



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS  
INSTITUTO DE QUÍMICA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO  
EM ENGENHARIA QUÍMICA



ANÁLISE DA SEGREGAÇÃO AXIAL E RADIAL EM UM LEITO  
DE JORRO CÔNICO

Jéssika Nayara Santos Moraes

Goiânia  
2020





UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS  
INSTITUTO DE QUÍMICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO  
EM ENGENHARIA QUÍMICA



ANÁLISE DA SEGREGAÇÃO AXIAL E RADIAL EM UM LEITO  
DE JORRO CÔNICO

Jéssika Nayara Santos Moraes

Dissertação submetida ao  
Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Química da  
Universidade Federal de Goiás  
como parte dos requisitos  
necessários à obtenção do título de  
Mestre em Engenharia Química,  
na área de concentração em  
Desenvolvimento de Processos.

Orientador: Prof. Dr. Dyrney Araújo dos Santos

Goiânia – GO

2020

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFG.

Morais, Jéssika Nayara Santos

Análise da Segregação Axial e Radial em um Leito de Jorro Cônico  
[manuscrito] / Jéssika Nayara Santos Moraes. - 2020.  
viii, 63 f.: il.

Orientador: Prof. Dr. Dyrney Araújo dos Santos.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Goiás, Instituto de Química (IQ), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Goiânia, 2020.

Bibliografia.

Inclui siglas, fotografias, abreviaturas, símbolos, gráfico, tabelas, lista de figuras, lista de tabelas.

1. Índices de segregação. 2. Forma da partícula. 3. Diâmetro da partícula. 4. Densidade da partícula. I. Santos, Dyrney Araújo dos, orient. II. Título.

CDU 66.0



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS

INSTITUTO DE QUÍMICA

**ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO**

Ata nº 37 da sessão da Defesa de Dissertação de **Jéssika Nayara Santos Morais**, que confere o título de **Mestra em Engenharia Química**, na área de concentração em **Desenvolvimento de Processos**.

Aos **dezessete de fevereiro de dois mil e vinte**, a partir das **13h30**, na **Sala de Videoconferência do CIAR**, realizou-se a sessão pública da Defesa de Dissertação intitulada "**ANÁLISE DA SEGREGAÇÃO AXIAL E RADIAL EM UM LEITO DE JORRO CÔNICO**". Os trabalhos foram instalados pelo Orientador, **Prof. Dr. Dyrney Araújo dos Santos (IQ/UFG)**, com a participação dos demais membros da Banca Examinadora: Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. **Fernanda Ferreira Freitas (IQ/UFG)**, membro titular interno, e Prof. Dr. **Claudio Roberto Duarte (UFU)**, membro titular externo. Durante a arguição os membros da banca **não fizeram** sugestão de alteração do título do trabalho. A Banca Examinadora reuniu-se em sessão secreta a fim de concluir o julgamento da Dissertação, tendo sido a candidata **aprovada** pelos seus membros. Proclamados os resultados pelo Prof. Dr. **Dyrney Araújo dos Santos (IQ/UFG)**, Presidente da Banca Examinadora, foram encerrados os trabalhos e, para constar, lavrou-se a presente ata que é assinada pelos Membros da Banca Examinadora, aos dezessete de fevereiro de dois mil e vinte.

## TÍTULO SUGERIDO PELA BANCA



Documento assinado eletronicamente por **Dyrney Araújo Dos Santos, Professor do Magistério Superior**, em 17/02/2020, às 15:57, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Fernanda Ferreira Freitas, Professora do Magistério Superior**, em 17/02/2020, às 15:58, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Claudio Roberto Duarte, Usuário Externo**, em 18/02/2020, às 16:06, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://sei.ufg.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **1167317** e o código CRC **271E3743**.

Referência: Processo nº 23070.004875/2020-12

SEI nº 1167317

Dedico este trabalho aos meus pais,  
Junio Santos Morais e Vilma Monteiro de Farias Santos.

---

# Agradecimentos

Agradeço primeiramente à Deus e à Nossa Senhora, que guiaram e iluminaram meu caminho, me dando forças para ultrapassar todos os obstáculos durante esta etapa tão importante em minha vida.

Imensamente agradeço aos meus pais, Vilma Monteiro de Farias Santos e Junio Santos Moraes, ao meu irmão, Junio Santos Moraes Filho, e ao meu companheiro de vida, Matheus Felipe Alves Batista, pelo apoio, força e amor incondicional. Sem vocês a realização deste sonho não seria possível.

Agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Dyrney Araújo dos Santos, por compartilhar sua sabedoria, por sua confiança em mim no desenvolvimento deste projeto de grande relevância e pela sua incansável dedicação. Obrigada por contribuir em meu desenvolvimento pessoal e acadêmico.

Aos meus colegas de pós-graduação, em especial à Wanessa Mendonça Benedito e ao Igor Lima Chaves, agradeço pela amizade, o carinho e a todas as experiências compartilhadas ao longo desta jornada.

