

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

**UBIRANILSON JOÃO DE CASTRO**

**ESTUDO DE UM LEITO FIXO DE PEQUENA ESPESSURA UTILIZANDO  
CFD**

São Carlos  
2016

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

**UBIRANILSON JOÃO DE CASTRO**

**ESTUDO DE UM LEITO FIXO DE PEQUENA ESPESSURA UTILIZANDO  
CFD**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de São Carlos, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Química, área de concentração de Pesquisa e Desenvolvimento de Processos Químicos.

Orientador: Jose Teixeira Freire  
Coorientador: Rodrigo Béttega

São Carlos  
2016

Ficha catalográfica elaborada pelo DePT da Biblioteca Comunitária UFSCar  
Processamento Técnico  
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

C355e Castro, Ubiranilson João de  
Estudo de um leito fixo de pequena espessura  
utilizando CFD / Ubiranilson João de Castro. -- São  
Carlos : UFSCar, 2016.  
59 p.


Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal de  
São Carlos, 2016.

1. Leito fixo. 2. Cfd. 3. Simulação. I. Título.

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE UBIRANILSON JOÃO DE CASTRO APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS, EM 07 DE MARÇO DE 2016 .

BANCA EXAMINADORA:

  
José Teixeira Freire  
**Orientador, UFSCar**

  
Rodrigo Béttega  
**Coorientador, UFSCar**

  
Ronaldo Guimarães Corrêa  
**UFSCar**

  
Cláudio Roberto Duarte  
**UFU**

## AGRADECIMENTOS

Àquele que é reconhecido por diversos nomes, Grande Engenheiro, Projetista do Universo, Criador, Salvador, Rei da Glória, Todo Poderoso, em suma é nosso Deus, pela dádiva da vida e generosa oportunidade de realizar meus planos de acordo com Sua vontade.

Aos meus pais, Ubiracy e Leia, por todo apoio, carinho e paciência, eles são a base humana para minha formação. Ao meu irmão, Ubiracy Filho, minha cunhada, França, e meu amado sobrinho, Lucas, que juntamente com meus pais são fonte de minhas forças para persistir em todos os desejos que almejo.

As 'parentes' Luiza, Fábria e Lígia que me adotaram, obrigado pelo apoio durante esses dois anos.

Ao professor Jose Teixeira Freire por sua orientação e exemplo, essenciais para a elaboração deste trabalho.

Ao professor Rodrigo Béttega por sua orientação e grande contribuição durante toda a execução deste trabalho.

Aos professores do Centro de Secagem: Prof<sup>a</sup>. Maria do Carmo, Prof. Demerval, Prof. Ronaldo e Prof. Thiago pelo auxílio e pelas sugestões no decorrer do mestrado.

Aos colegas e amigos do Centro de Secagem, pelo companheirismo ao longo deste trabalho.

Agradeço a CAPES pelo suporte financeiro.

## RESUMO

Estudos realizados em leitos fixos, um dos principais equipamentos de investigação experimental, utilizam uma abordagem simplificadora que permitem avaliar, por exemplo, a cinética de secagem dos mais diversos materiais, conhecida com abordagem em camada fina. Para que um determinado sistema possa ser englobado em tal abordagem, o tempo de residência do gás no sistema deve ser curto o bastante para que se possa considerar que o equilíbrio térmico e mássico entre as fases seja atingido rapidamente e a variação de umidade e temperatura da fase gasosa na camada delgada seja desprezível. Entretanto, alguns estudos já comprovam que parâmetros estruturais, com a porosidade, influenciam no comportamento do perfil de velocidade no interior do leito, apresentando um pico de velocidade na região próxima à parede. Mesmo com os avanços neste campo, a obtenção de medidas experimentais no interior do leito fixo é difícil, por causar perturbações em sua estrutura e modificações no comportamento do escoamento, necessitando de avaliação da influência sobre a transferência de calor e massa. Portanto, a análise por meio de técnicas de Fluidodinâmica Computacional (CFD) mostram-se como excelente possibilidade de utilização, por já serem aplicadas em outros sistemas de complexidade semelhante em que ocorrem mecanismos de transferência simultâneos. Neste contexto, no presente trabalho foi avaliado o processo de secagem em leito fixo de pequena espessura utilizando a técnica de CFD (*software* ANSYS – FLUENT). Para este estudo foram testadas malhas computacionais com refinamento variado, analisados resultados de distribuição de porosidade, velocidade do ar, temperatura e estimativa do coeficiente de transferência de massa local para o interior de um secador de leito fixo. Os resultados mostram que deve-se utilizar com cautela a abordagem em camada fina, pois a energia disponível para todo o leito não se distribui uniformemente, sendo que as camadas inferiores do material recebem maior energia e adquirem a maior quantidade de calor da fase gasosa nos instantes iniciais da operação do secador. O coeficiente convectivo de transferência de massa indica que o potencial de secagem em tal equipamento varia em função da posição e do tempo, principalmente, influenciado pelas variações de velocidade do sistema.

## ABSTRACT

Studies carried out in fixed bed, a major experimental research equipment, use a simplified approach for assessing, for example, drying kinetics of various materials, known as thin-layer approach. For a given system can be encompassed in such an approach, the gas residence time in the system should be short enough so that it may be considered that the heat and mass balance between phases is quickly reached and moisture variation and temperature gas phase in the thin layer is negligible. However, some studies already show that structural parameters, the porosity, influence the speed profile of the behavior inside the bed, with a peak speed in the area close to the wall. Even with the advances in this field, obtaining measurements within the fixed bed are difficult to cause disturbances in its structure and changes in flow behavior, requiring the evaluation of the influence of the heat and mass transfer. Therefore, the analysis by techniques of Computational Fluid Dynamics (CFD) are shown as excellent usability for longer be applied in other similar complex systems that occur concurrent transfer mechanisms. In this context, the present study evaluated the drying process in a fixed bed of small thickness using the CFD technique (software ANSYS - FLUENT). For this study were tested with varying computational mesh refinement, analyzed results porosity distribution, air velocity, temperature and estimating the local mass transfer coefficient for the interior of a fixed bed dryer. The results show that should be used with caution thin layer approach because the energy available to the entire bed is not distributed uniformly, and the lower material layer receive more energy and get the greatest amount of heat in the gaseous phase in early stages of the dryer operation. The convective mass transfer coefficient indicates that the potential drying of such equipment varies as a function of position and time, mainly influenced by variations in system speed.

## SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS .....	i
RESUMO.....	ii
ABSTRACT .....	iii
SUMÁRIO.....	iv
LISTA DE FIGURAS .....	vi
LISTA DE TABELAS .....	viii
LISTA DE SÍMBOLOS.....	ix
Alfabeto latino .....	ix
Alfabeto grego .....	ix
Abreviatura e Siglas.....	x
1. INTRODUÇÃO .....	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
2.1 – escoamento em leito fixo.....	3
2.2 – Distribuição de porosidade radial.....	4
2.3 – Transferência de calor e massa em leito fixo.....	7
2.3 – O leito fixo como camada fina.....	9
2.4 – Métodos computacionais aplicados em leito fixo .....	12
2.5 – Comentários gerais.....	15
3. MODELAGEM MATEMÁTICA .....	17
3.1 – Implementação do modelo de porosidade radial .....	18
3.2 – Tratamento da equação da conservação de quantidade de movimento em meios porosos .....	18
3.3 – Tratamento da equação da conservação de energia em meios porosos .....	23
3.4 – Estimativa do coeficiente de transferência de massa convectivo ( $k_c$ ) ..	25
4. METODOLOGIA .....	27
4.1 – Obtenção da geometria e malha para as simulações.....	27
4.2 – Condições adotadas para solução no ANSYS FLUENT.....	29
4.2.1 – Modelo para o teste de malhas .....	29
4.2.2 – Modelo com condutividade térmica efetiva.....	30
4.2.3 – Modelo com porosidade radial .....	31



4.2.4 – Modelo para estimativa do coeficiente convectivo de transferência de massa .....	32
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	34
5.1 – Teste de independência e escolha de malhas.....	34
5.2 – Testes com condutividades térmicas efetivas.....	35
5.3 – Distribuição radial da porosidade.....	40
5.4 – Velocidade simulada no interior do leito .....	41
5.5 – Temperatura simulada no interior do leito.....	45
5.6 – Estimativa do coeficiente convectivo de transferência de massa ( $k_c$ ) no interior do leito .....	50
6. CONCLUSÕES .....	54
7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	55
REFERÊNCIAS .....	56

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Representação esquemática de um leito fixo.....	3
Figura 2.2 – Corte transversal em um leito fixo cilíndrico.....	5
Figura 2.3 – Comportamento qualitativo da porosidade em função da posição radial em um leito fixo cilíndrico .....	5
Figura 2.4 – Distribuição axial de termopares ao longo do meio poroso.....	10
Figura 4.1 – Domínio computacional com dimensões, regiões da geometria desenvolvida e localizações da aquisição de dados .....	27
Figura 4.2 – Esquema de construção para <i>boundary layer</i> .....	28
Figura 5.1 – (A) Malha $C_1$ utilizada nas simulações e (B) detalhamento da <i>boundary layer</i> na proximidade da parede .....	35
Figura 5.2 – Valores de temperatura em cinco posições no interior do leito fixo com modelo de porosidade constante $\varepsilon = 0,4$ e $k_{\text{eff},0} = 8,4 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ , em função do tempo .....	36
Figura 5.3 – Medida experimental da temperatura em função do tempo .....	36
Figura 5.4 – Valores de temperatura em cinco posições no interior do leito fixo com modelo de porosidade constante $\varepsilon = 0,4$ e $k_{\text{eff},w} = 18,1 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ , em função do tempo.....	37
Figura 5.5 – Medida experimental da temperatura em função do tempo, para o meio poroso úmido.....	38
Figura 5.6 – Valores de temperatura em cinco posições no interior do leito fixo com modelo de porosidade constante $\varepsilon = 0,4$ e $k_{\text{eff},d} = 0,27 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ , em função do tempo.....	39
Figura 5.7 – Medida experimental da Temperatura em função do tempo, para o meio poroso seco .....	39
Figura 5.8 – Valores de porosidade simulada no interior do leito, em função da posição radial .....	41
Figura 5.9 – Valores de velocidade em cinco posições axiais no interior do leito fixo com modelo de (A) porosidade constante $\varepsilon = 0,4$ , (B) Haideger <i>et al.</i> (1989), (C) Giudici (1991) e (D) Mueller (1992), em função do tempo .....	42
Figura 5.10 – Contornos de velocidade ( $\text{m s}^{-1}$ ) simulada no interior do leito em 1 minuto de operação utilizando no modelo (A) porosidade constante $\varepsilon = 0,4$ , (B) Haideger <i>et al.</i> (1989), (C) Giudici (1991) e (D) Mueller (1992).....	43

Figura 5.11 – Valores de velocidade simulada no interior leito à 2,5 cm da base, em função da posição radial.....	44
Figura 5.12 – Valores de temperatura em cinco posições axiais no interior do leito fixo com modelo de (A) porosidade constante $\varepsilon = 0,4$ , (B) Haideger <i>et al.</i> (1989), (C) Giudici (1991) e (D) Mueller (1992), em função do tempo .....	46
Figura 5.13 – Comparativo entre os valores de temperatura entre os modelos de (A) porosidade constante $\varepsilon = 0,4$ , (B) Haideger <i>et al.</i> (1989), (C) Giudici (1991) e (D) Mueller (1992) na posição à 3 cm da base, em função do tempo 48	
Figura 5.14 – Contornos de temperatura (K) simulada no interior do leito em 1 minuto de operação utilizando o modelo (A) porosidade constante $\varepsilon = 0,4$ , (B) Haideger <i>et al.</i> (1989), (C) Giudici (1991) e (D) Mueller (1992).....	48
Figura 5.15 – Valores de temperatura simulada à 2,5 cm da base do leito fixo em 1 minuto de operação, em função da posição radial .....	50
Figura 5.16 – Valores do Número de Reynolds (Re) no interior do leito à 2,5 cm da base, em função da posição radial.....	51
Figura 5.17 – Valores do Número de Schmidt (Sc) no interior do leito à 2,5 cm da base, em função da posição radial.....	51
Figura 5.18 – Valores do coeficiente convectivo de transferência de massa ( $k_c$ ) no interior do leito à 2,5 cm da base, em função da posição radial.....	52
Figura 5.19 – Contornos para o coeficiente convectivo de transferência de massa ( $k_c$ ) simulado no interior do leito em 1 minuto de operação utilizando no modelo (A) porosidade constante $\varepsilon = 0,4$ , (B) Haideger <i>et al.</i> (1989), (C) Giudici (1991) e (D) Mueller (1992).....	53

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 4.1– Características das malhas computacionais testadas .....	29
Tabela 4.2 – Condições de contorno e modelos adotados nas simulações no modelo para o teste de malhas .....	30
Tabela 4.3 – Parâmetros do modelo e do leito.....	30
Tabela 4.4 – Condições de contorno e modelos adotados nas simulações no modelo com condutividade térmica efetiva .....	31
Tabela 4.5 – Condições de contorno e modelos adotados nas simulações no modelo com porosidade radial .....	32
Tabela 4.6 – Condições de contorno e modelos adotados nas simulações modelo para estimativa do coeficiente convectivo de transferência de massa	33
Tabela 5.1 – Resultados das malhas testadas.....	34

## LISTA DE SÍMBOLOS

### Alfabeto latino

a, b, c	Parâmetros genéricos	[-]
$C_{p,p}$	Calor específico do sólido	$[L^2T^{-2}\theta^{-1}]$
$C_{p,ar}$	Calor específico do ar	$[L^2T^{-2}\theta^{-1}]$
$D_L$	Diâmetro do leito fixo	[L]
$D_p$	Diâmetro de partícula	[L]
$D_{vap-ar}$	Difusão de vapor d'água no ar	$[LT^{-1}]$
g	Aceleração gravitacional	$[L T^{-2}]$
$J_0$	Função Bessel	[-]
$k_c$	Coeficiente convectivo de transferência de massa	$[L T^{-1}]$
$k_f$	Condutividade térmica do fluido	$[MLT^{-3}\theta^{-1}]$
$k_s$	Condutividade térmica do sólido	$[MLT^{-3}\theta^{-1}]$
$k_{eff,0}$	Condutividade térmica efetiva na estagnação	$[MLT^{-3}\theta^{-1}]$
$k_{eff,d}$	Condutividade térmica efetiva considerando o meio poroso seco	$[MLT^{-3}\theta^{-1}]$
$k_{eff,w}$	Condutividade térmica efetiva considerando o meio poroso úmido	$[MLT^{-3}\theta^{-1}]$
L	Comprimento do leito	[L]
R	Raio do leito	[L]
r	Posição Radial	[L]
$\hat{r}$	Raio adimensionalizado	[-]
Re	Adimensional de Reynolds	[-]
Sc	Adimensional de Schmidt	[-]
Sh	Adimensional de Sherwood	[-]
T	Temperatura	$[\theta]$

### Alfabeto grego

$\rho_s$	Massa específica do leito	$[ML^{-3}]$
$\rho_f$	Massa específica do fluido	$[ML^{-3}]$
$\varepsilon$	Porosidade	[-]
$\mu_{ar}$	Viscosidade do ar	$[ML^{-1}T^{-1}]$
$\nu$	Viscosidade cinemática	$[L^{-1}T^{-1}]$

## Abbreviatura e Siglas

CFD	<i>Computational fluid dynamics</i>
UDF	<i>User-defined function</i>
UDM	<i>User-defined memory</i>

## 1. INTRODUÇÃO

O leito fixo é um equipamento utilizado para a secagem de materiais particulados, especialmente aplicado para a secagem de materiais mecanicamente sensíveis e no âmbito da pesquisa, para a avaliação de cinética de secagem de sólidos particulados. Neste equipamento, o ar de secagem aquecido entra em contato com o material particulado úmido acondicionado em uma coluna vertical de geometria cilíndrica (um leito fixo). Em geral, a injeção do ar é realizada na base do sistema e percola o leito até o topo, saindo com maior umidade.

A compreensão das diversas operações realizadas em leito fixo envolve a transferência simultânea de calor, massa e quantidade de movimento, na presença de várias fases. Para a secagem, por exemplo, a fase gasosa entra em contato com a fase sólida a ser seca e as moléculas de água presente na superfície do material são transportadas para o ar, enquanto a água contida no seu interior é deslocada para a superfície do sólido, mantendo assim o processo.

No entanto, a literatura apresenta que as características estruturais do leito fixo influenciam nestes fenômenos de transferência e precisam ser melhor previstos e analisados.

Durante décadas a técnica de avaliação da cinética de secagem conhecida como abordagem em camada fina, vem sendo utilizada por pesquisadores para estimar a cinética dos mais diversos materiais. Para que um determinado sistema possa ser englobado em tal abordagem, o tempo de residência do gás no sistema deve ser curto o bastante a fim de que se possa considerar o equilíbrio térmico e mássico entre as fases atingido rapidamente e a variação de umidade e temperatura da fase gasosa na camada delgada seja desprezível. Assim, é possível assumir que uma camada de material a ser seco é fina o bastante a fim de assegurar que gradientes de temperatura e umidade no interior do leito possam ser considerados desprezíveis.

Trabalhos recentes da literatura vêm questionando a metodologia adotada no estudo de leitos de pequena espessura. Utilizando medidas indiretas de umidade, há diversos trabalhos na literatura que descrevem a curva de secagem para as condições experimentais a partir da abordagem em

camada fina, entretanto, esta não fornece indicação sobre o transporte de energia e de umidade no interior do material processado.

Em paralelo, a Fluidodinâmica Computacional (CFD – *Computational Fluid Dynamics*) vem se destacando na análise de fenômenos de transferência de calor, massa e quantidade de movimento nos mais diversos equipamentos, fornecendo informações particularmente importantes em casos onde a experimentação é limitada. A modelagem e simulação computacional dos perfis de temperatura, umidade e quantidade de movimento no secador permite, por exemplo, examinar e interpretar a influência das condições operacionais sobre o processo sem a necessidade de recorrer a um extensivo conjunto de testes experimentais. O emprego da Fluidodinâmica Computacional é uma alternativa recorrente que permite esta análise.

Aplicar a CFD para o estudo dos fenômenos de transferência em secadores contribui diretamente com o projeto e controle de novos equipamentos, bem como para a otimização de secadores já existentes, assegurando a obtenção de um produto final em condições adequadas de beneficiamento e armazenamento.

