermentation. **International Journal of Food Properties**, v. 16, p. 1578–1593, 2013.

DESHPANDE, S. D.; BAL, S.; OJHA, T.P. Bulk thermal conductivity and diffusivity of soybean. **Journal of Food Processing and Preservation**, v. 20, p. 177–189, 1996.

FREIRE, J. T. **Transferência de calor em meios porosos**. 1979. 223p. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1979.

GOEDEKEN, D.L.; SHAH, K.K.; TONG, C.K. True thermal conductivity determination of moist porous food materials at elevated temperatures. **Journal of Food Science**, v. 63, p. 1062–1063, 1998.

IKEGWU, O. J.; EZEH, C. Q. Thermal properties of *kerstingiella geocarpa* seeds as influenced by moisture content. **Nigerian Journal of Food**, v. 30, p.100–105, 2012.

KEEY, R. B. **Drying of Loose and Particulate Materials**. 1. ed. New York: Hemisphere Publishing Corporation, 1992. 504 p.

KOCABIYIK, H.; KAYISOGLU, B.; TEZER, D. Effect of moisture content on thermal properties of pumpkin seed. **International Journal of Food Properties**, v. 12, p. 277–285, 2009.

KWAPINSKI, W.; TSOTSAS, E. Characterization of particulate materials in respect to drying. **Drying Technology**, v. 24, p. 1083–1092, 2006.

MAHAPATRA, A.K.; LAN, Y.; HARRIS, D.L. Influence of moisture content and temperature on thermal conductivity and thermal diffusivity of rice flours. **International Journal of Food Properties**, v. 14, p. 675–683, 2011.

MAROULIS, Z. B.; SARAVACOS, G. D.; KROKIDA, M. K.; PANAGIOTOU, N. M. Thermal conductivity prediction for foodstuffs: effect of moisture content and temperature. **International Journal of Food Properties**, v. 5, p. 231–245, 2002.

PERAZZINI, H. **Secagem de sólidos porosos granulares**. 2014. 189 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2014.

SAKIYAMA, T.; YANO, T. Effects of air and water contents on the effective thermal conductivity of air impregnated gels. **Agricultural Biology and Chemistry**, v. 54, p. 1375–1380, 1990.

SOUZA, R.; PIMENTEL, L. C. G.; ORLANDE, H. R. B. **Determinação da condutividade térmica utilizando o método da sonda linear.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA MECÂNICA, 15., 1999, Águas de Lindóia. **Anais...** Águas de Lindóia: FEM/UNICAMP, 1999.

TAVMAN, I. H. Effective thermal conductivity of granular porous materials. **International Communications of Heat and Mass Transfer**, v. 23, p. 169–176, 1996.

THOMÉO, J. C.; COSTA, M. V. A.; LOPES FILHO, J. F. Effective thermal conductivity of beans via a steady-state method. **International Journal of Food Properties**, v. 7, p. 129–138, 2004.

TSOTSAS, E.; MARTIN, H. Thermal conductivity of packed beds: a review. **Chemical Engineering and Processing**, v. 22, p. 19–37, 1997.

## **SOBRE A ORGANIZADORA**

**CARMEN LÚCIA VOIGT** Doutora em Química na área de Química Analítica e Mestre em Ciência e Tecnologia de Alimentos pela Universidade Estadual de Ponta Grossa. Especialista em Química para a Educação Básica pela Universidade Estadual de Londrina. Graduada em Licenciatura em Química pela Universidade Estadual de Ponta Grossa. Experiência há mais de 10 anos na área de Educação com ênfase em avaliação de matérias-primas, técnicas analíticas, ensino de ciências e química e gestão ambiental. Das diferentes atividades desenvolvidas destaca-se uma atuação por resultado, como: supervisora de laboratórios na indústria de alimentos; professora de ensino médio; professora de ensino superior atuando em várias graduações; professora de pós-graduação *lato sensu*; palestrante; pesquisadora; avaliadora de artigos e projetos; revisora de revistas científicas; membro de bancas examinadoras de trabalhos de conclusão de cursos de graduação. Autora de artigos científicos. Atuou em laboratório multiusuário com utilização de técnicas avançadas de caracterização e identificação de amostras para pesquisa e pós-graduação em instituição estadual.

Agência Brasileira do ISBN  
ISBN 978-85-7247-237-1