As minhas grandes amigas, Kamylla de Paula e Karoline Gomes, agradeço pelo apoio e companheirismo, pessoal e acadêmico, durante todos estes anos de amizade.

Agradeço ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Goiás (PPGEQ/UFG) e a todos os seus professores, por todo o suporte necessário em minha formação como mestre em Engenharia Química.

À FAPEG (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Goiás) (processo nº 201810267000727) e à CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) (processo nº 425071/2016-2) agradeço pela concessão de bolsa de estudos.

*“Em certas ocasiões nossa própria luz se apaga, mas é reacendida em chamas por outro ser humano. Cada um de nós deve o mais profundo agradecimento àqueles que reavivaram essa luz dentro de nós.”*

**Albert Schweitzer**

---

## Resumo

O leito de jorro possui como principais vantagens o movimento cíclico e ordenado das partículas em seu interior, possibilitando, assim, um contato íntimo partícula-partícula e fluido-partícula, o que resulta em altas taxas de transferência de calor, massa e movimento. Devido a estas características, o leito de jorro é vastamente utilizado em processos industriais. Apesar disto, algumas desvantagens são inerentes à sua operação, sendo a mais complexas delas, correlacionadas ao fenômeno de segregação, que ocorre devido a utilização de misturas multicomponentes em linhas produção, provocando a formação de um produto não uniforme, o que, compromete a performance do equipamento. Desta forma, um melhor entendimento do fenômeno de segregação no interior de um leito de jorro, se mostra de fundamental importância para o seu projeto, operação e otimização. No presente trabalho, uma técnica não-intrusiva de gelificação e corte do leito de partículas, foi utilizada no estudo do comportamento da segregação radial e axial em um leito de jorro. Os efeitos do diâmetro, densidade e forma das partículas, assim como também, a análise da velocidade de fluido de arraste na entrada do equipamento e a distribuição inicial do sistema particulado, foram analisados de forma qualitativa e quantitativa. Com relação aos resultados, as misturas binárias com razões de forma, diâmetro e densidade, iguais a 2,0, 2,0 e 1,9 respectivamente, apresentaram uma mistura final randômica. Misturas binárias com razões de diâmetro de 4,5 e de densidade igual a 5,8, apresentaram segregação radial e axial. No que se refere à segregação radial, as partículas de maior diâmetro ou densidade, se concentraram na região central do leito, enquanto, as partículas menores ou mais leves, se concentraram na região anular. A distribuição inicial do sistema particulado não afetou misturas binárias com razão de aspecto igual a 2,0 e razão de densidade de 5,8, porém, afetou sistemas com razão de diâmetro igual a 4,5. Como era esperado, o aumento das razões de diâmetro e densidade provocaram o aumento da segregação radial e axial. A distribuição inicial do sistema particulado, afetou a dinâmica das partículas no interior do leito de jorro, em misturas binárias que possuem altas razões de diâmetro, onde o aumento da velocidade superficial de gás não provocou mudanças no comportamento segregativo da mistura.

Palavras-chave: **índices de segregação; forma da partícula; diâmetro da partícula; densidade da partícula.**

---

## Abstract

The particle cyclic and orderly movement inside a spouted bed has as main advantages of this technique, thus enabling an effective particle-particle and fluid-particle contact, which results in high transfer rates of heat, mass and movement. Due to their intrinsic characteristics, spouted beds have been widely used in industrial processes, however, there are some disadvantages operation inherent, the most complex of which are related to the segregation phenomenon, which occurs due to the multicomponent mixtures use in production lines, causing a non-uniform product formation, which compromises the equipment performance. In this way, a better understanding of the segregation phenomenon inside a spouted bed, is of fundamental importance for its design, operation and optimization. In the present work, a non-intrusive methodology using a solidification-slicing approach was used for the investigation of radial and axial segregation behavior in a spouted bed. The effects of diameter, density, and shape of the particles, as well as the initial particle loading, and the inlet air velocity, on segregation were qualitatively and quantitatively assessed. Regarding the results, binary mixtures with aspect, diameter and density ratios, equals a 2.0, 2.0, and 1.9, respectively, show a random mixture condition. Binary mixtures with diameter ratio of 4.5 and density ratio of 5.8, show radial and axial segregation. As regards to radial segregation, the higher or denser particles, tended to form a central core at the spout region, and the smaller or lighter particles, flowed to the annular region near the spouted bed wall. The particle dynamics seemed not to be significantly affected by changing the particle initial loadings in systems with aspect ratio of 2.0 and density ratio of 5.8, however, affected systems with diameter ratio of 4.5. As expected, the increase in diameter and density ratios caused an increase in radial and axial segregation. The segregation phenomenon for binary mixtures with high density ratio, were shown to be dependent of the initial particle loading configuration, but independent of the superficial gas velocity.