Neste contexto, no presente trabalho foi avaliado o processo de secagem em leito fixo de pequena espessura utilizando a técnica da CFD (*software* ANSYS – FLUENT). Para este estudo foram analisados resultados de distribuição de porosidade, velocidade do ar, temperatura no interior do equipamento e estimativa do coeficiente de transferência de massa local para um equipamento de leito fixo.



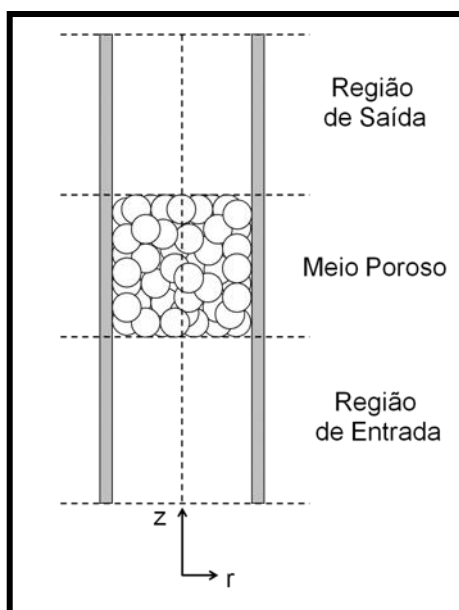
## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são elencados trabalhos acadêmicos e científicos que apresentam aspectos gerais referentes à aplicação de leito fixo em diversas áreas, tratando do estudo empírico, sua modelagem matemática e resolução por técnica computacional.

### 2.1 – escoamento em leito fixo

O leito fixo consiste de um arranjo de material sólido disposto em determinado espaço de forma que um fluido passe através deste, sem arrastá-lo devido a fixação, geralmente pela presença de telas para contenção do material. A Figura 2.1 apresenta a ilustração de um leito fixo constituído de partículas esféricas contido em um tubo cilíndrico, especificando as regiões de entrada, de saída e do meio poroso (leito fixo).

Figura 2.1 – Representação esquemática de um leito fixo



Fonte: Autor, 2016.

Na indústria química a utilização de equipamentos com colunas contendo recheio, tipo leito fixo, é bastante variada: adsorção e absorção de gases, trocas iônicas, reações catalíticas heterogêneas, fermentação no estado sólido, secagem de partículas úmidas, dentre outras.

As características estruturais do leito fixo são objeto de estudo em diferentes trabalhos da literatura. O empacotamento do leito de partículas que compõe o leito fixo, conforme observado por Zotin (1985), intrínseco em colunas de recheio é responsável por um escoamento preferencial do fluido próximo às paredes da coluna. Este efeito, é causado pela não uniformidade da ordenação das partículas dentro da região porosa, observando-se nas proximidades da parede uma região de com maior ordenamento no empacotamento das partículas devido ao contato das mesmas com a parede.

O reflexo do ordenamento no interior do leito é a presença de um perfil de porosidade radial, que ocorre principalmente pelo contato das partículas com a parede, que força essa primeira camada de partículas a se ordenar. A partir daí a ordenação diminui gradativamente quando se distância da parede, resultando em um leito com alta porosidade e alta permeabilidade próximo à parede, ao contrário da região central, que se apresenta menos porosa (SINGULANI, 2001).

Duas vertentes são apontadas por Zotin (1985) para analisar o efeito de parede dependendo do regime de escoamento adotado. Segundo a autora, quando os resultados são obtidos em condição turbulenta, à medida que o efeito de parede se torna mais significativo a perda de carga no leito se reduz, para uma condição de vazão fixa. A justificativa para tal comportamento recai nos inúmeros caminhos preferenciais existentes nessa região, que facilitam a passagem do fluido. Entretanto, quando os dados são obtidos sob regime de escoamento laminar, a autora observou que o efeito de parede colabora para a elevação da queda de pressão devido ao aumento do atrito na parede promover maiores perdas por atrito fluido-parede.

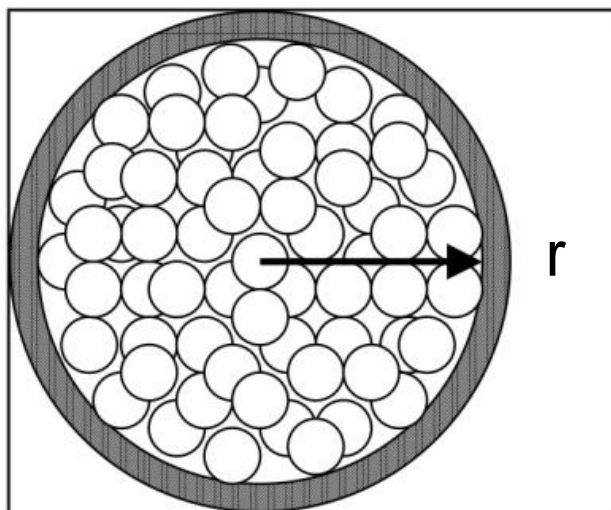
## **2.2 – Distribuição de porosidade radial**

Conforme exposto anteriormente, o empacotamento do leito promove alterações da porosidade na direção radial do leito. Esta alteração perturba o escoamento do fluido em leito fixo, que por sua vez é modificado em função por perfis de porosidade ocasionando diferentes velocidades intersticiais do fluido dentro da região porosa, conforme observado por Zotin (1985)

Para um leito fixo cilíndrico composto de partículas esféricas, qualitativamente, a Figura 2.2 apresenta um corte transversal em um leito fixo e

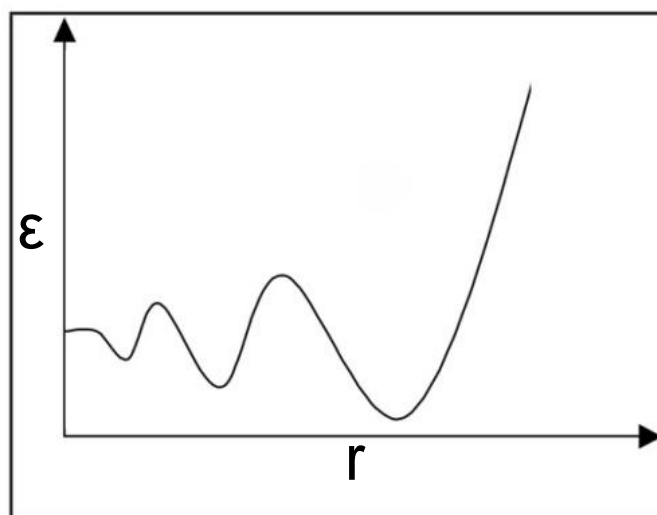
a Figura 2.3 apresenta uma representação da relação entre a porosidade e a distância radial.

Figura 2.2 – Corte transversal em um leito fixo cilíndrico



Fonte: Adaptado de Béttega (2006).

Figura 2.3 – Comportamento qualitativo da porosidade em função da posição radial em um leito fixo cilíndrico



Fonte: Adaptado de Béttega (2006).

É possível visualizar a presença de um maior espaçamento entre partículas na região próxima à parede, pois a mesma impossibilita a aglomeração de várias partículas na mesma região, como ocorre no centro do

leito. Esta maior aglomeração proporciona menores porosidades, pois reduz o espaçamento vazio por onde o fluido deverá escoar (BÉTTEGA, 2006).

Diversos trabalhos da literatura já identificaram e estudaram a variação da porosidade do leito fixo. Neste contexto, alguns modelos propostos na literatura buscam captar as modificações em propriedades estruturais do leito e seu efeito na distribuição de porosidade por meio de equações que descrevem seu comportamento em função da posição radial.

O modelo proposto por Giudici (1991) incorpora as não uniformidades radiais do leito fixo por meio de uma correlação matemática de variação oscilatória amortecida da porosidade, considerando simplesmente a variação principal da fração de vazios com a distância à parede, na forma da Equação 2.1.

$$\varepsilon = \varepsilon_g + \left[ 1 + \left( \frac{1}{\varepsilon_g - 1} \right) \cdot e^{\left( \frac{-a(R-r)}{D_p} \right)} \right] \quad (2.1)$$

Onde  $\varepsilon_g = 0,4$ ,  $a = 6$  para leito de esferas e  $a = 8$  para leito de partículas não esféricas. Destaca-se como característica importante deste modelo que a partir da parede do equipamento até o comprimento de aproximadamente um diâmetro de partículas esféricas (direção radial) é a região onde ocorrem as oscilações de velocidade com maior intensidade, sendo amortecidas à medida que se afasta da parede (GIUDICI, 1991).

O perfil de porosidade radial obtido através da correlação de Mueller (1992) é apresentado na Equação 2.2. Esta equação é formatada como correlação empírica restrita a um leito fixo com distribuição aleatória de partículas num recipiente cilíndrico de diâmetro  $D_L$ , diâmetro do leito fixo, constituído de esferas de tamanho uniforme com diâmetro de partícula,  $D_p$ .

$$\varepsilon = \varepsilon_m + (1 - \varepsilon_m) J_0(b\hat{r}) e^{-a\hat{r}} \quad (2.2)$$

onde

$$b = 7,45 - \frac{3,15}{D_L / D_p} \quad \text{para } 2,02 \leq D_L / D_p \leq 13,0 \quad (2.3)$$

$$b = 7,45 - \frac{11,25}{D_L / D_p} \text{ para } D_L / D_p > 13,0 \quad (2.4)$$

$$a = 0,315 - \frac{0,725}{D_L / D_p} \quad (2.5)$$

$$\hat{r} = \frac{r}{D_p} \quad (2.6)$$

$$\varepsilon_m = 0,365 + \frac{0,220}{D_L / D_p} \quad (2.7)$$

O perfil de porosidade de Mueller (1992) identifica um comportamento oscilatório para a porosidade ao longo da direção radial. As oscilações na região da parede apresentam maior amplitude, com uma redução gradativa até a região central do leito.

Assim com os trabalhos citados anteriormente, o modelo de Haideger *et al.* (1989) inclui as variações radiais da porosidade em leito fixo de forma semelhante, e calculada pela Equação 2.8. Com o valor de  $\varepsilon_h = 0,4$  para leito de partículas esféricas.

$$\varepsilon = \varepsilon_h + \left[ 1 + 0,55 \cdot e^{\left(1 - 2 \left( \frac{R-r}{D_p} \right)\right)} \right] \quad (2.8)$$

Os três trabalhos supracitados concluem em seus estudos que existe influência da porosidade, parâmetro estrutural do leito fixo, sobre o escoamento do ar no seu interior ao incorporar as não uniformidades no meio poroso. A não uniformidade do perfil de velocidades ao longo da direção radial do escoamento altera a transferência de calor e massa no sistema, conforme discutido na seção seguinte.

### 2.3 – Transferência de calor e massa em leito fixo

Além dos efeitos sob o escoamento interno em meios porosos, há ainda a preocupação em se verificar as consequências provenientes da estrutura de

leitos fixos sob a transferência de calor e/ou a transferência de massa em leitos fixos.

O estudo da transferência de calor em meios porosos tem por objetivo determinar a distribuição de temperatura do meio na presença do escoamento de fluido, tanto em regime permanente, quanto em seu período transiente. Conhecida as características físicas e estruturais do material, por exemplo, a porosidade, condutividade térmica, velocidade do fluido, calor específico, massa específica e viscosidade.

A representação matemática da transferência de calor em meios porosos, pode ser feita segundo a abordagem a uma fase, onde as temperaturas das fases sólida e fluida são tidas como idênticas. Desta forma, todos os mecanismos de transferência de calor existentes são englobados em um único parâmetro térmico: a condutividade térmica efetiva.

Mesmo que os parâmetros de transporte do modelo a uma fase representem grande variedade de fenômenos, a abordagem pseudo-homogênea, mais simples, ainda representa satisfatoriamente os fenômenos de transferência de calor para alguns casos em meios porosos (PERAZZINI, 2014).

Problemas apresentados por Pitol (2014) para sistemas de fermentação são análogos em diversas aplicações de leito fixo como a elevação da temperatura na região de parede e alterações do mecanismo convectivo em regiões do leito devem ser melhor investigadas. Assim, a distribuição radial de velocidade do ar previamente comprovada por Zotin (1985) devido aos efeitos estruturais do leito, podem influenciar também na transferência de calor. O que poderia explicar esta elevação de temperatura nas proximidades da parede do leito fixo.

No estudo da transferência de massa em meios porosos há interesse na obtenção da distribuição dos componentes no meio, neste trabalho no leito fixo, percolado pelo fluido, em alguns casos, é necessária a determinação do coeficiente de transferência de massa por convecção, uma abordagem análogo aos estudo da transferência de calor.

Este coeficiente pode ser estimado a partir de números adimensionais que relacionam propriedades do fluido e do material particulado utilizado. Esta formulação é utilizada com sucesso por Arrieche (2007) e Cuel (2009) para

estimativa do coeficiente de transferência de massa em sistemas de secagem e purificação em coluna de recheio, respectivamente.

O arranjo de partículas que constitui o leito fixo imprime características particulares ao escoamento do ar na região de parede, como mostrado na seção 2.2. O empacotamento do leito faz com que o ar percorra os espaços vazios entre as partículas, tornando a característica estrutural do leito um aspecto importante na fluidodinâmica. As alterações provocadas pela variação de porosidade no escoamento, são sensíveis também na distribuição de temperatura. Além da influência na transferência de massa por mecanismo convectivo com apresentado por Cruel (2009).

### **2.3 – O leito fixo como camada fina**

A secagem é uma operação que possui grande importância em diferentes transformações industriais e na conservação de produtos agrícolas, bem como na preservação de alimentos. Este processo envolve a transferência simultânea de calor e massa entre o ar, geralmente aquecido, e um material úmido.

O método tradicionalmente utilizado para se obter a cinética de secagem de partículas emprega a abordagem em camada fina. A camada fina consiste de um leito fixo de partículas com pequena espessura, que é normalmente exposto a uma corrente de ar com o objetivo de se obter informações acerca do processo de secagem. A espessura de uma camada fina deve ser pequena o suficiente para permitir que não ocorra variações na temperatura e umidade do ar de secagem quando passa pelo meio poroso (FYHR E KEMP, 1998).

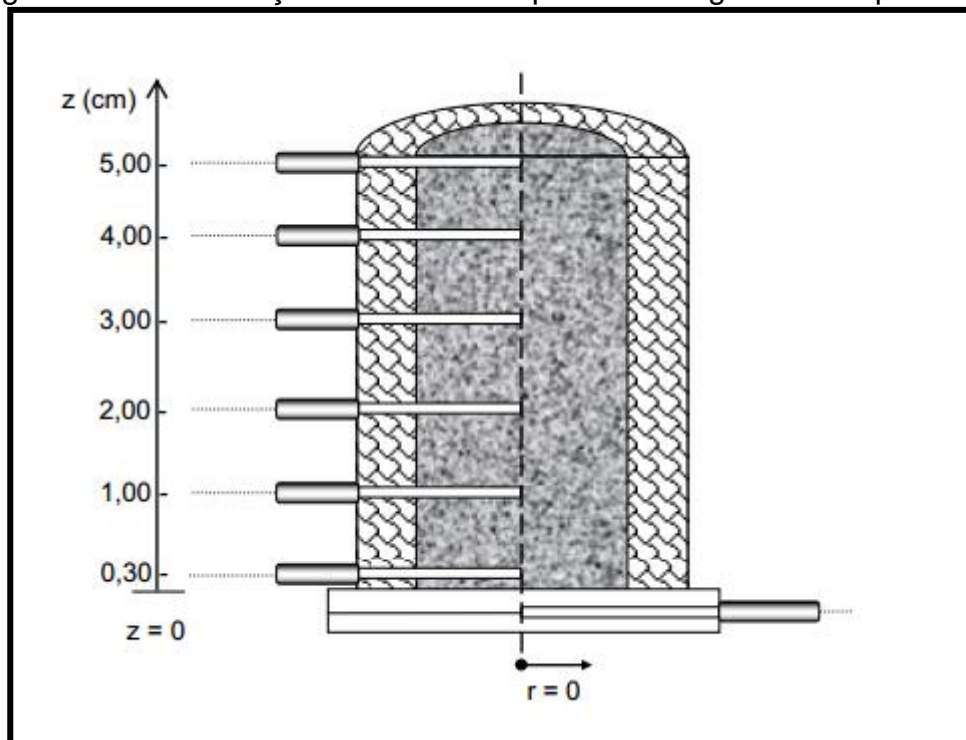
Para que um determinado sistema possa ser englobado em tal abordagem, o tempo de residência do gás no sistema deverá ser curto o suficiente para que se possa considerar que o equilíbrio térmico e mássico entre as fases seja atingido rapidamente e a variação de umidade e temperatura da fase gasosa na camada fina seja desprezível. Assim, é possível assumir que uma camada de material a ser seco é, de fato, fina o suficiente para assegurar que os gradientes de temperatura e de umidade no interior do material possam ser considerados desprezíveis (PERAZZINI, 2014).

Ao se repetir os critérios e hipóteses assumidas no modelo, este permite a obtenção de curvas de cinética de secagem. Segundo Perazzini

(2014) a abordagem em camada fina possibilita a verificação da influência das condições operacionais do processo e, principalmente, simplifica a complexa modelagem matemática da secagem.

Perazzini (2014) verificou a aproximação para camada fina em seu trabalho estudando a transferência de calor mediante a obtenção de dados de temperatura em função do tempo para diferentes posições axiais no leito. A Figura 2.4 traz um esquema de corte longitudinal no leito fixo em que é possível verificar a posição dos termopares ao longo do meio, tomando a superfície inferior como referência. Os termopares estão dispostos de maneira helicoidal a fim de minimizar perturbações no meio e no escoamento do ar (PERAZZINI, 2014).

Figura 2.4 – Distribuição axial de termopares ao longo do meio poroso



Fonte: Perazzini, 2014.

Como conclusão, a respeito do estabelecimento da espessura da camada fina pela determinação da temperatura no meio poroso, Perazzini (2014) aponta que a energia disponível para todas as camadas do meio não é a mesma, visto que as camadas inferiores adquirem a maior quantidade de calor possível da fase gasosa. Constata-se assim a impossibilidade de se assumir que no interior do meio poroso os gradientes de temperatura são



desprezíveis para meios com camadas maiores do que 1 cm (hipótese comumente utilizada).

Trabalhos experimentais recentes buscaram determinar um modelo que melhor descreva a secagem em diversos materiais empregando a abordagem camada fina. De forma geral, observa-se diferentes critérios para a adoção desta metodologia, quando analisado a espessura da camada.

Carlesso *et al.* (2007) ajustaram dados experimentais da secagem por convecção em camada fina de sementes de maracujá-amarelo para cinco modelos matemáticos pré-selecionados. Os testes foram realizados em um secador de leito fixo. Amostras contendo 120g de sementes em equilíbrio térmico com o ar ambiente foram então colocadas na bandeja, sendo então distribuídas sobre o fundo perfurado, de maneira a formar camada fina com altura correspondente à espessura média das sementes.

Ao determinar as características da secagem de bagaço de uva fermentado em secador com ar aquecido Ferreira *et al.* (2012) avaliaram a capacidade descritiva de modelos matemáticos de secagem em camada fina. O material composto por casca e semente de uva foi disposto de forma homogênea em uma bandeja de alumínio, com fundo telado em malha fina. A espessura do bagaço foi de cerca de 10 mm.

Para investigaram a secagem por convecção de banana inteiras Silva *et al.* (2014) utilizaram três peneiras, cada uma com um conjunto de banana, que foram colocados num secador por convecção de ar com fluxo vertical. Os autores não apresentam a espessura do material empregado, ou seja, apenas assumem que este admite a abordagem em camada fina.

As disparidades quanto a determinação da camada fina em cada estudo é instigante, por apresentar grandes diferenças de espessura utilizada para cada material e ainda assim considerá-lo uma camada fina. Além disso, há grande dificuldade na conclusão a respeito da dinâmica dos mecanismos de transporte no interior da camada durante o processo de secagem, pois a constituição de um leito fixo, mesmo em camada fina, dificulta a medida local instantânea de variáveis (temperatura, umidade, velocidade) em equipamentos, seja na escala industrial quanto experimental.

Os estudos de transferência de calor e massa em meios porosos ainda necessitam ser melhor compreendidos para que possa representar

satisfatoriamente a realidade física dos fenômenos. Esta análise é bastante complexa devido a inúmeros fatores, como por exemplo a dependência tanto das propriedades e características do material a ser seco, quanto das condições operacionais, a utilização de uma camada muito fina de material é impraticável, em termos experimentais (PERAZZINI, 2014).

Outro fator agravante neste quadro, são os fenômenos que ocorrem dentro dos materiais porosos, bem como os processos de troca nas interfaces. Dentre estes estão: a formação de gotículas na superfície, a condução no material, radiação (infravermelho e/ou solar), a mudança de fase, forças de contato entre os sólidos, transporte de líquido por capilaridade além dos fenômenos de transferência de quantidade de movimento, calor e massa simultâneos (DEFRAEYE, 2014). Evidenciando assim, que mediante medidas externas ao material em um leito fixo, é inviável realizar inferências exatas sobre os mecanismos internos de escoamento, transferência de calor e massa.

Além disso, a restrição estrutural observada fez necessária a busca de formas indiretas de medida experimental, pois há dificuldade na inserção de sensores de medida no interior do leito sem que estes interfiram no comportamento durante as medidas. Assim, as ferramentas computacionais tem se apresentado como uma alternativa para alcançar este objetivo.

#### **2.4 – Métodos computacionais aplicados em leito fixo**

O estudo do movimento de fluidos vem sendo realizado há muitos séculos partindo-se de inicialmente de tratamentos empíricos, após isso, a partir de equações de conservação. No século XIX avanços na ciência permitiram o tratamento matemático como as equações de Navier-Stokes para determinar o comportamento dinâmico do escoamento de fluidos. Soluções analíticas das equações de Navier-Stokes só foram determinadas para alguns poucos casos, devido principalmente à sua complexidade de resolução, por apresentar-se na forma de equações diferenciais parciais, não lineares e a teoria desta classe matemática de equações ainda não apresenta desenvolvimento suficiente para possibilitar a obtenção de soluções analíticas que representem regiões arbitrárias e condições de contorno gerais (FORTUNA, 2000).

Devido ao fato de os tratamentos analíticos apresentarem-se limitados, e com o advento do computador digital a partir da década de 50, surgiu a alternativa de obter soluções numéricas para as equações de Navier-Stokes utilizando-se de técnicas computacionais, pois, muitas vezes essa é a forma mais prática, ou a única, de se obter informações sobre o escoamento (FORTUNA, 2000).

O uso de técnicas numéricas para solução de problemas complexos da engenharia e da física é hoje uma realidade, graças ao vertiginoso desenvolvimento de computadores de alta velocidade e de grande capacidade de armazenamento. Em função dessa disponibilidade computacional, que cresce exponencialmente, o desenvolvimento de algoritmos para a solução dos mais diversos problemas tem recebido enorme atenção dos analistas numéricos e engenheiros, fazendo aumentar, também em taxas acentuadas, o número de pesquisadores e usuários de simulação numérica.

Além disso, a versatilidade e generalidade dos métodos numéricos para simulação de problemas de engenharia, e a relativa simplicidade de aplicação dessas técnicas, são outros fatores motivadores ao seu uso (MALISKA, 2010).

A literatura acerca da aplicação de métodos computacionais ao estudo de leito fixo é bastante escassa. Tratando-se de simulação numérica de escoamentos em leito fixo um dos primeiros trabalhos publicados com esse enfoque Béttega, Corrêa e Freire (2007) que estudaram a distribuição de velocidade do ar dentro de um leito fixo.

Os autores analisaram a representatividade da medida efetuada a jusante do leito fixo, técnica bastante utilizada em virtude da dificuldade de inserção de medidores no interior do leito fixo (SUBAGYO e BROOKS, 1998).

Por meio de simulação computacional avaliou-se a representatividade desta técnica experimental, concluindo-se que a utilização de velocidade superficial deve ser evitada e o uso da velocidade intersticial para a condição de saída melhora a estimativa do perfil de velocidade nesta região. Além disso, verificou-se que a medida de distribuição de velocidade a jusante do leito fixo, a fim de inferir a distribuição de velocidade no interior do leito, deve ser realizada com cuidado.

Ao avaliar a influência da porosidade sobre a fluidodinâmica do ar na saída de um leito fixo Nagliate, Béttega e Corrêa (2010) utilizando o software

ANSYS FLUENT para obtenção do comportamento fluidodinâmico mediante perfil de velocidade do ar na saída do leito fixo. Os resultados obtidos através da modelagem foram verificados com base em dados experimentais e simulados da literatura. Como resultado deste estudo as simulações realizadas apresentaram respostas coerentes com os dados experimentais e simulados da literatura, obtendo distribuição oscilatória da velocidade, ocasionado por um perfil oscilatório de porosidade.

Um avanço posterior foi a avaliação numérica de modelos de porosidade aplicados à simulação do escoamento e da transferência de calor em leito fixo realizado por Béttega *et al.* (2013a), que estudaram um leito fixo com o aquecimento pela parede em regime permanente de operação. Os autores observaram a influência do modelo e porosidade na distribuição de temperatura no sistema, apresentando respostas sensivelmente melhores para distribuição bidimensional de temperatura no interior do leito com a incorporação de modelos de porosidade em comparação à abordagem tradicional de porosidade constante.

Sob a mesma temática, Béttega *et al.* (2013b) estudaram a transferência de calor no interior de um leito fixo de esferas de vidro com fonte de calor localizada na parede do equipamento a partir de um modelo bidimensional utilizando-se CFD. Foram avaliados diferentes perfis para a distribuição de porosidade ao longo da direção radial do leito e seu efeito sobre o comportamento no inteiro do equipamento. A partir desta abordagem determinaram a distribuição de temperatura na saída do leito para diferentes velocidades de fluido, utilizando parâmetros físicos das fases presentes no sistema. Comparando-se os resultados obtidos através de CFD com os dados experimentais e outros modelos presentes na literatura, os autores verificaram a capacidade do modelo e do procedimento numérico adotado de representar o fenômeno.

Os trabalhos mencionado anteriormente demonstram o sucesso na aplicação de métodos computacionais, em especial CFD, para simulação do comportamento do escoamento e da distribuição de temperatura dentro de um leito fixo. Entretanto, estes trabalhos concentraram-se basicamente em sistemas com aquecimento pela parede operando em regime permanente.

Neste contexto, destaca-se a ausência de trabalhos abordando a dinâmica de aquecimento do leito, em regime transiente, e o efeitos da distribuição de porosidade e velocidade sob a mesma. Ressalta-se também a escassez de trabalhos abordando a secagem no interior do leito e os mecanismos envolvidos neste processo.

## 2.5 – Comentários gerais

Apesar do número restrito de estudos aplicando a CFD para avaliação dos fenômenos de transporte em leito fixo, esta tecnologia vem sendo utilizada de modo satisfatório para estudos de transferência simultânea de calor e massa em diversos sistemas.

Krawczyk e Badyda (2011) apresentam um modelo que descreve os fenômenos de transferência de calor e massa em um processo de secagem solar de águas residuais utilizando CFD. Foi dada atenção a aplicação das condições de contorno na superfície do material, o limite físico entre a fase gasosa (ar) e a fase sólida (material seco), permitindo o cálculo da taxa de secagem e a umidade em função da posição no secador em diversas condições de temperatura.

Padoin *et al.* (2014) utilizaram CFD na predição dos fenômenos de transferência de calor e massa em sistemas multicomponentes e multifásicos. Para tanto, as equações de Maxwell-Stefan em conjunto com a lei de Fick generalizada foram codificadas em linguagem de programação C e o código gerado foi dinamicamente acoplado ao código comercial ANSYS FLUENT. Isto, permitiu a determinação da composição e a temperatura de equilíbrio em um sistema vapor-líquido, sendo cada fase composta por uma mistura de quatro hidrocarbonetos.

O emprego de CFD no estudo de sistemas que apresentam transferência simultânea de calor e massa presentes na literatura corroboram para a confirmação desta técnica como confiável para estudos fenomenológicos de sistemas complexos.

Convém lembrar ainda, que ao avaliar os sistemas pela CFD as nuances das variáveis podem ser conhecidas em regime transiente. Esta abordagem, no caso da aplicação na modelagem e simulação de um leito fixo, permitiria a melhor compreensão de sistemas em camada fina, sem a necessidade de

suposições e hipóteses, demasiadamente restritivas. Desta forma, seria mensurável a variação temporal dos parâmetros.

A conveniente modelagem e simulação computacional dos perfis de temperatura e umidade no secador permite, por exemplo, examinar e interpretar a influência das condições operacionais sobre o processo sem a necessidade de recorrer a um extensivo conjunto de testes experimentais. Além disto, uma maior compreensão da transferência de calor e massa entre o sólido e o fluido contribui para o projeto e controle de novos secadores, bem como para a otimização de secadores já existentes, assegurando a obtenção de um produto final em condições adequadas de beneficiamento e armazenamento (LÓPEZ *et al.*, 1998).

### 3. MODELAGEM MATEMÁTICA

O *software* ANSYS FLUENT possui um modelo para meios porosos padrão, aberto a modificações de acordo com a necessidade do usuário. O modelo de meios porosos pode ser utilizado para uma grande variedade de problemas, sejam sistemas monofásicos ou multifásicos, incluindo o escoamento através de leitos fixos, filtros de papel, placas perfuradas, distribuidores de fluxo e banco de tubos. O detalhamento do modelo a seguir foi baseado em ANSYS (2011).

Ao utilizar este modelo, define-se uma zona de células onde o mesmo é aplicado e a queda de pressão no escoamento é determinada através de suas entradas, sendo descrito através da equação da quantidade de movimento para meios porosos. A transferência de calor através do meio também pode ser representada, com ou sem a suposição de equilíbrio térmico entre o meio sólido e o fluxo de fluido, mediante a modelagem pela equação de energia em meios porosos.

O modelo de meios porosos incorpora uma resistência ao escoamento determinada empiricamente em uma região do sistema definida como porosa. Em essência, o modelo de meios porosos acrescenta um termo de dissipação à equação de quantidade de movimento. Conseqüentemente, algumas hipóteses são assumidas no modelo e suas limitações devem ser reconhecidas.

Uma vez que o bloqueio gerado pelo meio poroso que está fisicamente presente não é representado no modelo, no padrão do ANSYS FLUENT, utiliza e reporta uma velocidade superficial no interior do meio poroso, para garantir a continuidade dos vetores de velocidade através interface do meio poroso. Esta formulação de velocidade superficial não leva a porosidade em consideração ao calcular os termos de convecção e difusão das equações de transporte. Optou-se neste trabalho, por uma alternativa mais representativa em que a velocidade média intersticial é calculada no interior do meio poroso e a porosidade está incluída nos termos diferenciais das equações de transporte desta forma.

Geralmente, no modelo de meios porosos do ANSYS FLUENT, assume-se que a porosidade é isotrópica. Modificações foram realizadas no cálculo padrão da porosidade e serão apresentadas posteriormente.

### 3.1 – Implementação do modelo de porosidade radial

A porosidade,  $\varepsilon$ , é a fração de volume de fluido dentro da região porosa (i. e., a fração de volume sem sólido no meio). A porosidade é utilizada na previsão da transferência de calor e quantidade de movimento do meio poroso. O valor admitido para porosidade deve estar no intervalo de 0 - 1.

Como o *software* permite a inserção de UDF (*user-defined function*) para adaptar propriedades variáveis dos materiais ao modelo, em alguns casos deste trabalho, a porosidade do leito fixo foi modificada, assim como os valores dos componentes do termo fonte nas equações de transporte. Utilizou-se UDF com os modelos de porosidade radial para ligá-la, dinamicamente, ao ANSYS FLUENT, estas podem ser escritas em linguagem C ou C++. As equações inseridas via UDF foram os modelos de porosidade radial de Haideger *et al.* (1989), Giudici (1991) e Mueller (1992). Assim, a porosidade passou a ser calculada em função da posição radial.

Cada UDF deve conter macros e outras funções definidas no ANSYS FLUENT, que permitam acessar os dados gerados pelo pacote de software básico. Em conjunto, ativou-se UDM (*User-defined memory*) para alocação em memória dos resultados de porosidade obtidos durante as simulações em cada instante, tornando-os disponíveis para pós-processamento.

### 3.2 – Tratamento da equação da conservação de quantidade de movimento em meios porosos

Para a simulação numérica do transporte de quantidade de movimento as equações de Navier-Stokes para o escoamento monofásico de fluidos são adotadas, incluindo-se um termo fonte que represente as perdas viscosas e inerciais devido à presença do meio poroso.

A velocidade superficial nas equações governantes é representada pela Equação 3.1.



$$v_s = \varepsilon \cdot v_i \quad (3.1)$$

onde,

$v_s$  : velocidade superficial;

$v_i$  : velocidade intersticial;

$\varepsilon$  : porosidade, definida pela razão entre o volume ocupado pelo fluido e o volume total da região porosa.

Utilizando a formulação de velocidade superficial, e assumindo um escalar genérico ( $\phi$ ), a Equação 3.2 apresenta a formulação para um meio poroso anisotrópico.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\varepsilon \rho \phi) + \nabla \cdot (\varepsilon \rho \vec{v} \phi) = \nabla \cdot (\varepsilon \Gamma \nabla \phi) + \varepsilon S_\phi \quad (3.2)$$

Assumindo porosidade isotrópica e sistema monofásico, as equações de conservação de massa e de quantidade de movimento assumem a forma da Equação 3.3 e Equação 3.4, respectivamente.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\varepsilon \rho) + \nabla \cdot (\varepsilon \rho \vec{v}) = 0 \quad (3.3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\varepsilon \rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\varepsilon \rho \vec{v} \vec{v}) = -\varepsilon \nabla p + \nabla \cdot (\varepsilon \vec{\tau}) + \varepsilon \vec{B}f - \left( \frac{\varepsilon^2 \mu}{K} \vec{v} + \frac{\varepsilon^3 C_2}{2} \rho |\vec{v}| \vec{v} \right) \quad (3.4)$$

O último termo da equação 3.4 representa as forças de arraste viscoso e inerciais impostas pelas paredes dos poros sobre o fluido.

O *software* ANSYS FLUENT assume que as entradas para os coeficientes de resistência são baseados em correlações empíricas bem estabelecidas, que normalmente, são baseadas em velocidade superficial. Portanto, converte automaticamente as entradas dos coeficientes de resistência para aqueles que são compatíveis com a formulação para velocidade intersticial.

Assim, meios porosos são modelados por meio da adição de um termo fonte na equação da continuidade e quantidade de movimento. O termo fonte é

composto de duas partes: um termo de perdas viscosas (o primeiro termo do lado direito da equação 3.5), e o outro termo representa as perdas inerciais (o segundo termo no lado direito da equação 3.5):

$$S_i = \sum_{j=1}^3 D_{ij} \mu v_j + \sum_{j=1}^3 C_{ij} \frac{1}{2} \rho |v| v_j \quad (3.5)$$

onde  $S_i$  é o termo fonte na dimensão  $i$  ( $x$ ,  $y$  ou  $z$ ) da equação de quantidade de movimento,  $|v|$  é o módulo da velocidade,  $D$  e  $C$  são matrizes prescritas. Este termo fonte de quantidade de movimento contribui para o gradiente de pressão na matriz porosa, criando uma queda de pressão proporcional à velocidade do fluido (ou velocidade ao quadrado) no meio poroso.

Calcula-se o termo fonte de quantidade de movimento com a Equação 3.6 para o caso do meio poroso homogêneo.

$$S_i = - \left( \frac{\mu}{\alpha} v_j + C_2 \frac{1}{2} \rho |v| v_j \right) \quad (3.6)$$

onde  $\alpha$  é a permeabilidade e  $C_2$  é o fator de resistência inercial,  $D$  e  $C$  neste caso correspondem a matriz diagonal com  $\frac{1}{\alpha}$  e  $C_2$ , respectivamente, nas diagonais (e zero, para os outros elementos).

Em virtude da inserção do modelo para a estimativa da porosidade radial, os termos de permeabilidade e fator de resistência inercial foram corrigidos para a incorporação deste efeito.

Em regime de escoamento laminar através de meios porosos, a queda de pressão é tipicamente proporcional à velocidade e a constante  $C_2$  pode ser considerada como sendo zero. Desprezando a aceleração convectiva e a difusão, do modelo para meios porosos, reduz-se a Equação 3.7, estabelecida como Lei de Darcy.

$$\nabla p = -\frac{\mu}{\alpha} \vec{v} \quad (3.7)$$

A queda de pressão calculada pelo ANSYS FLUENT em cada uma das três direções coordenadas ( $x$ ,  $y$  e  $z$ ) dentro da região porosa é da pelas Equações 3.8 a 3.10, respectivamente.

$$\nabla p_x = \sum_{j=1}^3 \frac{\mu}{\alpha_{xj}} v_j \Delta n_x \quad (3.8)$$

$$\nabla p_y = \sum_{j=1}^3 \frac{\mu}{\alpha_{yj}} v_j \Delta n_y \quad (3.9)$$

$$\nabla p_z = \sum_{j=1}^3 \frac{\mu}{\alpha_{zj}} v_j \Delta n_z \quad (3.10)$$

onde  $\frac{1}{\alpha_{ij}}$  são as entradas da matriz  $D$  na Equação (3.5),  $v_j$  é o componente da velocidade nas direções  $x$ ,  $y$  e  $z$ ;  $\Delta n_x$ ,  $\Delta n_y$ , e  $\Delta n_z$  são espessuras do meio nas direções  $x$ ,  $y$  e  $z$ .