**Key-words: segregation index; particle shape; particle diameter; particle density.**

---

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 ESQUEMA DE UM LEITO DE JORRO CONVENCIONAL (MATHUR E EPSTEIN, 1974).	3
FIGURA 2.2 DIFERENTES CONFIGURAÇÕES PARA O LEITO DE JORRO: A) CILÍNDRICO, B) COM TUBO <i>DRAFT</i> , E C) RETANGULAR. ADAPTADO DE CUI ET AL. (2008).	4
FIGURA 2.3. REGIÕES PRESENTES NO LEITO DE JORRO, ONDE AS SETAS INDICAM O FLUXO DE SÓLIDOS (MATHUR E EPSTEIN, 1974).	5
FIGURA 2.4. EVOLUÇÃO DO JORRO: A) FORMAÇÃO DE UMA PEQUENA CAVIDADE, B) DESENVOLVIMENTO DO JORRO INTERNO E, C) INÍCIO DO JORRO EXTERNO (EPSTEIN E GRACE, 2010).	6
FIGURA 2.5. CURVA CARACTERÍSTICA DO LEITO DE JORRO (BACELOS, 2006).	6
FIGURA 2.6. TIPOS DE MISTURA: A) MISTURA PERFEITA, B) MISTURA RANDOMIZADA, E C) MISTURA SEGREGADA (FITZPATRICK, 2009).	9
FIGURA 2.7. SEGREGAÇÃO POR PERCOLAÇÃO (AMENÁBAR, 2009).	10
FIGURA 2.8. SEGREGAÇÃO POR FLUIDIZAÇÃO (AMENÁBAR, 2009).	10
FIGURA 2.9. SEGREGAÇÃO POR TRAJETÓRIA (PERRY, 2008).	11
FIGURA 2.10. SEGREGAÇÃO POR CONVECÇÃO (AMENÁBAR, 2009).	11
FIGURA 2.11. EXEMPLOS DE MISTURADORES DE SÓLIDOS: A) TAMBOR ROTATÓRIO, B) MISTURADOR DUPLO CONE, C) MISTURADOR EM V, D) LEITO DE JORRO, E) LEITO FLUIDIZADO E, F) MISTURADOR TIPO NAUTA (ADAPTADO DE PERRY, 2009).	14
FIGURA 3.1. UNIDADE EXPERIMENTAL DO LEITO DE JORRO.	21
FIGURA 3.2. DIMENSÕES DO LEITO DE JORRO.	22
FIGURA 3.3. SISTEMA PARTICULADO UTILIZADO: (A) ESFERAS DE VIDRO DE 2 MM DE DIÂMETRO; (B) ESFERAS DE VIDRO DE 4 MM DE DIÂMETRO; (C) ESFERAS DE VIDRO DE 9 MM DE DIÂMETRO; (D) ESFERAS DE POLIACETAL DE 4 MM DE DIÂMETRO; (E) ESFERAS DE AÇO CROMO DE 4 MM DE DIÂMETRO; (F) SEMIESFERAS DE PLÁSTICO DE 4,69 MM DE DIÂMETRO VOLUMÉTRICO.	24
FIGURA 3.4. EXEMPLO DO PROCESSO DE ADIÇÃO DA SOLUÇÃO AQUECIDA DE GELATINA (21% EM MASSA) SOBRE O LEITO DE MATERIAL: A) REGIÃO CÔNICA DO LEITO COM PARTÍCULAS, B) LEITO COM PARTÍCULAS APÓS A ADIÇÃO DA SOLUÇÃO DE GELATINA	27
FIGURA 3.5. EXEMPLO DE UM CONE DE PARTÍCULAS SOLIDIFICADO COM A SOLUÇÃO DE GELATINA. IMAGEM REFERENTE AO EXPERIMENTO DE CONFIGURAÇÃO A (TABELA 3.2).	27