Aqui, a espessura do meio ( $\Delta n_x$ ,  $\Delta n_y$ , e  $\Delta n_z$ ) são as espessuras reais da região porosa no modelo. Assim, se as espessuras usadas no modelo diferem das espessuras reais, deve-se fazer o ajuste nas entradas para  $\frac{1}{\alpha_{ij}}$ .

Em velocidades de fluido elevadas, a constante  $C_2$  da Equação 3.5 fornece uma correção para as perdas inerciais no meio poroso. Esta constante pode ser visualizada com um coeficiente de perda por unidade de comprimento ao longo da direção do escoamento, permitindo assim que a queda de pressão possa ser especificada como uma função dinâmica (relacionando a perda de carga devido ao atrito do fluido com o meio poroso).

Para a modelagem de uma placa perfurada ou um banco de tubo, pode-se eliminar o termo de permeabilidade e usar o termo de perda inercial sozinho, produzindo a forma simplificada da equação para meios porosos, Equação 3.11.

$$\nabla p = -\sum_{j=1}^3 C_{2ij} \left( \frac{1}{2} \rho v_j |v| \right) \quad (3.11)$$

Considerando a modelagem de um leito fixo. Em escoamento turbulento, o leito fixo é modelado utilizando tanto a permeabilidade quanto um coeficiente de perda inercial. Uma técnica para derivar as constantes apropriadas envolve a utilização da Equação de Ergun (1952), Equação 3.12, uma correlação semi-empírica aplicável numa larga gama do número de Reynolds e para diversos tipos de empacotamento.

$$\frac{|\Delta p|}{L} = \frac{150\mu (1-\varepsilon)^2}{D_p^2 \varepsilon^3} v + \frac{1,75\rho (1-\varepsilon)}{D_p \varepsilon^3} v^2 \quad (3.12)$$

Ao modelar o fluxo laminar através de um leito fixo, o segundo termo da Equação 3.12 pode ser eliminado, o que resulta na Equação 3.13, conhecida com Equação de Blake-Kozeny.

$$\frac{|\Delta p|}{L} = \frac{150\mu (1-\varepsilon)^2}{D_p^2 \varepsilon^3} v \quad (3.13)$$

onde,

$\mu$  : Viscosidade;

$D_p$  : Diâmetro médio de partícula;

$L$  : Comprimento do leito;

$\varepsilon$  : Porosidade.

Comparando-se a Equação 3.7 e Equação 3.11 com a Equação 3.12, a permeabilidade e o coeficiente de perda inercial em cada componente pode ser identificado sob a forma da Equação 3.14 e da Equação 3.15, respectivamente.

$$\alpha = \frac{D_p^2 \varepsilon^3}{150\mu (1-\varepsilon)^2} \quad (3.14)$$

$$C_2 = \frac{3,5 (1-\varepsilon)}{D_p \varepsilon^3} \quad (3.15)$$

Nos casos em que houve a implementação dos modelos de porosidade radial de Haideger *et al.* (1989), Giudici (1991) e Mueller (1992), estes coeficientes foram recalculados de acordo com a porosidade em cada posição radial. Sua implementação foi realizada na própria UDF utilizada para os perfis de porosidade.

Na abordagem padrão, o ANSYS FLUENT resolve as equações de conservação contabilizando a turbulência no meio poroso, sendo esta tratada como se o sólido presente não tivesse efeito sobre as taxas de geração de turbulência e de dissipação. Durante as simulações realizadas no trabalho, o modelo  $\kappa - \varepsilon$  de turbulência foi utilizado.

### 3.3 – Tratamento da equação da conservação de energia em meios porosos

O modelo matemático para a simulação da transferência de calor adotado pelo software ANSYS FLUENT utiliza a equação da energia (Equação 3.16) com algumas modificações no transporte condutivo de calor e nos termos transientes, especificamente para o caso de meios porosos.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot (\vec{v}(\rho E + p)) = \nabla \cdot \left[ k \nabla T - \left( \sum_j h_j \vec{J}_j \right) + \left( \overline{\tau \cdot \vec{v}} \right) \right] + S_f^h \quad (3.16)$$

Para as simulações em que é admitido o equilíbrio térmico entre o fluido e o meio poroso, o fluxo condutivo no meio poroso utiliza uma condutividade efetiva e a expressão do termo fonte de energia inclui a inércia térmica da região sólida sob a forma da Equação 3.17. Nesta equação, o primeiro termo da esquerda é a taxa de variação de energia e o segundo termo da esquerda corresponde a transferência convectiva. Do lado direito, o primeiro termo corresponde à transferência condutiva, o segundo termo à difusão das espécies, o terceiro termo à dissipação viscosa e o último termo sendo o termo fonte entálpico.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon \rho_f E_f + (1 - \varepsilon) \rho_s E_s) + \nabla \cdot (\vec{v}(\rho_f E_f + p)) = \nabla \cdot \left[ k_{eff} \nabla T - \left( \sum_j h_j \vec{J}_j \right) + \left( \overline{\tau \cdot \vec{v}} \right) \right] + S_f^h \quad (3.17)$$

onde,

$E_f$ : Energia total do fluido;

$E_s$ : Energia total do meio sólido;

$\rho_f$ : Massa específica do fluido;

$\rho_s$ : Massa específica do sólido;

$\varepsilon$ : Porosidade do leito;

$k_{eff}$ : Condutividade térmica do meio poroso;

$\vec{J}_j$ : Fluxo difusivo das espécies j;

$h_j$ : Entalpia da espécie j;

$S_f^h$ : Termo fonte entálpico do fluido.

O ANSYS FLUENT permite o cálculo da condutividade térmica do fluido, a condutividade térmica do sólido, a condutividade térmica efetiva anisotrópica através de UDF ou entradas constantes para tais parâmetros.

No entanto, empregou os valores fixos, sendo a condutividade térmica efetiva na estagnação ( $k_{eff,0}$ ) de  $8,4 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ , foi obtida a partir de medida experimental pelo método da sonda linear em regime transiente por Perazzini (2014).

A condutividade térmica efetiva para o meio saturado de ar pode ser determinada segundo o modelo em série e em paralelo. A condutividade de térmica ( $k_1$ ) para uma quantidade de material nos quais os elementos sólidos estão em paralelo com o fluxo de calor é dado pela Equação 3.18. Para a outra situação, modelo em série, a condutividade térmica ( $k_2$ ) é determinada conforme a Equação 3.19.

$$k_1 = \varepsilon.k_g + (1 - \varepsilon).k_s \quad (3.18)$$

$$k_2 = \frac{\varepsilon}{k_g} + \frac{1 - \varepsilon}{k_s} \quad (3.19)$$

Finalmente, a resistência térmica global é calculada pela Equação 3.20. Segundo Perazzini (2014) a condutividade térmica efetiva para o meio poroso

em condição seca ( $k_{\text{eff,d}}$ ) de  $0,27 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$  e em condição úmida ( $k_{\text{eff,w}}$ ) de  $18,1 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ .

$$\frac{1}{k_{\text{eff}}} = \frac{1-f}{k_1} + \frac{f}{k_2} \quad (3.20)$$

O termo  $f$  representa a fração de sólidos que possui um valor aproximadamente 1/4 para meios porosos com porosidade 40%.

### 3.4 – Estimativa do coeficiente de transferência de massa convectivo ( $k_c$ )

A transferência de massa foi avaliada por estratégia indireta conjuntamente com os resultados obtidos por CFD, por meio do coeficiente de transferência de massa convectivo ( $k_c$ ) como indicativo da influência do escoamento e transferência de calor na transferência de massa.

Com base no modelo a camada limite, os coeficientes de transferência de calor podem ser estimados a partir dos números adimensionais de Reynolds (Equação 3.21), número de Schmidt (Equação 2.22) e número de Sherwood (Equação 3.23). Esta análise foi realizada a partir da relação específica para a transferência de massa em corrente gasosa em esfera, para obter o coeficiente de transferência de massa convectivo (WELTY, RORRER e FOSTER, 2013).

$$\text{Re} = \frac{d_p \cdot v_s \cdot \rho_f}{\mu_f} \quad (3.21)$$

$$\text{Sc} = \frac{\mu_f}{D_{\text{vap-ar}} \cdot \rho_f} \quad (3.22)$$

$$\text{Sh} = \frac{k_c \cdot D_p}{D_{\text{vap-ar}}} = 2,0 + 0,552 \cdot \text{Re}^{1/2} \cdot \text{Sc}^{1/3} \quad (3.23)$$

As Equações 3.21, 3.22 e 3.23 foram implementadas no modelo para o ANSYS FLUENT como funções customizadas.

Algumas propriedades do fluido presente no modelo, dependentes da temperatura, foram ajustadas para capturar o efeitos da temperatura local no meio. A viscosidade do ar foi ajustada pela Equação de Sutherland com 2 parâmetros, Equação 3.24, e a massa específica do ar ajustada pela Equação

de Boussinesq, Equação 3.25. As Equações 3.24 e 3.25 foram implementadas no modelo como funções customizadas.

$$\mu = \frac{C_1 T^{3/2}}{T + C_2} \quad (3.24)$$

$$(\rho - \rho_0)g \approx -\rho\beta(T - T_0)g \quad (3.25)$$

A difusividade do vapor de água na atmosfera foi ajustada de acordo com a variação de temperatura por meio da Equação 3.26 apresentada por Marrero e Manson (1972), válida para temperatura entre 280 K e 450 K.

$$D_{vap-ar} = 1,87 \times 10^{-10} \cdot \frac{T^{2,072}}{P} \quad (3.26)$$

A Equação 3.26 foi implementada no modelo para o ANSYS FLUENT como função customizada.

Mais informações sobre o equacionamento podem ser encontradas em ANSYS (2011).



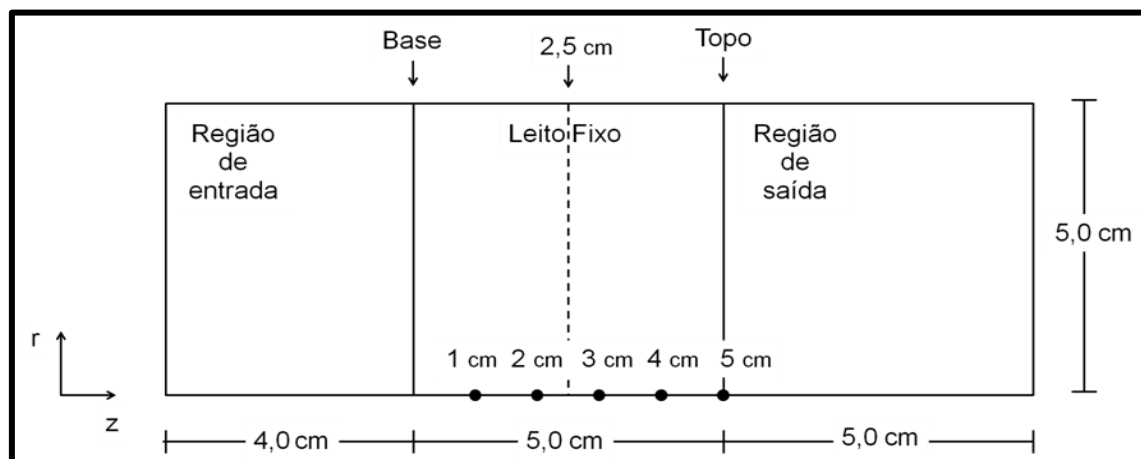
## 4. METODOLOGIA

Nesta seção são abordados o procedimento utilizado para obtenção da geometria, malhas computacionais e aspectos da solução numérica do sistema. São também apresentadas as principais características da abordagem desenvolvida e algumas peculiaridades em relação à implementação do modelo.

### 4.1 – Obtenção da geometria e malha para as simulações

O domínio computacional sob o qual as simulações foram realizadas no presente trabalho foi constituído de três regiões, conforme ilustrado na Figura 2.1, e baseado nas dimensões da unidade experimental utilizada por Perazzini (2014). Elaborou-se a geometria considerando a axissimetria em relação ao eixo  $y$ , possibilitando assim a sua construção bidimensional como ilustrado na Figura 4.1.

Figura 4.1 – Domínio computacional com dimensões, regiões da geometria desenvolvida e localizações da aquisição de dados



Fonte: Autor, 2016.

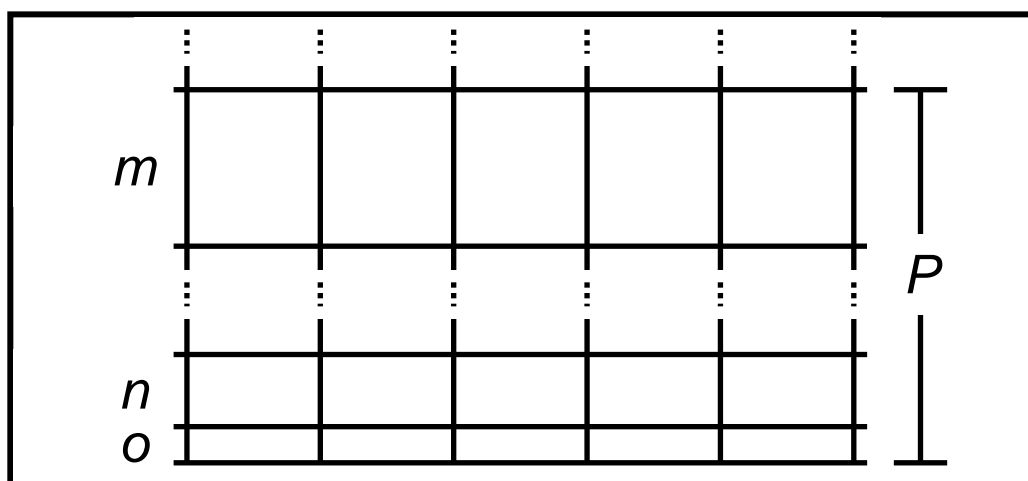
Na Figura 4.1 verifica-se a presença das regiões de entrada, saída e o leito fixo. A presença das regiões deve-se à importância do correto desenvolvimento da fluidodinâmica nas mesmas para representar adequadamente o comportamento do leito fixo. Os pontos marcados (1, 2, 3, 4 e 5 cm) representam as posições onde foram avaliadas diversas variáveis resposta da simulação. Estas posições foram definidos com base nas posições

de medida experimental adotadas por Perazzini (2014) em sistema semelhante.

A geometria e malha computacional foram construídas utilizando o *software* GAMBIT 2.4, que disponibiliza uma interface com o ANSYS FLUENT 14.0, no qual foram também implementadas as condições de contorno do problema. As condições adotadas foram: eixo de axissimetria na direção  $z$  para o eixo central do leito, em  $r = 5$  cm definiu-se a condição de não-deslizamento (parede), a entrada do leito foi assumida como velocidade prescrita e a saída do leito como condição de pressão prescrita.

Na parede do leito foi inserida uma *boundary layer*. Na Figura 4.1 Figura 4.2 é apresentado o esquema de construção da camada e na Tabela 4.1 são apresentadas as características das malhas testadas. Para o teste de malha foram criadas quatro malhas com *boundary layer* (índice 1) e quatro malhas com espaçamento entre nós constantes (índice 2), sendo  $o$  o intervalo inicial,  $n$  o intervalo subsequente,  $m$  o intervalo final e o comprimento total  $P$  correspondente ao somatório de todos os intervalos da *boundary layer*. Além disso, é especificado o fator de crescimento  $fc$ , relativo ao comprimento do intervalo atual dividido pelo intervalo anterior,  $n/o$ , e o número de linhas  $w$ .

Figura 4.2 – Esquema de construção para *boundary layer*



Fonte: Autor, 2016.

Para construção das malhas computacionais levou-se em consideração os resultados encontrados nos trabalhos que analisaram as propriedades estruturais de leito fixo, onde as oscilações mais intensas ocorrem a partir da

parede até o comprimento de um diâmetro da partícula. Neste trabalho foi adotado o diâmetro de partícula de  $2,8 \times 10^{-3}$  m, e portanto, admitiu-se este valor para  $P$ . O valor de  $m$  foi mantido para intervalo entre pontos para região externa da *boundary layer* e nos casos sem refinamento na borda, onde o tamanho dos intervalos entre pontos foi mantido constante ao longo de toda geometria.

Tabela 4.1– Características das malhas computacionais testadas

Malha	$o$ (m)	$fc$	$w$	$m$ (m)	$P$ (m)	Nº de Células
A <sub>1</sub>	$1 \times 10^{-5}$	1,69484	10	$1,15 \times 10^{-3}$	$2,8 \times 10^{-3}$	6.171
A <sub>2</sub>	-	-	-	$1,15 \times 10^{-3}$	-	5.203
B <sub>1</sub>	$1 \times 10^{-5}$	1,3613	15	$7,51 \times 10^{-4}$	$2,8 \times 10^{-3}$	14.586
B <sub>2</sub>	-	-	-	$7,51 \times 10^{-4}$	-	12.529
C <sub>1</sub>	$1 \times 10^{-5}$	1,23336	20	$5,38 \times 10^{-4}$	$2,8 \times 10^{-3}$	28.080
C <sub>2</sub>	-	-	-	$5,38 \times 10^{-4}$	-	24.180
D <sub>1</sub>	$1 \times 10^{-5}$	1,1674	25	$4,10 \times 10^{-4}$	$2,8 \times 10^{-3}$	47.880
D <sub>2</sub>	-	-	-	$4,10 \times 10^{-4}$	-	41.724

Fonte: Autor, 2016.

## 4.2 – Condições adotadas para solução no ANSYS FLUENT

Para as simulações realizadas neste trabalho adotou-se um modelo bidimensional, considerando a axissimetria do sistema. As simulações foram realizadas considerando o regime transiente, pois ar aquecido perpassa o meio poroso possibilitando a transferência de calor e elevação na temperatura deste com o tempo. A solução numérica foi obtida através do software ANSYS FLUENT 14.0 baseado no método dos Volumes Finitos.

### 4.2.1 – Modelo para o teste de malhas

As condições de contorno juntamente com os modelos utilizados nas simulações realizadas para o teste de malhas são descritos na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Condições de contorno e modelos adotados nas simulações no modelo para o teste de malhas

<b>Condições de Contorno</b>	Entrada do leito: velocidade do ar (1,0 m s <sup>-1</sup> )
	Saída do leito: pressão prescrita
	Parede: velocidade igual a zero ( <i>no slip</i> )
	Eixo de axissimetria
<b>Método de Solução</b>	Esquema de acoplamento pressão-velocidade: SIMPLE
	Discretização espacial: Upwind de 2ª ordem
	Formulação transiente: Implícita de 1ª Ordem
<b>Critério de convergência</b>	Equação da continuidade e do Movimento: 1x10 <sup>-4</sup>
<b>Modelos</b>	Turbulência: κ-ε
<b>Passo no Tempo (<i>Time Step</i>)</b>	0,1
<b>Numero de passos no tempo</b>	500
<b>Máximo de iterações por passo</b>	100
<b>Parâmetro de relaxação, transiente</b>	0,75

Fonte: Autor, 2016.

Todos os parâmetros do modelo e do leito são apresentado na Tabela 4.3. Nos testes iniciais utilizou-se as propriedades do fluido constantes.

Tabela 4.3 – Parâmetros do modelo e do leito

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>
$d_L$	10 cm
$L$	5 cm
$D_p$	2,8x10 <sup>-3</sup> m
$\rho_s$	2502 kg m <sup>-3</sup>
$\varepsilon$	0,4
$C_{p,p}$	1720 J kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>
$\rho_f$	1,225 kg m <sup>-3</sup>
$C_{p,f}$	1006,43 J kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>
$k_f$	0,0242 W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>
$\mu_{ar}$	1,7894x10 <sup>-5</sup> kg m <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup>

Fonte: Autor, 2016.

#### 4.2.2 – Modelo com condutividade térmica efetiva

Após a seleção da malha para discretização da geometria empregada nas simulações, foi inserido ao modelo as influências térmicas que além do cálculo da distribuição de temperatura no leito fixo, computava as variações

temporais de parâmetros influenciados pela temperatura (massa específica e viscosidade). As condições de contorno juntamente com os modelos utilizados nas simulações realizadas para o teste de malhas são descritos na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Condições de contorno e modelos adotados nas simulações no modelo com condutividade térmica efetiva

<b>Condições de Contorno</b>	Entrada do leito: velocidade do ar ( $1,0 \text{ m s}^{-1}$ ) e temperatura do ar (338,15K).
	Saída do leito: pressão prescrita
	Parede: velocidade igual a zero ( <i>no slip</i> )
	Eixo de axissimetria
<b>Método de Solução</b>	Esquema de acoplamento pressão-velocidade: SIMPLE
	Discretização espacial: Upwind de 2ª ordem
	Formulação transiente: Implícita de 1ª Ordem
<b>Critério de convergência</b>	Equação da continuidade e do Movimento: $1 \times 10^{-4}$
<b>Modelos</b>	Equação da Energia: Ativado
	Turbulência: $k-\epsilon$
<b>Passo no Tempo (<i>Time Step</i>)</b>	0,1
<b>Numero de passos no tempo</b>	6000
<b>Máximo de iterações por passo</b>	100
<b>Parâmetro de relaxação, transiente</b>	0,75

Fonte: Autor, 2016.

#### 4.2.3 – Modelo com porosidade radial

A modificação no cálculo da porosidade foi implementada ao modelo anterior para que este incluísse as variações radiais do sistema, isto ocorreu de acordo com o descrito no item 3.1.

Portanto, além da porosidade constante,  $\epsilon = 0,4$ , os modelos de Haideger *et al.* (1989), Giudici (1991) e Mueller (1992) foram testados individualmente. A Tabela 4.5 apresenta as condições de contorno adotadas nas simulações

Tabela 4.5 – Condições de contorno e modelos adotados nas simulações no modelo com porosidade radial

<b>Condições de Contorno</b>	Entrada do leito: velocidade do ar ( $1,0 \text{ m s}^{-1}$ ) e temperatura do ar (338,15K).
	Saída do leito: pressão prescrita
	Parede: velocidade igual a zero ( <i>no slip</i> )
	Eixo de axissimetria
<b>Método de Solução</b>	Esquema de acoplamento pressão-velocidade: SIMPLE
	Discretização espacial: Upwind de 2ª ordem
	Formulação transiente: Implícita de 1ª Ordem
<b>Critério de convergência</b>	Equação da continuidade e do Movimento: $1 \times 10^{-4}$
<b>Modelos</b>	Equação da Energia: Ativado
	Turbulência: $\kappa\text{-}\epsilon$
<b>Passo no Tempo (<i>Time Step</i>)</b>	0,1
<b>Numero de passos no tempo</b>	6000
<b>Máximo de iterações por passo</b>	100
<b>Parâmetro de relaxação, transiente</b>	0,75

Fonte: Autor, 2016.

#### 4.2.4 – Modelo para estimativa do coeficiente convectivo de transferência de massa

Finalmente, a última modificação realizada, a estimativa do coeficiente convectivo de transferência de massa em função das propriedades influenciadas pela temperatura do sistema, bem como da porosidade obtida por meio de perfis de porosidade.

A Tabela 4.6 sumariza as condições de contorno e modelos adotados nas simulações finais do trabalho

Tabela 4.6 – Condições de contorno e modelos adotados nas simulações modelo para estimativa do coeficiente convectivo de transferência de massa

<b>Condições de Contorno</b>	Entrada do leito: velocidade do ar ( $1,0 \text{ m s}^{-1}$ ) e temperatura do ar (338,15K).
	Saída do leito: pressão prescrita
	Parede: velocidade igual a zero ( <i>no slip</i> )
	Eixo de axissimetria
<b>Método de Solução</b>	Esquema de acoplamento pressão-velocidade: SIMPLE
	Discretização espacial: Upwind de 2ª ordem
	Formulação transiente: Implícita de 1ª Ordem
<b>Critério de convergência</b>	Equação da continuidade e do Movimento: $1 \times 10^{-4}$
<b>Modelos</b>	Equação da Energia: Ativado
	Turbulência: $\kappa\text{-}\epsilon$
<b>Passo no Tempo (<i>Time Step</i>)</b>	0,1
<b>Numero de passos no tempo</b>	6000
<b>Máximo de iterações por passo</b>	100
<b>Parâmetro de relaxação, transiente</b>	0,75

Fonte: Autor, 2016.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 – Teste de independência e escolha de malhas

Para avaliar a independência da malha, foram selecionadas oito malhas com diferentes espaçamentos entre nós para simular o problema investigado. Distribuídas em quatro pares de mesmo tamanho de intervalo, sendo um elemento com refinamento na região da parede (índice 1) e outro sem este recurso (índice 2). O resíduo da equação da continuidade, queda de pressão obtida na simulação e desvio do valor calculado pela equação de Ergun estão apresentados na Tabela 5.1 e são usados como critério para avaliar a independência e escolha de malhas.

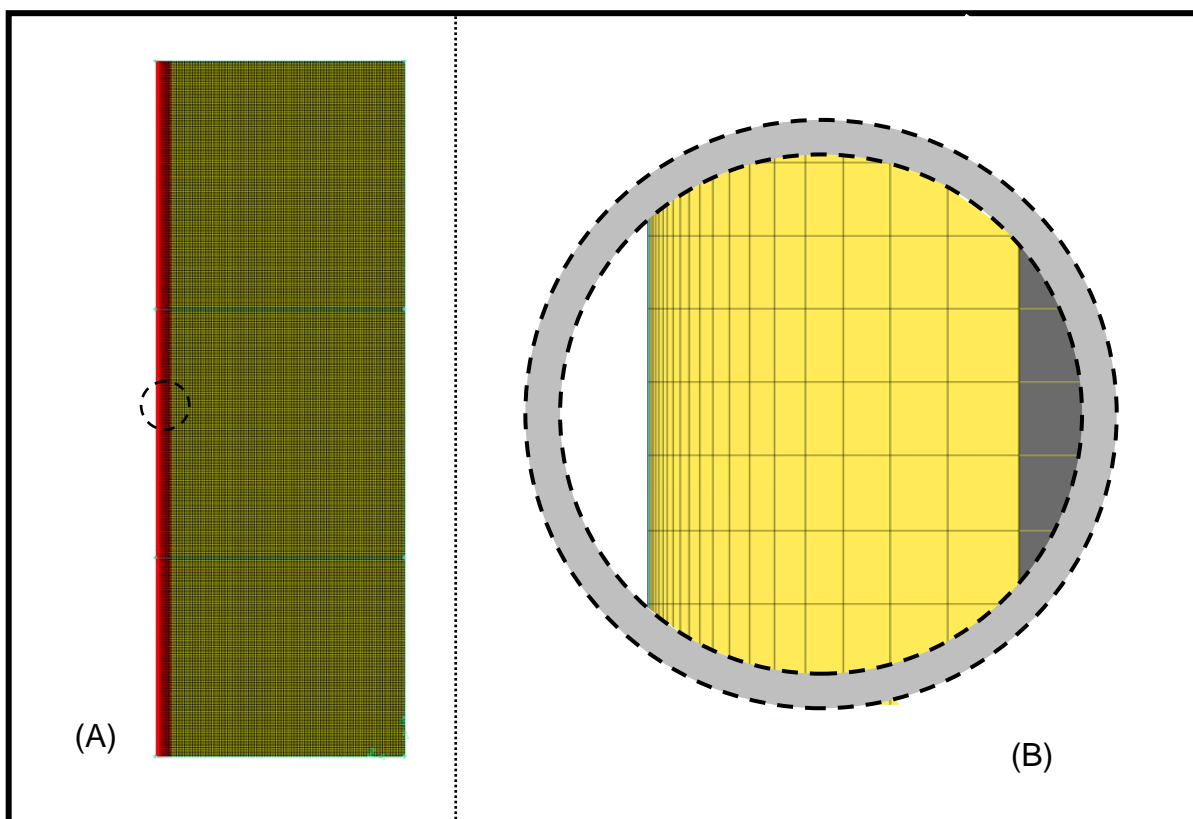
Tabela 5.1 – Resultados das malhas testadas

Malha	Resíduo da solução	Queda de pressão (Pa)	Desvio da Eq. de Ergun (%)
A <sub>1</sub>	$5,50 \times 10^{-2}$	439,98	7,08
A <sub>2</sub>	$2,01 \times 10^{-5}$	439,22	6,89
B <sub>1</sub>	$2,13 \times 10^{-5}$	440,42	7,18
B <sub>2</sub>	$2,50 \times 10^{-6}$	439,06	6,85
C <sub>1</sub>	$2,49 \times 10^{-6}$	439,71	7,01
C <sub>2</sub>	$2,70 \times 10^{-6}$	439,08	6,86
D <sub>1</sub>	$3,14 \times 10^{-5}$	439,47	6,95
D <sub>2</sub>	$3,65 \times 10^{-6}$	439,05	6,85

A variação entre a queda de pressão calculada pelo modelo e a queda de pressão obtida pela Equação de Ergun para todas as malhas apresentou mínima variação permanecendo em torno de 7%. Portanto, tomando o resíduo da equação da continuidade como critério de escolha, as malhas B<sub>2</sub> e C<sub>1</sub> obtiveram os menores valores. Optou-se realizar as simulações com a malha C<sub>1</sub> devido a presença do refinamento na região de parede, que proporcionaria maior quantidade de dados para esta área. Além disso, na comparação entre malhas esta apresenta menor resíduo da equação da continuidade. A malha C<sub>1</sub> empregada nas simulações é apresentada na Figura 5.1.



Figura 5.1 – (A) Malha  $C_1$  utilizada nas simulações e (B) detalhamento da *boundary layer* na proximidade da parede



Esta malha bidimensional, constituída 100% de elementos quadrilaterais, possui 56.528 faces e 28.080 células.

## 5.2 – Testes com condutividades térmicas efetivas

A condutividade térmica efetiva foi testada por meio da simulação, analisando-se resultados de fluidodinâmica e transferência de calor para a condição de porosidade constante.

Os resultados foram analisados a partir da aquisição da temperatura em cinco posições axiais ao longo do eixo central do meio poroso, conforme ilustrado na Figura 4.1, em função do tempo e condições operacionais semelhantes às experimentos de Perazzini (2014). Para o caso utilizando a  $k_{\text{eff},0}$ , valor medido experimentalmente, utilizou-se temperatura do ar de secagem de 313,15 K e velocidade do ar de  $1,0 \text{ m s}^{-1}$ , estando o sistema inicialmente à temperatura de 300 K. Os perfis de temperatura simulada obtidos são apresentados na Figura 5.2.

Figura 5.2 – Valores de temperatura em cinco posições no interior do leito fixo com modelo de porosidade constante  $\varepsilon = 0,4$  e  $k_{\text{eff},0} = 8,4 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ , em função do tempo

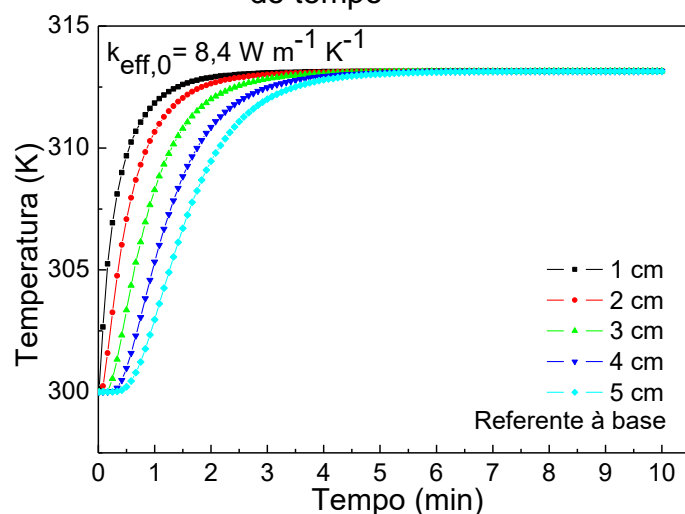
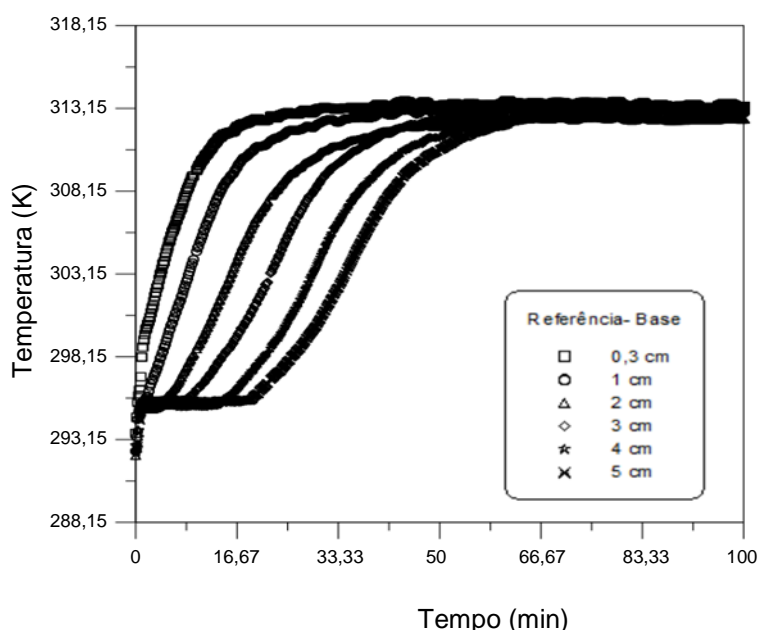


Figura 5.3 – Medida experimental da temperatura em função do tempo



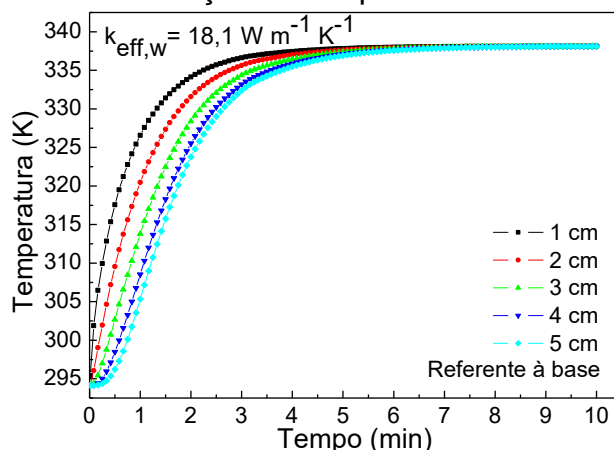
Fonte: Perazzini, 2014.

Observa-se que a temperatura do meio poroso aumenta em regime transiente, igualando-se a temperatura do ar de aquecimento quando o mesmo atinge o regime permanente. O equilíbrio térmico é atingido após cinco minutos de operação, onde observa-se que a temperatura nas cinco posições convergem para a temperatura do ar, na região central do leito fixo. Comparando-se estes resultados com dados obtidos experimentalmente por

Perazzini (2014), Figura 5.3, observa-se grande divergência quanto à dinâmica de aquecimento do leito. O equilíbrio térmico em todas as posições acompanhadas do meio poroso é atingido em aproximadamente 60 min, sendo o aumento da temperatura gradual e diferente em cada posição a partir da base. A posição de 1 cm atinge a mesma temperatura do ar de secagem em aproximadamente 41 min, bem antes das outras posições acima no leito fixo. Portanto, o modelo utilizando  $k_{\text{eff},0}$  não resultou em dados compatíveis as medidas experimentais de Perazzini (2014).

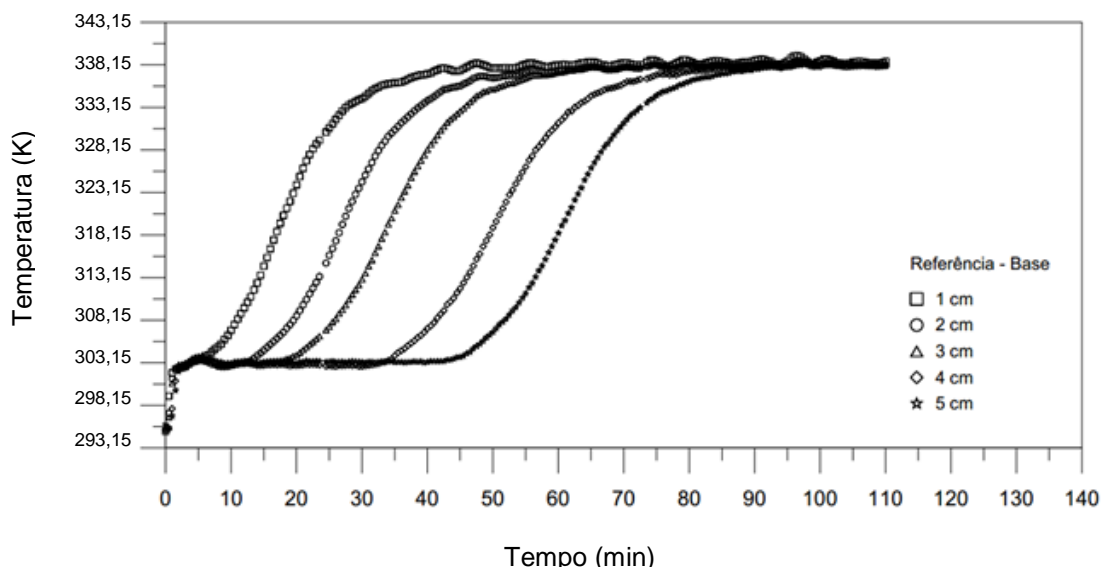
Para o caso utilizando a  $k_{\text{eff},w}$ , valor estimado com base na condutividade das fases em condição úmida, utilizou-se temperatura do ar de secagem de 338,15 K e velocidade do ar de  $1,0 \text{ m s}^{-1}$ , estando o leito inicialmente à temperatura de 293,15 K. Os perfis de temperatura simulada obtidos são apresentados na Figura 5.4.