FIGURA 3.6. EXEMPLO DE CORTES LONGITUDINAIS NO LEITO DE PARTÍCULAS.....	28
FIGURA 3.7. EXEMPLO DE CORTES EFETUADOS PARA A OBTENÇÃO DE AMOSTRAS: (A) CORTES VERTICAIS CIRCULARES; (B) CORTES VERTICAIS LINEARES. ....	28
FIGURA 3.8. EXEMPLO DE TODOS OS CORTES EFETUADOS NA OBTENÇÃO DE AMOSTRAS E A RESPECTIVA NOMENCLATURA ADOTA. ....	29
FIGURA 3.9. DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE ALIMENTAÇÃO INICIAL A SEREM INVESTIGADAS EM UM LEITO DE JORRO: A) CONFIGURAÇÃO 1 – PARTÍCULAS DISTRIBUÍDAS DE FORMA SOBREPOSTAS, COM AS PARTÍCULAS DE MAIOR DIÂMETRO/DENSIDADE/ESFERICIDADE ALOCADAS NA PARTE SUPERIOR; B) CONFIGURAÇÃO 2 – PARTÍCULAS DISTRIBUÍDAS LADO A LADO; C) CONFIGURAÇÃO 3 – PARTÍCULAS DISTRIBUÍDAS DE FORMA SOBREPOSTA, COM AS PARTÍCULAS DE MENOR DIÂMETRO/DENSIDADE/ESFERICIDADE NA PARTE SUPERIOR. ....	31
FIGURA 3.10. “PÁ” UTILIZADA PARA AUXILIAR NA ALIMENTAÇÃO DA CONFIGURAÇÃO 2 (LADO-A-LADO). ....	31
FIGURA 3.11. VISTA SUPERIOR DO LEITO DE PARTÍCULAS, EXEMPLIFICANDO A ALIMENTAÇÃO DE CONFIGURAÇÃO 2 (LADO-A-LADO). ....	32
FIGURA 4.1. DISTRIBUIÇÃO DA FRAÇÃO VOLUMÉTRICA DE SÓLIDOS AO LONGO DE DIFERENTES POSIÇÕES LONGITUDINAIS DO LEITO DE PARTÍCULAS PARA A CONFIGURAÇÃO A (PARTÍCULAS IDÊNTICAS). CONSIDERANDO COMO BASE DE CÁLCULO AS PARTÍCULAS DE POLIACETAL PINTADAS DE VERMELHO. ....	34
FIGURA 4.2. ÍNDICES DE SEGREGAÇÃO RADIAL E AXIAL AO LONGO DE DIFERENTES POSIÇÕES LONGITUDINAIS DO LEITO DE PARTÍCULAS PARA A CONFIGURAÇÃO A (PARTÍCULAS IDÊNTICAS).....	34
FIGURA 4.3. DISTRIBUIÇÃO DA FRAÇÃO VOLUMÉTRICA DE SÓLIDOS AO LONGO DE DIFERENTES POSIÇÕES LONGITUDINAIS DO LEITO DE PARTÍCULAS PARA A CONFIGURAÇÃO B (RAZÃO DE ASPECTO = 2,0). CONSIDERANDO COMO BASE DE CÁLCULO AS PARTÍCULAS DE POLIACETAL. ....	36
FIGURA 4.4. ÍNDICES DE SEGREGAÇÃO RADIAL E AXIAL AO LONGO DE DIFERENTES POSIÇÕES LONGITUDINAIS DO LEITO DE PARTÍCULAS PARA A CONFIGURAÇÃO B (RAZÃO DE ASPECTO = 2,0).....	36
FIGURA 4.5. DISTRIBUIÇÃO DA FRAÇÃO VOLUMÉTRICA DE SÓLIDOS AO LONGO DE DIFERENTES POSIÇÕES LONGITUDINAIS DO LEITO DE PARTÍCULAS: (A) CONFIGURAÇÃO C (RAZÃO DE DIÂMETRO = 2,0); (B) CONFIGURAÇÃO D (RAZÃO DE DIÂMETRO = 4,5). CONSIDERANDO COMO BASE DE CÁLCULO AS PARTÍCULAS DE VIDRO DE 4 MM EM (A) E AS PARTÍCULAS DE VIDRO DE 9 MM EM (B).....	37
FIGURA 4.6. ÍNDICES DE SEGREGAÇÃO RADIAL E AXIAL AO LONGO DE DIFERENTES POSIÇÕES LONGITUDINAIS DO LEITO DE PARTÍCULAS: (A) CONFIGURAÇÃO C (RAZÃO DE DIÂMETRO = 2,0); (B) CONFIGURAÇÃO D (RAZÃO DE DIÂMETRO = 4,5).....	38
FIGURA 4.7. DISTRIBUIÇÃO DA FRAÇÃO VOLUMÉTRICA DE SÓLIDOS AO LONGO DE DIFERENTES POSIÇÕES LONGITUDINAIS DO LEITO DE PARTÍCULAS: (A) CONFIGURAÇÃO E (RAZÃO DE DENSIDADE = 1,9); (B) CONFIGURAÇÃO F (RAZÃO DE DENSIDADE = 3,1); (C) CONFIGURAÇÃO G (RAZÃO DE DENSIDADE = 5,8). CONSIDERANDO COMO BASE DE CÁLCULO AS PARTÍCULAS DE VIDRO DE 4 MM EM (A) E AS PARTÍCULAS DE AÇO CROMO EM (B) E (C). ....	41
FIGURA 4.8. ÍNDICES DE SEGREGAÇÃO RADIAL E AXIAL AO LONGO DE DIFERENTES POSIÇÕES LONGITUDINAIS DO LEITO DE PARTÍCULAS: (A) CONFIGURAÇÃO E (RAZÃO DE DENSIDADE =	