Figura 5.4 – Valores de temperatura em cinco posições no interior do leito fixo com modelo de porosidade constante  $\varepsilon = 0,4$  e  $k_{\text{eff},w} = 18,1 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ , em função do tempo.



Ressalta-se que ao utilizar o  $k_{\text{eff},w}$  no modelo para as simulações do leito fixo em estudo, a temperatura no leito atinge o equilíbrio de forma análoga ao modelo anterior empregando  $k_{\text{eff},0}$ . Porém ocasionando uma dinâmica de aquecimento mais rápida para as posições superiores, evidenciado pela aproximação entre si dos perfis de temperatura. Ao comparar-se aos dados experimentais para o meio poroso úmido apresentados na Figura 5.5, verifica-se que este modelo também não permite a previsão do comportamento obtido experimentalmente apresentado por Perazzini (2014).

Figura 5.5 – Medida experimental da temperatura em função do tempo, para o meio poroso úmido



Fonte: Perazzini, 2014.

Segundo Perazzini (2014), além do fluido percolar o meio com uma velocidade suficiente para garantir a convecção, outros fenômenos de transferência estão presentes na secagem do meio poroso úmido, sendo o próprio fenômeno evaporativo, o principal responsável para os resultados verificados na Figura 5.5. Devido à presença da fase líquida no sistema, o próprio meio (gás, água e sólido) fornece energia necessária para que a mudança de fase ocorra, o que provoca depressões nos perfis de temperatura com o avanço da frente de secagem. O meio só atinge a temperatura máxima disponível quando o conteúdo de umidade é igual ao conteúdo de umidade de equilíbrio.

Devido aos reduzidos gradientes de temperatura no início da secagem, a energia necessária para elevar a temperatura do corpo para a posição de 5 cm é disponível somente aos 45 minutos do processo, ou seja, apenas quando as camadas anteriores já tiverem adquirido energia suficiente na forma de calor sensível. A inserção dos fenômenos de transferência de massa ao modelo utilizado na simulação proporcionariam maior proximidade com os resultados provenientes de medidas experimentais.

Finalmente, o caso utilizando a  $k_{\text{eff},d}$  onde o valor é estimado com base na condutividade das fases em condição seca, utilizou-se temperatura do ar de

secagem de 338,15 K e velocidade do ar de  $1,0 \text{ m s}^{-1}$ , estando o leito inicialmente à temperatura de 303,15 K. Nas Figura 5.6 e Figura 5.7 os perfis de temperatura simulada e experimental são apresentados em função do tempo. Os resultados simulados com o modelo considerando as partículas de alumina secas foi coerente com os resultados experimentais, devido a ausência de mecanismos evaporativos, principalmente.

Figura 5.6 – Valores de temperatura em cinco posições no interior do leito fixo com modelo de porosidade constante  $\varepsilon = 0,4$  e  $k_{\text{eff,d}} = 0,27 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ , em função do tempo

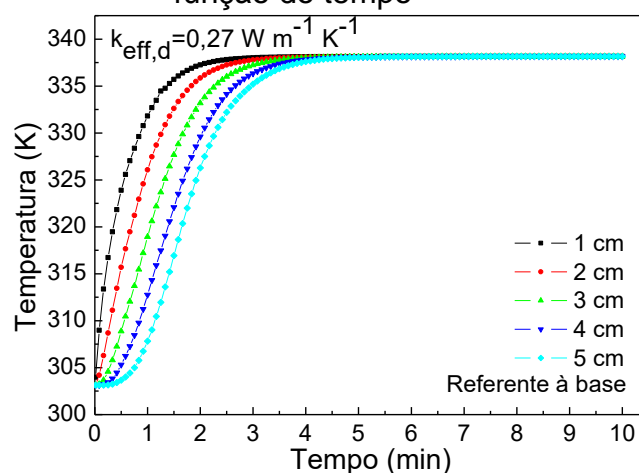
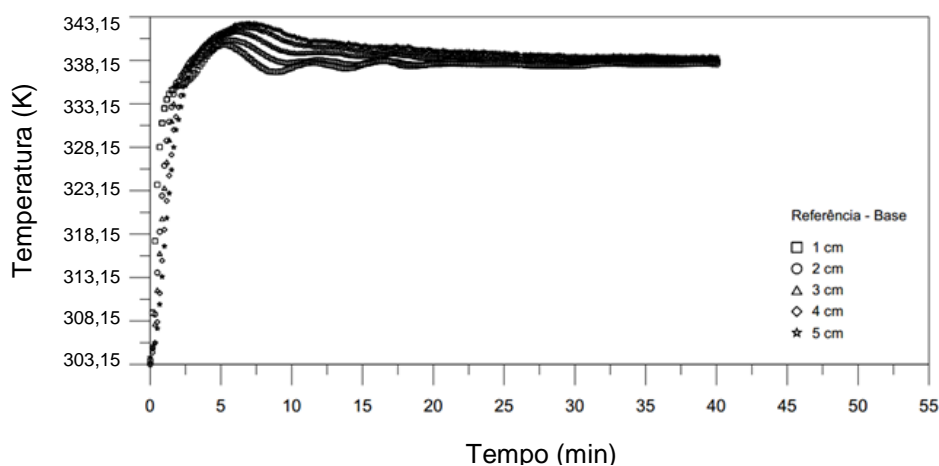


Figura 5.7 – Medida experimental da Temperatura em função do tempo, para o meio poroso seco



Fonte: Perazzini, 2014.

No caso anterior, Figura 5.6, ocorre exclusivamente o processo de aquecimento das partículas, algo que é bem representado pelo modelo em CFD sem a modelagem para o transporte de massa. O equilíbrio térmico entre as posições acompanhadas durante a simulação e o ar de secagem acontece em aproximadamente quatro minutos, comportamento semelhante aos resultados obtidos por Perazzini (2014), ao aquecer o leito fixo com partículas de alumina isentas de umidade, em que a temperatura nas cinco posições aumentou em condição semelhante entre si e atingindo a temperatura do ar de secagem em quatro minutos, aproximadamente.

Percebe-se nos resultados experimentais a elevação da temperatura do meio poroso acima da temperatura do ar de secagem e posterior oscilação até atingir o equilíbrio térmico após 25 minutos, provavelmente devido a efeitos resistivos da passagem do ar pelo meio que provoca um sobreaquecimento.

Deste modo, a utilização do modelo empregando  $k_{\text{eff,d}} = 0,27 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$  representou bem a dinâmica de aquecimento de partículas que não apresente umidade. É possível verificar nos resultados que o modelo e o procedimento numérico foram capazes de capturar a dinâmica de aquecimento, captando a inércia térmica derivada do aumento da resistência a transferência de calor com o aumento na espessura do leito fixo.

Desta forma, na busca por um modelo que seja capaz de prever o comportamento da secagem, com transferência simultânea de calor e massa, optou-se por empregar o  $k_{\text{eff,w}} (18,1 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1})$  no prosseguimento do trabalho.

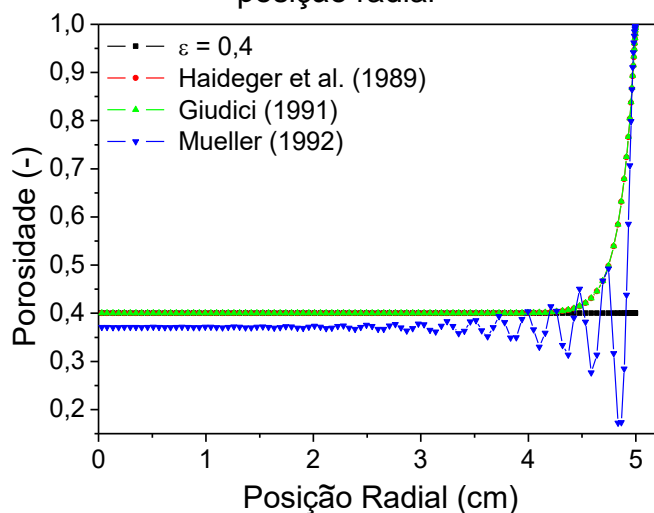
### 5.3 – Distribuição radial da porosidade

Considerando a influência da posição radial em relação a distribuição da porosidade, a Figura 5.8 apresenta os resultados simulados para porosidade no interior do leito fixo utilizando-se as quatro condições especificadas (porosidade constante, modelo de Haideger *et al.*, modelo de Giudici e modelo de Mueller).

Os modelos de Haideger *et al.* (1989) e Giudici (1991) apresentam comportamento semelhante. Ambos resultam em um perfil de porosidade com comportamento partindo do eixo central do leito na direção da parede, onde verifica-se um valor de  $\varepsilon = 0,4$  até a posição radial de 0,041m. A partir dessa

posição ocorre a elevação gradual e surgimento de um pico com máxima porosidade na região imediatamente anterior a parede do equipamento. O modelo de Mueller (1992) possui caráter oscilatório da porosidade com valor inicial de 0,37, apresentando diversos picos, com maior intensidade na região próxima à parede.

Figura 5.8 – Valores de porosidade simulada no interior do leito, em função da posição radial



Conforme observado na literatura (Zotin, 1985; Subagyo *et al.*, 1998; Mueller, 1992; Singulani, 2001; Béttega *et al.*, 2007) o contato entre as partículas com a parede do leito reduz a aglomeração de partículas, proporcionando uma região de maior porosidade. Esta maior porosidade na região da parede pode ser observada para todos os modelos avaliados, exceto a condição de porosidade constante, onde este efeito é negligenciado.

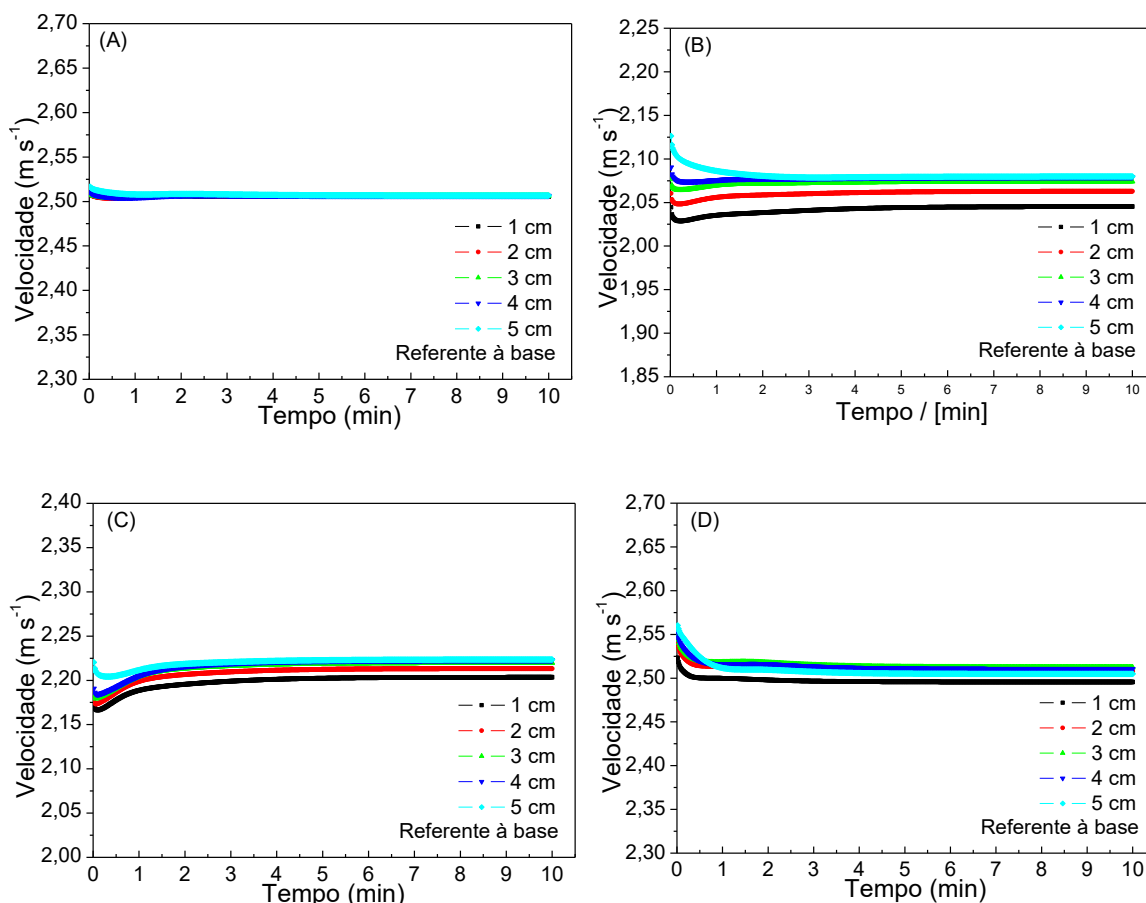
#### 5.4 – Velocidade simulada no interior do leito

Na Figura 5.9 são apresentados os perfis de velocidade para diferentes pontos ao longo do eixo central, considerando-se os diferentes modelos de porosidade. É possível verificar no comportamento dinâmico ilustrado que para todos os modelos avaliados, que a velocidade assume comportamento desenvolvido nos instantes iniciais de operação do escoamento, estabelecendo-se um regime permanente unidirecional a partir de um minuto.

Ressalta-se que nestes simulações o ar foi assumido como um fluido incompressível. É possível verificar, portanto, que o leito fixo em camada fina

opera sob a condição plenamente desenvolvida do ponto de vista fluidodinâmico ao longo de praticamente todo o tempo de operação.

Figura 5.9 – Valores de velocidade em cinco posições axiais no interior do leito fixo com modelo de (A) porosidade constante  $\varepsilon = 0,4$ , (B) Haideger *et al.* (1989), (C) Giudici (1991) e (D) Mueller (1992), em função do tempo



A influência da porosidade sobre o escoamento no interior do leito fixo em estudo é apresentada na Figura 5.10. Para o modelo com porosidade constante ( $\varepsilon = 0,4$ ), Figura 5.10A, a velocidade altera-se apenas na direção axial, formando um perfil unidirecional mantido constante em  $1,0 \text{ m s}^{-1}$  na região de entrada e saída do leito.

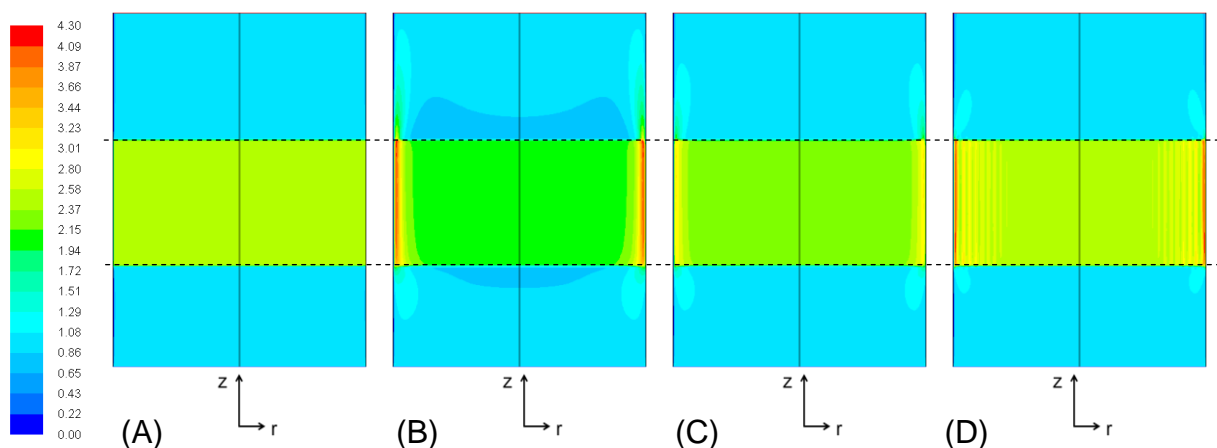
Devido a presença do material poroso no leito fixo a velocidade atinge o valor de  $2,5 \text{ m s}^{-1}$  sem apresentar alterações em relação a posição radial, exceto na parede, onde a velocidade vai a zero (condição de não deslizamento).

O modelo de Haideger *et al.* (1989) e Giudici (1991), Figura 5.10B e Figura 5.10C, respectivamente, apresentam resultados semelhantes entre si,



onde observa-se que a região de parede possui maior velocidade do ar. Entretanto, os valores máximos se alteram, sendo  $4,3 \text{ m s}^{-1}$  para Haideger *et al.* (1989) e  $3,01 \text{ m s}^{-1}$  para o modelo de Giudici (1991).

Figura 5.10 – Contornos de velocidade ( $\text{m s}^{-1}$ ) simulada no interior do leito em 1 minuto de operação utilizando no modelo (A) porosidade constante  $\varepsilon = 0,4$ , (B) Haideger *et al.* (1989), (C) Giudici (1991) e (D) Mueller (1992)



Os resultados para o modelo de Mueller (1992), Figura 5.10D, diferencia-se pela presença de um perfil oscilatório radial da velocidade, característico do modelo da porosidade adotado. No entanto, mantendo o pico de velocidade na região da parede do leito.

Justifica-se esse comportamento no interior do leito em razão da maior porosidade na região próxima à parede quando utilizados os modelos de porosidade não constante, devido a ocorrência de variação radial da porosidade no interior do leito fixo, ocasionando um máximo bastante acentuado de velocidade próximo à parede (JORGE e GIUDICI, 1992).