- 1,9); (B) CONFIGURAÇÃO F (RAZÃO DE DENSIDADE = 3,1); (C) CONFIGURAÇÃO G (RAZÃO DE DENSIDADE = 5,8)..... 42
- FIGURA 4.9. DISTRIBUIÇÃO DA FRAÇÃO VOLUMÉTRICA DE SÓLIDOS AO LONGO DE DIFERENTES POSIÇÕES LONGITUDINAIS DO LEITO DE PARTÍCULAS PARA A CONFIGURAÇÃO B (RAZÃO DE ASPECTO = 2,0): (A) CONFIGURAÇÃO 1; (B) CONFIGURAÇÃO 2; (C) CONFIGURAÇÃO 3. CONSIDERANDO COMO BASE DE CÁLCULO AS PARTÍCULAS DE POLIACETAL..... 44
- FIGURA 4.10. ÍNDICES DE SEGREGAÇÃO RADIAL E AXIAL AO LONGO DE DIFERENTES POSIÇÕES LONGITUDINAIS DO LEITO DE PARTÍCULAS PARA A CONFIGURAÇÃO B (RAZÃO DE ASPECTO = 2,0): (A) CONFIGURAÇÃO 1; (B) CONFIGURAÇÃO 2; (C) CONFIGURAÇÃO 3. .... 45
- FIGURA 4.11. DISTRIBUIÇÃO DA FRAÇÃO VOLUMÉTRICA DE SÓLIDOS AO LONGO DE DIFERENTES POSIÇÕES LONGITUDINAIS DO LEITO DE PARTÍCULAS PARA A CONFIGURAÇÃO D (RAZÃO DE DIÂMETRO = 4,5): (A) CONFIGURAÇÃO 1; (B) CONFIGURAÇÃO 2; (C) CONFIGURAÇÃO 3.... 46
- FIGURA 4.12. ÍNDICES DE SEGREGAÇÃO RADIAL E AXIAL AO LONGO DE DIFERENTES POSIÇÕES LONGITUDINAIS DO LEITO DE PARTÍCULAS PARA A CONFIGURAÇÃO D (RAZÃO DE DIÂMETRO = 4,5): (A) CONFIGURAÇÃO 1; (B) CONFIGURAÇÃO 2; (C) CONFIGURAÇÃO 3. .... 47
- FIGURA 4.13. DISTRIBUIÇÃO DA FRAÇÃO VOLUMÉTRICA DE SÓLIDOS AO LONGO DE DIFERENTES POSIÇÕES LONGITUDINAIS DO LEITO DE PARTÍCULAS PARA A CONFIGURAÇÃO G (RAZÃO DE DENSIDADE = 5,8): (A) CONFIGURAÇÃO 1; (B) CONFIGURAÇÃO 2; (C) CONFIGURAÇÃO 3. CONSIDERANDO COMO BASE DE CÁLCULO AS PARTÍCULAS DE AÇO CROMO. .... 49
- FIGURA 4.14. ÍNDICES DE SEGREGAÇÃO RADIAL E AXIAL AO LONGO DE DIFERENTES POSIÇÕES LONGITUDINAIS DO LEITO DE PARTÍCULAS PARA A CONFIGURAÇÃO G (RAZÃO DE DENSIDADE = 5,8): (A) CONFIGURAÇÃO 1; (B) CONFIGURAÇÃO 2; (C) CONFIGURAÇÃO 3. .50
- FIGURA 4.15. ÍNDICES DE SEGREGAÇÃO AXIAL AO LONGO DE DIFERENTES POSIÇÕES LONGITUDINAIS DO LEITO DE PARTÍCULAS PARA A CONFIGURAÇÃO D (RAZÃO DE DIÂMETRO = 4,5): (A) CORTE L<sub>A</sub>; (B) CORTE L<sub>B</sub>; (C) CORTE L<sub>C</sub>; (D) CORTE L<sub>D</sub>; (E) CORTE L<sub>E</sub>. .... 52
- FIGURA 4.16. ÍNDICES DE SEGREGAÇÃO RADIAL AO LONGO DE DIFERENTES POSIÇÕES LONGITUDINAIS DO LEITO DE PARTÍCULAS PARA A CONFIGURAÇÃO D (RAZÃO DE DIÂMETRO = 4,5): (A) CORTE L<sub>A</sub>; (B) CORTE L<sub>B</sub>; (C) CORTE L<sub>C</sub>; (D) CORTE L<sub>D</sub>. .... 53

---

## LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1. ÍNDICES DE MISTURA. ADAPTADO DE FAN <i>ET AL.</i> (1970). .....	13
TABELA 3.1. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DOS MATERIAIS PARTICULADOS.....	24
TABELA 3.2 DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE PARTÍCULAS UTILIZADAS NA AVALIAÇÃO DO FENÔMENO DE SEGREGAÇÃO EM LEITO DE JORRO.....	25

# LISTA DE SÍMBOLOS

$C$	concentração de pixels em cada célula, $[M^0L^0T^0]$
$C_{médic}$	concentração média de pixels, $[M^0L^0T^0]$
$d_p$	diâmetro da partícula, $[M^0L^1T^0]$
$L_A$	corte longitudinal A no leito de partículas
$L_B$	corte longitudinal B no leito de partículas
$L_C$	corte longitudinal C no leito de partículas
$L_D$	corte longitudinal D no leito de partículas
$L_E$	corte longitudinal E no leito de partículas
$m_1$	massa do componente de maior esfericidade/densidade/diâmetro, $[M^1L^0T^0]$
$m_2$	massa do componente de menor esfericidade/densidade/diâmetro, $[M^1L^0T^0]$
$N$	número total de amostras, $[M^0L^0T^0]$
$I$	índice de mistura, $[M^0L^0T^0]$
$I_a$	índice axial de segregação, $[M^0L^0T^0]$
$I_r$	índice radial de segregação, $[M^0L^0T^0]$
$V_{mj}$	velocidade de mínimo jorro, $[M^0L^1T^{-1}]$
$\bar{X}_B$	fração mássica das partículas em todo o leito, $[M^0L^0T^0]$
$(\bar{X}_B)_u$	fração mássica de partículas na metade superior do leito, $[M^0L^0T^0]$

## Símbolos Gregos

$\alpha_i$	fração volumétrica final de uma amostra na posição axial $i$ , $[M^0L^0T^0]$
$\alpha_o$	fração volumétrica inicial em todo o leito, $[M^0L^0T^0]$
$\alpha_s$	fração volumétrica local, $[M^0L^0T^0]$
$\bar{\alpha}_s$	fração volumétrica media, $[M^0L^0T^0]$
$\rho$	densidade da partícula, $[M^1L^{-3}T^0]$
$\rho_1$	densidade do componente de maior esfericidade/diâmetro/densidade, $[M^1L^{-3}T^0]$
$\rho_2$	densidade do componente de menor esfericidade/diâmetro/densidade, $[M^1L^{-3}T^0]$
$\sigma$	desvio padrão entre as amostras, $[M^0L^0T^0]$

- $\sigma_o$  desvio padrão antes da mistura,  $[M^0L^0T^0]$   
 $\sigma_r$  desvio padrão de uma mistura randômica,  $[M^0L^0T^0]$   
 $\mu_f$  viscosidade do fluído,  $[M^1L^{-1}T^{-1}]$

# SUMÁRIO

Resumo.....	i
Lista de Figuras.....	iii
Lista de Tabelas.....	vi
Lista de Símbolos.....	vii
Introdução.....	1
Revisão Bibliográfica .....	3
2.1 O leite de jorro .....	3
2.2 Fenômenos de Mistura e Segregação .....	8
2.3 Fenômenos de Mistura e Segregação em Leitos de Jorro .....	15
Materiais e Métodos .....	21
3.1 Unidade Experimental.....	21
3.2 Verificação da Concentração do Agente Aglutinante (Gelatina) .....	23
3.3 Metodologia Experimental.....	23
Resultados e Discussão.....	33
4.1. Análise do Efeito do Equipamento.....	33
4.2 Análise do Efeito da Forma das Partículas .....	35
4.3 Análise do Efeito do Diâmetro das Partículas .....	37
4.4 Análise do Efeito da Densidade.....	40
4.5 Análise do Efeito da alimentação .....	43
4.6 Efeito da Velocidade Superficial de Gás .....	51
Conclusão .....	55
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	57

---

---

# CAPÍTULO 1

---

## Introdução

O desenvolvimento de processos que possibilitem uma maior eficiência e praticidade no setor industrial é o tema de diversos estudos científicos ao longo de décadas. Na busca por processos que obtenham um contato efetivo fluido-partícula e partícula-partícula, tem-se o desenvolvimento da técnica de leito de jorro.

O leito de jorro, originalmente proposto por Mathur e Gishler (1954), possui um movimento cíclico e razoavelmente ordenado das partículas em seu interior, o que contribui em elevadas taxas de transferência de calor e massa, além disto, o leito de jorro pode operar com partículas grosseiras, de 25 a 35 *mesh* (MATHUR e GISHLER, 1955a; MATHUR e GISHLER, 1955b).

Nesta técnica, as principais limitações estão vinculadas a alguns fatores, tais como: dificuldades de ampliação de escala (*scale-up*), pois, dependendo das condições geométricas e operacionais, o leito pode apresentar instabilidade, ocasionando altas quedas de pressão para o estabelecimento da condição de jorro e o surgimento de uma altura de fonte instável; presença de segregação; e formação de zonas mortas.

As dificuldades operacionais intrínsecas ao leito de jorro podem ser intensificadas pela presença de sistemas particulados caracterizados por possuírem propriedades físicas distintas, tais como: densidade, diâmetro e forma. Neste caso, o fenômeno de segregação de partículas provavelmente ocorre, causando a diminuição na transferência de calor e massa no sistema e produzindo um produto final não homogêneo, o que não se torna interessante para a maioria das aplicações industriais (PALLAI *et al.*, 1984; FERREIRA e FREIRE, 2009).