Portanto, o escoamento de ar perpassa preferencialmente o meio poroso na região próxima à parede devido a menor resistência a sua passagem, resultado da maior porosidade, condicionando picos de velocidade na região da parede para os três modelos radiais de porosidade testados. Espera-se, então, que a distribuição de velocidade afete também a transferência de calor e massa no interior do leito fixo.

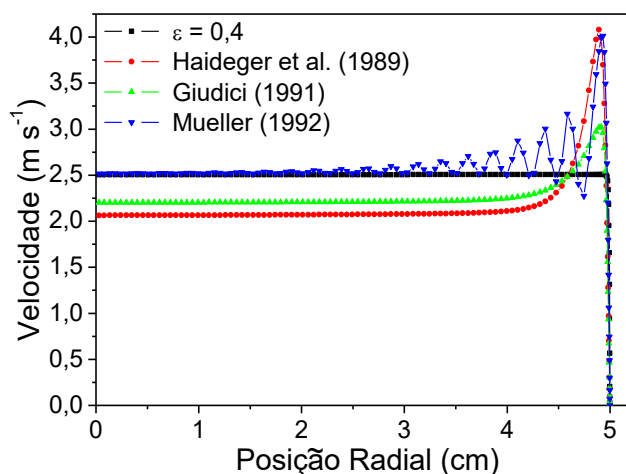
Os resultados demonstram que, mesmo que diferentes modelos de porosidade resultem em comportamentos distintos para o perfil de velocidades, sua influência no mesmo é pronunciada e, portanto, a característica estrutural

do empacotamento deve ser considerada quando analisado a fluidodinâmica do leito fixo. Sendo assim, a velocidade do ar que perpassa o meio poroso é influenciada pela forma como a porosidade do leito se distribui, favorecendo ou não a passagem do ar. A suposição de perfil uniforme de velocidade deve ser efetuada com cautela.

A Figura 5.11 apresenta os resultados simulados da distribuição de velocidade do ar à 2,5 cm da base do leito fixo, após um minuto de operação. É possível verificar que para o modelo com porosidade constante ( $\epsilon = 0,4$ ), a velocidade se mantém em um patamar único de velocidade ( $2,5 \text{ m s}^{-1}$ ) em toda a extensão radial do leito e velocidade zero na parede.

Para os modelos de Haideger *et al.* (1989) e Giudici (1991) há um intervalo de velocidade constante na região central do leito e o surgimento de um pico a partir de 0,04 m atingindo valor máximo de  $4,1 \text{ m s}^{-1}$  e  $3,0 \text{ m s}^{-1}$ , respectivamente, na proximidade da parede. Apesar do comportamento similar do perfil de porosidade apresentado na Figura 5.8, a dinâmica de escoamento é influenciada de forma distinta nos dois modelos.

Figura 5.11 – Valores de velocidade simulada no interior leito à 2,5 cm da base, em função da posição radial



Além disso, para o modelo de Mueller (1992), os resultados mostram o perfil radial oscilatório para a velocidade no interior do leito, com a presença de um pico de velocidade na região próxima da parede. O comportamento da velocidade apresenta redução na amplitude de oscilação a partir do pico máximo de velocidade ( $4,0 \text{ m s}^{-1}$ ) na parede em direção ao centro do leito. É possível verificar que os resultados apresentam as mesmas características já

observadas para um leito fixo com configuração distinta apresentada por Béttega *et al.* (2011).

A presença de pico de velocidade máximo próximo à parede e o amortecimento da velocidade a valores constantes na região central do leito, observado nos três modelos, são provenientes da variação radial da porosidade, característica estrutural do leito, que oferece maior resistência ao escoamento no centro do leito devido ao maior empacotamento das partículas, resultando em menor velocidade.

A região da parede, por sua vez, é caracterizada por possuir uma maior porosidade, resultado do contato entre as partículas e a parede, que proporciona elevadas velocidades e favorece o escoamento do ar nessa área. Portanto, é possível constatar que todos os resultados de velocidade foram coerentes com o comportamento qualitativo indicado pela literatura, reforçando que a modelagem matemática e o procedimento numérico foram capazes de capturar satisfatoriamente o comportamento fluidodinâmico e a dinâmica de desenvolvimento do regime fluidodinâmico para o leito fixo simulado.

### **5.5 – Temperatura simulada no interior do leito**

A Figura 5.12 apresenta os dados de temperatura no eixo central do leito em cinco posições axiais, em função do tempo de escoamento para um meio poroso composto por partículas de alumina de 2,80 mm de diâmetro, com ar escoando a uma temperatura de 338,15K e velocidade de  $1,0 \text{ m s}^{-1}$ .

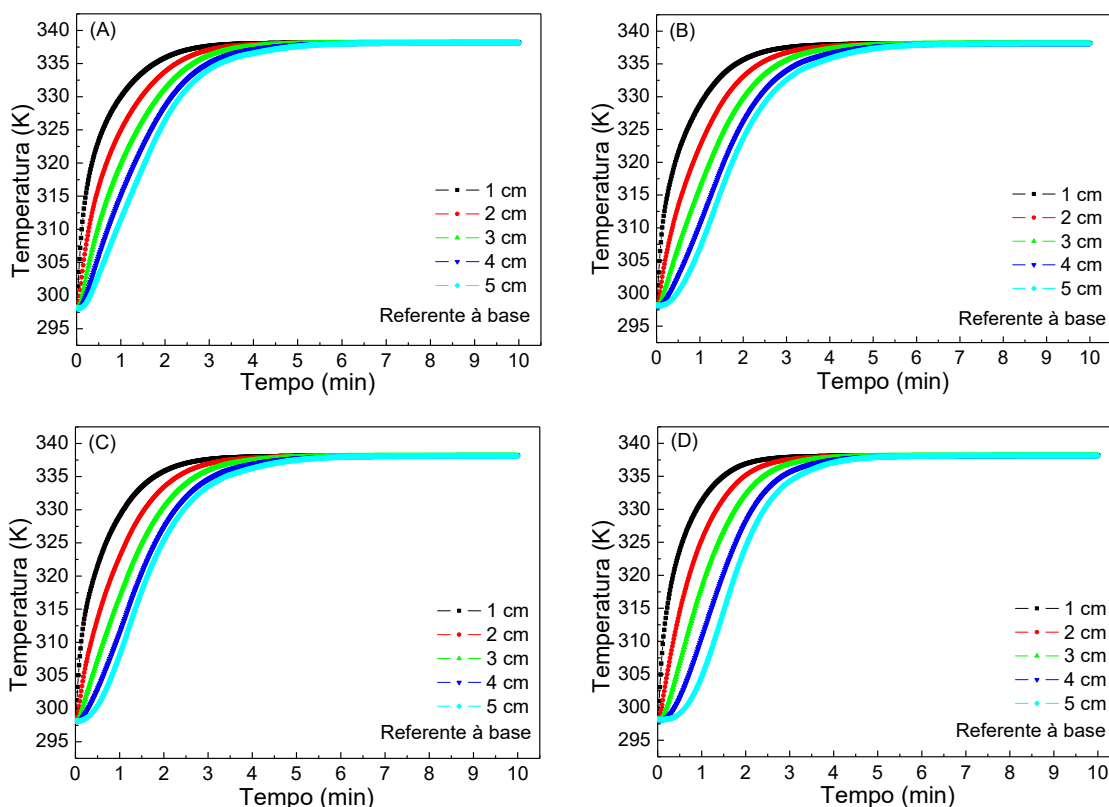
É possível verificar que no início da operação ( $t = 0 \text{ min}$ ), a temperatura do meio poroso é a mesma em todas as posições axiais avaliadas. Quando o ar aquecido entra em contato com a superfície inferior do meio poroso e esta região começa a receber energia proveniente da fase gasosa, tem início a transmissão de calor em direção à região superior.

O tempo total para que a temperatura do meio poroso entre em equilíbrio com a temperatura de entrada do ar e a diferença verificada entre os perfis de temperatura para maiores distâncias da entrada do leito são evidências do aumento da resistência ao transporte de calor para maiores distanciamentos da posição de entrada, ocorrendo de forma mais lenta na posição de 5 cm.

Como resultado da troca térmica no sistema, a temperatura do meio eleva-se ao longo do tempo, atingindo a mesma temperatura do ar empregado.

O tempo total para que a temperatura do meio poroso entre em equilíbrio com a temperatura de entrada do ar e a diferença entre os perfis de temperatura, aumenta a medida que a espessura do meio poroso aumenta.

Figura 5.12 – Valores de temperatura em cinco posições axiais no interior do leito fixo com modelo de (A) porosidade constante  $\varepsilon = 0,4$ , (B) Haideger *et al.* (1989), (C) Giudici (1991) e (D) Mueller (1992), em função do tempo



Ressalta-se aqui que a simulação do aquecimento do leito fixo indica que o tempo para que o leito atinja um regime definido de temperatura é relevante e deve ser considerado quando deseja-se cinéticas de secagem em camada fina. A resistência à troca térmica aumenta com a espessura, remetendo novamente ao conhecimento detalhado da estrutura do leito sob o qual as análises serão conduzidas.

É possível observar nos resultados apresentados da temperatura em função do tempo (Figura 5.12) que diferentes posições axiais do meio poroso se estabelecem com comportamentos distintos em sua dinâmica térmica. Verifica-se na Figura 5.12A que no modelo com porosidade constante, em 1 minuto de operação, a temperatura do meio próxima à base (1 cm) eleva-se rapidamente, aumentando em aproximadamente 32 K à temperatura inicial,

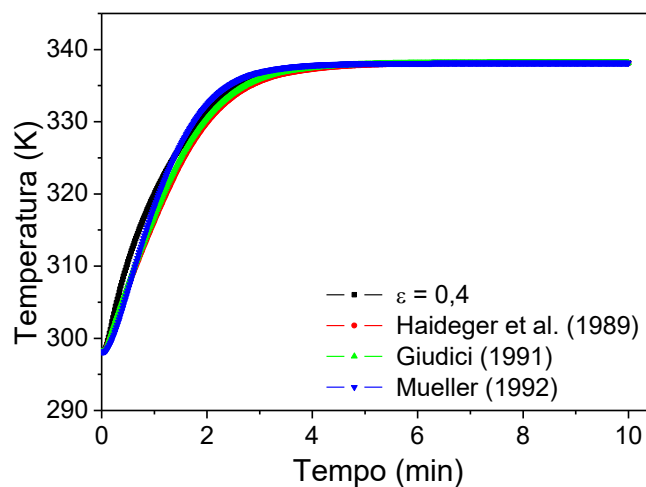
enquanto que para a próxima posição (2 cm) o aumento de 27 K, é menos expressivo.

A diferença encontrada entre as curvas pode ser explicada levando-se em consideração que a energia que o ar fornece para a primeira camada de material particulado diminui para as camadas posteriores, sendo que a diferença de temperatura de aproximadamente 13 K para a camada superior (5 cm) é a menos acentuada. Isto é, a fase gasosa inicialmente cede energia para aquecer o material contido na camada inferior do meio poroso e quando o ar percola as camadas posteriores, a energia disponível não é suficiente para elevar, no mesmo intervalo de tempo, a temperatura da matriz porosa.

Comportamento similar ocorre nas simulações empregando modelos de porosidade radial (Figura 5.12B e Figura 5.12C), onde a inércia térmica é notória, justificável pela manutenção das propriedades do material, fato idêntico à condição de porosidade constante. Apesar da alteração do modelo de porosidade, esta mantém-se em  $\varepsilon = 0,4$  para a região central do leito. Na Figura 5.12D o processo de aquecimento segue a tendência geral. Na camada inferior (1 cm) a variação em relação a temperatura inicial é de aproximadamente 33 K. No entanto, para a camada superior (5 cm) a variação é menor, por volta de 6,5 K. Desta forma, é possível verificar que há maior afastamento entre as curvas de temperatura, justificadas pela menor porosidade ( $\varepsilon = 0,37$ ) na região central para o modelo de Mueller (1992).

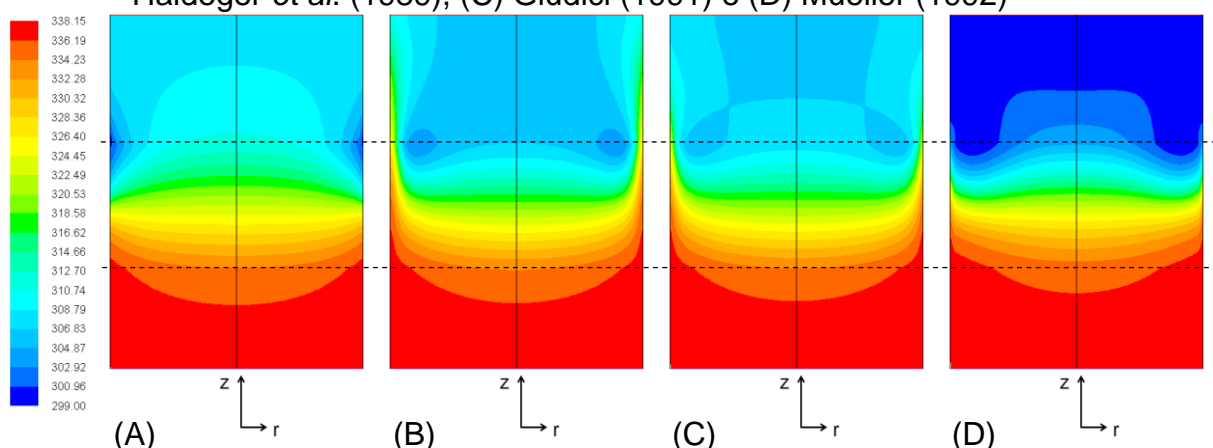
Ao comparar-se o efeito do modelo de porosidade na dinâmica de temperatura para a posição à 3 cm da base, Figura 5.13, nota-se que existem alterações na sua dinâmica mesmo para os três modelos, porosidade constante, Haideger *et al.* (1989) e Giudici (1991), em que a porosidade é idêntica na região central ( $\varepsilon = 0,4$ ). O modelo de Mueller (1992) apresenta maior modificação, possivelmente por possuir valor diferente de porosidade na região central do leito ( $\varepsilon = 0,37$ ).

Figura 5.13 – Comparativo entre os valores de temperatura entre os modelos de (A) porosidade constante  $\varepsilon = 0,4$ , (B) Haideger *et al.* (1989), (C) Giudici (1991) e (D) Mueller (1992) na posição à 3 cm da base, em função do tempo



A distribuição bidimensional da temperatura no interior do leito, no instante 1 minuto, é apresentada na Figura 5.14 para os quatro perfis de porosidade utilizados. Pode ser observado na região de entrada a maior temperatura (338,15 K), correspondente a temperatura do ar. Observa-se que o aumento gradual e subsequente da temperatura entre os estratos na região central do leito fixo é característica comum nos resultados, condizente com a análise realizada a partir do perfil de temperatura nas diferentes posições axiais.

Figura 5.14 – Contornos de temperatura (K) simulada no interior do leito em 1 minuto de operação utilizando o modelo (A) porosidade constante  $\varepsilon = 0,4$ , (B) Haideger *et al.* (1989), (C) Giudici (1991) e (D) Mueller (1992)



No entanto, a tendência na dinâmica de aquecimento se altera na região próxima à parede. Na Figura 5.14A, ao considerar a porosidade constante, o efeito de desaceleração do ar na proximidade da parede do leito faz com que a

temperatura central seja mais alta, decrescendo ao longo da direção radial. Assim o perfil parabólico evolui e apresenta uma inversão de concavidade, justificando a temperatura próxima a parede mais alta na entrada do leito fixo e reduzindo gradualmente ao longo da direção axial do leito. Nos estratos superiores do leito fixo é possível verificar maior temperatura no eixo central e na região próxima à parede observa-se a condição de menor temperatura.

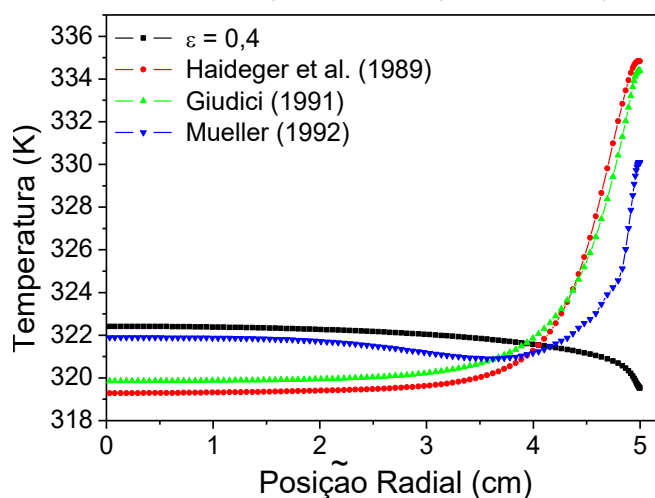
Os resultados obtidos por meio do modelo de Haideger *et al.* (Figura 5.14B) e Giudici (Figura 5.14C) demonstram comportamento semelhante entre si. Em ambos os resultados é possível verificar o desenvolvimento de um perfil parabólico com temperatura máxima nas extremidades próximas a parede e no eixo central a temperatura mais baixa, tendência que ocorre por toda a extensão do leito fixo.

Verifica-se na Figura 5.14D, quando o modelo de Mueller (1992) é usado, que o processo de aquecimento do leito é menos intenso mesmo preservando o perfil térmico parabólico, sendo que no mesmo intervalo de tempo de operação do leito a temperatura no topo do leito é inferior a dos outros modelos estudados. Esta aparente diferença está relacionada a estrutura do leito com menor porosidade média na região central, que possivelmente modifica a resistência a transferência de calor e a dinâmica de aquecimento.

A Figura 5.15 apresenta os perfis radiais de temperatura à 2,5 cm da base do leito em 1 minuto de operação. A influência da posição radial na temperatura é comprovada nas diferentes condições utilizando-se modelos de Haideger *et al.* (1989), Giudici (1991) e Mueller (1992), apresentando sensível elevação da temperatura na região da parede, a partir de 3,5 cm, enquanto que no modelo com porosidade constante apresenta redução na temperatura.

A presente discussão demonstra que a energia disponível para todas as camadas do leito no início do processo não é a mesma, visto que as camadas inferiores adquirem a maior quantidade de calor possível da fase gasosa nos instantes iniciais do processo. Além disto, verifica-se a influência da posição radial na temperatura do meio. Constata-se assim, que o interior do meio poroso apresenta gradientes de temperatura axiais e radiais, e que estes gradientes influenciam a transferência de calor.