Industrialmente, as formulações utilizadas em linhas de produção são tipicamente multicomponentes, constituídas por partículas de diferentes formas, diâmetros e massa específica, estabelecendo-se, assim, um cenário com fortes tendências ao processo segregativo. O fenômeno de segregação de partículas se mostra como um dos maiores problemas em processos industriais, sendo considerado um fenômeno complexo e mal compreendido (OTTINO e KHAKHAR, 2000; WELLS e VENABLES, 2001; PERRY, 2008; BHATTACHARYA *et al.*, 2011). Desta forma, empenhos científicos relacionados ao estudo deste fenômeno são indispensáveis para o desenvolvimento e a otimização de processos industriais.

No âmbito da investigação experimental, diferentes técnicas de medidas foram propostas de modo a avaliar as condições de mistura em leitos de jorro, podendo ser classificadas em técnicas de análise intrusivas e não intrusivas. Nas técnicas intrusivas, há a necessidade de um dispositivo adentrar o leito de partículas, podendo, desta forma, perturbar o fluxo do sistema particulado. Dentre estas técnicas, destacam-se: a utilização de tubos de amostragem alocados no interior do leito de partículas; a modificação da estrutura do equipamento, com inserção de guilhotinas na região cônica do leito para retirada de amostras; e a inserção de sondas no interior do leito de partículas (UEMAKI *et al.*, 1983; SAN JOSÉ *et al.*, 1994; BARROZO *et al.*, 2018).

Já com relação às técnicas não intrusivas, não há a necessidade de inserção de qualquer dispositivo dentro do leito de jorro durante o escoamento. Como exemplos, têm-se: análises de imagens utilizando uma câmera de alta velocidade; rastreamento de partículas radioativas; e a análise indireta da segregação por meio das flutuações da queda de pressão na entrada do leito (BACELOS e FREIRE 2007; DU *et al.*, 2015; KIANI *et al.*, 2017; AL-JUWAYYA *et al.*, 2019).

Uma técnica não intrusiva de baixo custo para a análise do grau de mistura em sistemas particulados, foi proposta por Reape *et al.* (2015) no estudo de tambores rotatórios. Nesta técnica, os autores utilizaram a metodologia de gelificação e corte do leito de partículas, juntamente com o posterior processamento de imagens, possibilitando a análise quantitativa da segregação.

Na literatura, até o momento, não há relatos sobre a aplicação da metodologia de gelificação e corte para a investigação de segregação em leitos de jorro. Esta técnica tem como principal vantagem a possibilidade de analisar, quantitativa e qualitativamente, todo o leito de material em diferentes posições, radiais e longitudinais, sem perturbar a disposição das partículas.

Desta forma, este trabalho tem como objetivo investigar, de forma qualitativa e quantitativa, a segregação radial e axial de misturas binárias em um leito de jorro cônico por meio do emprego da técnica não intrusiva de gelificação e corte. Os efeitos da forma, densidade e diâmetro das partículas, assim como, da alimentação inicial de partículas dentro do leito sobre o fenômeno de segregação foram analisados. Foi estudado, também, o comportamento do processo segregativo frente à variação da velocidade de gás de arraste.

---

---

# CAPÍTULO 2

---

## Revisão Bibliográfica

Neste capítulo, visa-se contextualizar a importância do leito de jorro, tanto no meio acadêmico, quanto no meio industrial, destacando-se suas diferentes configurações, as características fluidodinâmicas das partículas em seu interior, bem como os benefícios e as limitações em sua operação. O fenômeno de mistura e segregação também é apresentado, assim como os principais estudos relevantes sobre o tema.

### 2.1 O leito de jorro

O leito de jorro, originalmente proposto por Mathur e Gishler (1954), inicialmente para a secagem de grãos de trigo, foi desenvolvido com o intuito de superar as limitações impostas pelas técnicas já existentes de leito fixo, onde a ausência de agitação e mistura das partículas causam altos gradientes de temperatura e, conseqüentemente, baixa eficiência de transferência de energia, e de leito fluidizado, onde as partículas grosseiras de tamanho uniforme são de difícil fluidização (MATHUR e GISHLER, 1954).

O leito de jorro possui um *design* simples e de fácil construção, sendo composto convencionalmente por uma coluna cilíndrica vertical acoplada a uma base cônica, que produz maior recirculação de produto e evita a formação de zonas mortas, como mostrado na Figura 2.1.



Figura 2.1 Esquema de um leito de jorro convencional (MATHUR e EPSTEIN, 1974).

O leito de jorro possui a capacidade de lidar com partículas contendo uma larga faixa de distribuição granulométrica e diferenças significativas em suas propriedades físicas, tais

como, densidade, diâmetro e forma. Em sua operação, as partículas são alimentadas na superfície superior do equipamento, enquanto que o fluido de arraste entra pelo sistema por um orifício centralizado em sua base (EPSTEIN e GRACE, 2010).