Figura 5.15 – Valores de temperatura simulada à 2,5 cm da base do leito fixo em 1 minuto de operação, em função da posição radial



Estas observações remetem à cautela na aproximação para a camada delgada nestas situações, cujas simplificações desprezam os efeitos destacados. É de conhecimento geral que a distribuição de temperatura pode acarretar também em alterações na transferência de massa neste leito, reforçando o cuidado ao assumir uma cinética de camada delgada como livre de gradientes. Ressalta-se que o modelo utilizado foi capaz de capturar a dinâmica de aquecimento, captando a inércia térmica derivada do aumento da resistência a transferência de calor com o aumento na espessura do leito fixo.

### 5.6 – Estimativa do coeficiente convectivo de transferência de massa ( $k_c$ ) no interior do leito

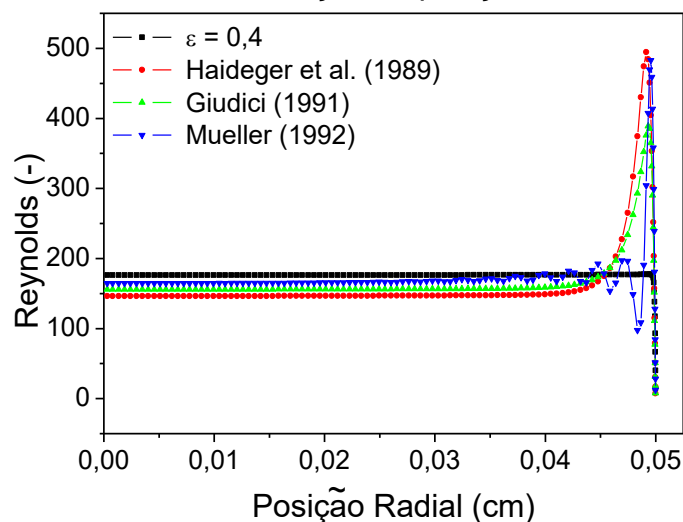
A distribuição de velocidade do ar ao longo do leito (radial e axialmente) modifica a dinâmica de aquecimento do leito fixo estudado. Analisando tal fato mediante a distribuição do número de Reynolds (Figura 5.16) observa-se que maiores valores para o número de Reynolds ocorrem na região da parede, indicando um maior contato entre a fase sólida e a gasosa e conseqüentemente provocando maiores taxas de transferência de calor e massa nessa região.

Considerando menos impactantes as variações nas propriedades físicas do ar, a velocidade é o principal componente no comportamento para o  $Re$  calculado nos modelos. No entanto, a análise da Figura 5.16 mostra que a variação na amplitude dos picos é reduzida em relação aos resultados



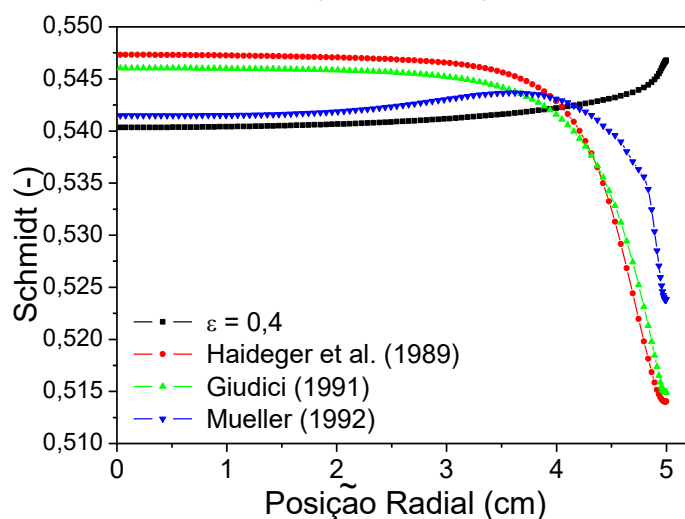
apresentados para a velocidade na Figura 5.11, em razão do aumento da viscosidade do ar, que torna-se maior nas proximidades da parede, e pela discreta variação da massa específica provocado pela elevação da temperatura.

Figura 5.16 – Valores do Número de Reynolds (Re) no interior do leito à 2,5 cm da base, em função da posição radial



As distribuições radiais do número de Schmidt (Sc) são apresentadas na Figura 5.17 em função da posição radial. Apesar da incorporação de variações de temperatura sobre a massa específica, viscosidade e difusividade do vapor, o Número de Schmidt (Sc) não sofreu mudanças significativas variando apenas na terceira casa decimal.

Figura 5.17 – Valores do Número de Schmidt (Sc) no interior do leito à 2,5 cm da base, em função da posição radial



Com os resultados para Reynolds e Schmidt calculou-se o número de Sherwood local e a partir deste estimou-se um coeficiente global de transferência de massa por convecção, que apesar de não representar a transferência de massa em sua fenomenologia completa, representa um indicativo importante da capacidade e do comportamento local da transferência de massa no leito fixo enquanto parte de um equipamento de secagem.

Ao se avaliar a distribuição radial do coeficiente de transferência de massa convectivo (Figura 5.18) e, conhecido os resultados para o  $Re$  e  $Sc$ , percebe-se a prioritária influência do Reynolds sobre os resultados, com uma região de maior valor próxima à parede para todos os modelos de porosidade radial. Isto é um forte indicativo que a não uniformidade da estrutura afetaria a secagem em leito fixo de pequena espessura.

Deste modo, equipamentos de secagem, como o leito fixo, que apresentam período de secagem convectiva terão, portanto, suas dinâmicas influenciadas por maiores velocidades e maiores valores do Reynolds, proporcionando temperaturas mais elevadas e favorecendo a transferência de calor na região de parede. Este resultado é um indicativo de que a secagem ocorre prioritariamente em regiões mais afastada do eixo central do equipamento pelo favorecimento da transferência de massa por mecanismo convectivo.

Figura 5.18 – Valores do coeficiente convectivo de transferência de massa ( $k_c$ ) no interior do leito à 2,5 cm da base, em função da posição radial

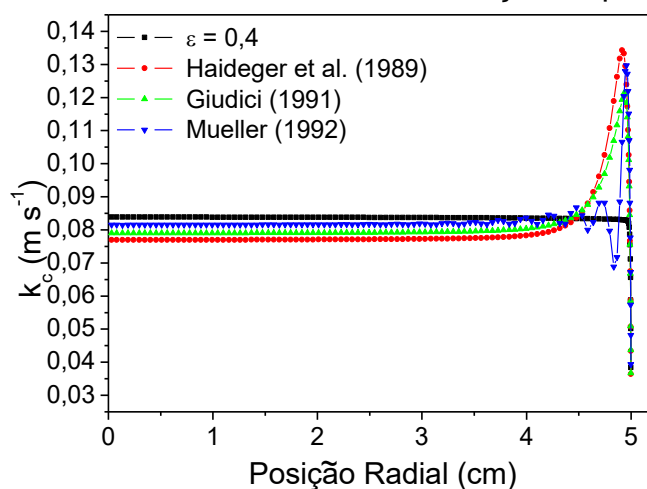
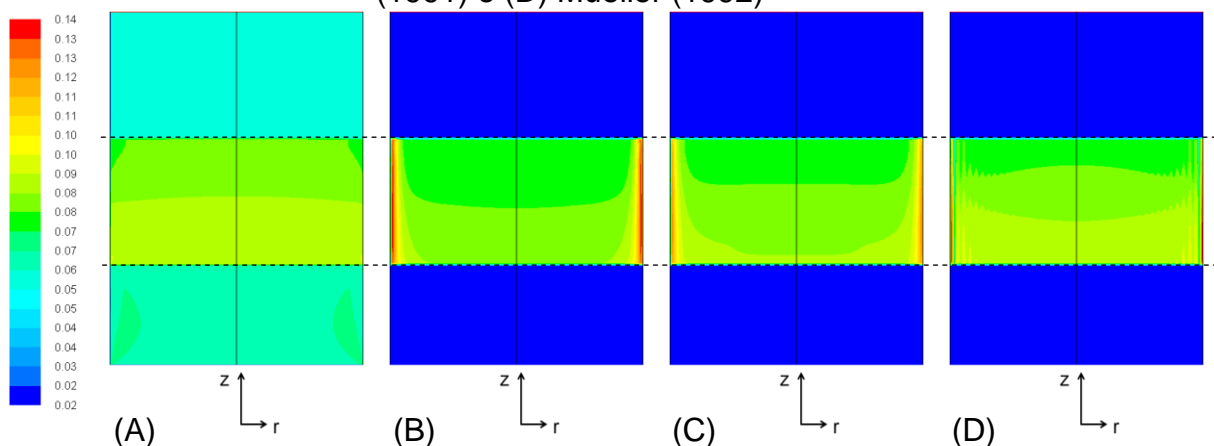


Figura 5.19 – Contornos para o coeficiente convectivo de transferência de massa ( $k_c$ ) simulado no interior do leito em 1 minuto de operação utilizando no modelo (A) porosidade constante  $\varepsilon = 0,4$ , (B) Haideger *et al.* (1989), (C) Giudici (1991) e (D) Mueller (1992)



Os contornos para o coeficiente convectivo de transferência de massa ( $k_c$ ), Figura 5.19, mostram a influência das alterações previamente discutidas. No modelo à porosidade constante (Figura 5.19A) poucas alterações ocorrem para este parâmetro, sendo mantido um valor médio de  $0,09 \text{ m s}^{-1}$ , aproximadamente, por toda a extensão do meio poroso.

Entre os modelos que utilizam perfil de porosidade radial, Haideger *et al.* (1989) possui um faixa mais ampla com valor máximo de  $0,14 \text{ m s}^{-1}$ , valor 64% superior ao valor encontrado no modelo à porosidade constante. Este comportamento indica a possível prevalência da transferência de massa na região de parede. Os modelos de Giudici (1991) e Mueller (1992) seguem o mesmo comportamento, com indicativo de elevada transferência de massa por convecção no leito na região de parede, entretanto, com menor intensidade desse efeito.

Portanto, a abordagem simplificada para esfera isolada utilizada proporcionou um vislumbre sobre o potencial do equipamento de secagem, sem remeter ao material. Observa-se a variação no potencial de secagem para o leito em função da posição tanto axial com radial, bem como a variação temporal devido a inércia térmica presente no equipamento que modifica o processo de secagem. Desta forma, os resultados indicam que há este problema para processos sensíveis a variações temperatura ou necessidade de manutenção da distribuição de umidade uniforme ao longo da posição radial.

## 6. CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos no presente trabalho e posterior análise, foi possível verificar que o modelo e o procedimento numérico adotados foram apropriados para descrever a dinâmica de aquecimento e distribuição de velocidade no interior do leito fixo em todos os modelos desenvolvidos.

Os resultados simulados foram coerentes para as situações empregando porosidade constante em comparação a resultados experimentais da literatura, principalmente quando utilizado o  $k_{\text{eff,d}} = 0,27 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ .

A dinâmica do aquecimento mudou pela inserção do perfis de porosidade, apresentando maiores temperaturas na região de parede se comparada ao eixo central do leito fixo, portanto, uma há variações radiais.

Com relação à abordagem em camada fina, os resultados simulados remetem à cautela na aproximação está abordagem, pois a energia disponível para todas as camadas do leito no início do processo não é a mesma, visto que as camadas inferiores adquirem a maior quantidade de calor possível da fase gasosa, nos instantes iniciais do processo. Verifica-se ainda a influência da posição radial e axial na temperatura do meio, e que estes gradientes influenciam a transferência de calor. Consequentemente, indicam variações no processo de secagem.

Ao avaliar o  $k_c$  para o leito fixo infere-se que há alteração no potencial de secagem para o equipamento quando empregados os perfis de porosidade, sendo a velocidade a principal influência sobre os resultados. É notório que as variações ocorrem em função da posição tanto axial como radial em regime transiente.

## 7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Existe a necessidade de avanços na modelagem da transferência de massa para avaliação mais completa da abordagem em camada fina, com o presente modelo de estudo foi perceptível a influência do perfil de porosidade radial sobre o escoamento do ar e aquecimento do leito fixo. No entanto, ainda não foi possível realizar a quantificação desta influência sobre a secagem, propriamente dita.

Algumas restrições podem ser modificadas no modelo para melhorar sua acuracidade. Por exemplo, não o considerar o equilíbrio térmico no modelo para transferência de calor. Além disso, Incorporar mecanismos de transferência de calor através da parede do leito fixo.

No que se refere a transferência de massa, mecanismo de evaporação da água e um forma de quantificar a umidade do material durante o processo de secagem, propriamente dito, poderão representar melhor o comportamento do leito fixo empregado para este fim.

## REFERÊNCIAS

ANSYS, **Fluent User's Guide**. Fluent Inc. Versão 14.0, 2011.

ARRIECHE, L. S., **Modelagem matemática do processo de secagem, por convecção forçada, de sistemas simuladores de alimentos esféricos e deformáveis**. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos- SP, 2007.

Ergun, S. **Fluid Flow through Packed Columns**. Chemical Engineering Progress. Vol. 48, n. 2, p. 89-94, 1952.

CUEL, M. F., **Modelo matemático do processo de purificação do ácido clavulânico por troca iônica em coluna de leito fixo**. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos- SP, 2009.

PITOL, L. de O., **Ampliação de escala da produção de pectinases em fermentação no estado sólido**. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Química, Universidade Federal do Paraná, Curitiba - PR, 2014.

BÉTTEGA, R., **Estudo da fluidodinâmica em leito fixo utilizando-se métodos numéricos de solução: escoamento monofásico de ar**. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos - SP, 2006.

BÉTTEGA, R., CORRÊA, R. G., FREIRE, J. T. **Velocity Profile in Fixed beds: A Study on the Representativeness of the Experimental Measurement of Downstream Flow Characteristics**. Drying Technology, v. 25, p. 1175-1183, 2007.

BÉTTEGA, R., MOREIRA, M. F. P., CORRÊA, R. G., FREIRE, J. T. **Mathematical simulation of radial heat transfer in packed beds by pseudohomogeneous modeling.** Particuology, v.9, p. 107-113, 2011.

BÉTTEGA, R., CORRÊA, R. G., BARROZO, M. A. S., FREIRE, J. T. **Avaliação numérica de modelos de porosidade aplicados à simulação do escoamento e transferência de calor em leito fixo.** XXXVI Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados (ENEMP), Maceió - Al, Anais..., 2013a.

BÉTTEGA, R., BARROZO, M. A. S., CORRÊA, R. G., FREIRE, J. T. **CFD SIMULATION OF HEAT TRANSFER INSIDE PACKED BEDS: EVALUATION OF EFFECTIVE THERMAL CONDUCTIVITY.** JP Journal of Heat and Mass Transfer, v. 8, n. 2, p. 137-148, 2013b.

CARLESSO, V. O., BERBERT, P. A., SILVA, R. F., DETMANN, E. **Avaliação de modelos de secagem em camada fina de sementes de maracujá amarelo.** Revista Brasileira de Sementes, v. 39, n. 2, p. 28-37, 2007.

DEFRAEYE, T. **Advanced computational modeling for drying processes - A review.** Applied Energy, 131, 323-344, 2014.

FERREIRA, L. F. D., PIROZI, M. R., RAMOS, A. M., PEREIRA, J. A. M. **Modelagem matemática da secagem em camada delgada de bagaço de uva fermentado.** Pesq. agropec. bras., v. 47, n. 6, p. 855-862, 2012.

FORTUNA, A. O., **Técnicas Computacionais para Dinâmica de Fluidos.** EDUSP, São Paulo, 2000.

FYHR, C., KEMP, I. C. **Evaluation of the thin-layer method used for measuring single particle drying kinetics.** Transact. IChemE, Part A, 76, A7, 815-822, 1998.

GIUDICI, R. **Transferência de Calor em um Reator de Leito Fixo: Modelo que Incorpora Não-uniformidades Radiais no Leito.** XIX

Encontro sobre Escoamentos em Meios Porosos, Campinas, Anais..., p. 262-273, 1991.

HAIDEGER, E.; VORTMEYER, D. E.; WAGNER. **Simultane Losung von Energie – Stoff-und Impullgleichungen fur Wandgekuhlte Chemische Fesbetteaktoren**. Chemical Engineering Technology, v. 61, p. 647-650, 1989.

JORGE, L. M. M.; GIUDICI, R.; **Transferência de calor em leito fixo: Modelos Alternativos**. XX Encontro sobre Escoamentos em Meios Porosos, Anais..., p. 129-140, 1992.

KRAWCZYK, P., BADYDA, K. **Two-dimensional CFS modeling of the heat and mass transfer process during sewage sludge drying in a solar dryer**. Archives os thermodynamics, v. 32, n. 4, p. 3-16, 2011.

LÓPEZ, A., PIQUÉ, M. T., ROMERO, A. **Simulation of deep bed drying of hazelnuts**, Dry. Technol., v. 16, n. 3, p. 651-665, 1998.

MALISKA, Clovis R. **Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional**. 2.ed. rev e ampliada, [reimp.]. Rio de Janeiro: LTC, p. 453, 2010.

MARRERO, T. R., MASON, E. A. **Gaseous Diffusion Coefficients**. Journal of Physical and Chemical Reference Data. v. 1, n. 1, 1972.

MUELLER, G. E.; **Radial void fraction distributions in randomly packed fixed beds of uniformly sized spheres in cylindrical containers**. Powder Technology, v. 72, p. 269-275, 1992.

NAGLIATE, F.C., BÉTTEGA, R., CORRÊA, R. G. **Determinação da fluidodinâmica do ar em leito fixo utilizando-se simulação numérica CFD**. XVIII Congresso Brasileiro de Engenharia Química (COBEQ), 2010.



PADOIN, N., DAL'TOÉ A. T. O., RANGEL, L. P., REPELATO, K., SOARES, C. **Heat and mass transfer modeling for multicomponent multiphase flow with CFD.** International Journal of Heat and Mass Transfer, 73, 239-249, 2014.

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

SILVA, W. P., SILVA, C. M. D. P. S, GAMA, F. J. A., GOMES, J. P. **Mathematical models to describe thin-layer drying and to determine drying rate of whole bananas,** Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences, 13, 67-74, 2014.

SINGULANI, F. M. Z., **Análise Teórico-Experimental do Escoamento do Ar em leito Fixo.** Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos - SP, 2001.

SUBAGYO, S. N., BROOKS, G. A. **A new model of velocity distribution of a single-phase fluid flowing in packed beds.** Chemical Engineering Science, v. 53, p, 1375-1385, 1998.

WELTY, R. J.; RORRER, G. L.; FOSTER, D. G.; **Fundamentals of Momentum, Heat, and Mass Transfer,** 6th Edition, Wiley, 2013, Cap. 30.

ZOTIN, F. M. Z., **O Efeito de Parede em Colunas de Recheio.** Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos - SP, 1985.