No interior do leito de jorro, o movimento das partículas é caracterizado por um comportamento cíclico e ordenado, possibilitando, desta forma, um efetivo contato partícula-partícula e partícula-fluido, o que resulta em altas taxas de transferência de calor, massa e quantidade de movimento (MATHUR e GISHLER, 1955b).

Devido às suas características intrínsecas, diversos estudos foram desenvolvidos com o intuito de se investigar a possibilidade de expansão na utilização do leito de jorro em diferentes tipos de processos, empregando diferentes materiais particulados e fluidos de arraste (EPSTEIN e MATHUR, 1974). Desta forma, o leito de jorro passa a ser utilizado em diversos setores industriais, tais como: secagem de grãos (WIRIYAUMPAIWONG *et al.*, 2003; BRITO *et al.*, 2017), tratamento de biomassa para fins energéticos (OLAZAR *et al.*, 2018; LÓPEZ *et al.*, 2018), extração de óleos e corantes (CHIELLE *et al.*, 2016; TAHAM *et al.*, 2016), recobrimento de comprimidos (OLIVEIRA *et al.*, 2008; SMIRNOVA *et al.*, 2012), remoção de íons de metais pesados (MARTINS e RUOTOLO, 2010; ZEWAİL e YOUSEL, 2014), dentre outros.

Além da configuração clássica do leito de jorro, como a empregada por Mathur e Gishler (1954) (Figura 2.1), outros modelos estruturais foram desenvolvidos visando melhorar a operacionalidade, as características de transferência de calor e a eficiência de contato sólido-fluído. Dentre estes modelos, destacam-se: o leito completamente cônico, o leito totalmente cilíndrico, o leito de base retangular, o meio leito (meia-cana), leitos múltiplos, leito dotado com tubo *draft*, etc. Alguns destes modelos são apresentados na Figura 2.2 (CUI *et al.*, 2008; SARI *et al.*, 2012).

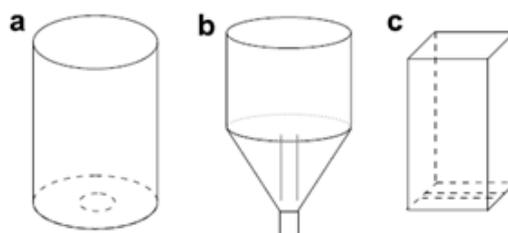


Figura 2.2 Diferentes configurações para o leito de jorro: a) cilíndrico, b) com tubo *draft*, e c) retangular. Adaptado de CUI *et al.* (2008).

Durante a operação de um leito de jorro, pode-se observar a formação de três diferentes regiões: região de jorro; região da fonte e região anular (Figura 2.3). Cada uma destas regiões possui características intrínsecas, o que aumenta ainda mais a complexidade no estudo do leito de jorro.

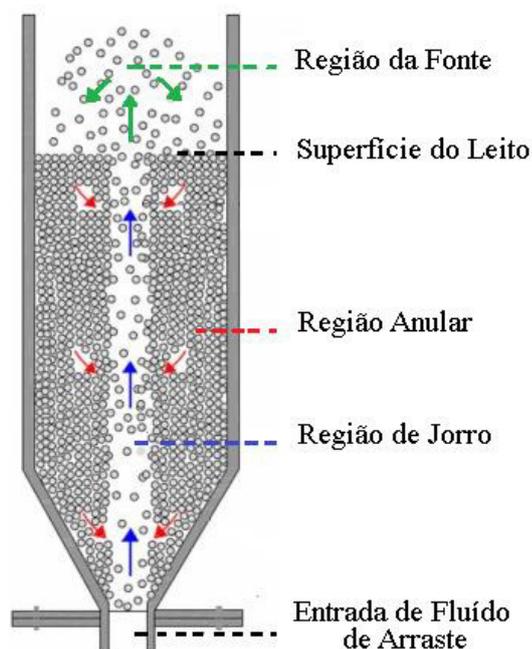


Figura 2.3. Regiões presentes no leito de jorro, onde as setas indicam o fluxo de sólidos (MATHUR e EPSTEIN, 1974).

Na região do jorro, as partículas são arrastadas pelo fluido que entra pelo orifício centralizado em sua base cônica e apresentam um comportamento característico do transporte pneumático. Nesta região, há a formação de um canal através do leito de partículas, chamado de jorro, que possui baixa concentração de partículas. Uma vez que estas partículas ultrapassam a superfície do leito, forma-se a região da fonte, onde as partículas perdem velocidade e caem em movimentos aproximadamente parabólicos sobre a região anular, caracterizada pelo movimento lento e descendente de partículas, comportando-se como um leito deslizante, e possuindo elevada concentração de partículas (FERREIRA e FREIRE, 2009; EPSTEIN e GRACE, 2010).

A formação das três regiões fluidodinâmicas presentes em um leito de jorro ocorre de forma gradual com o aumento da vazão de fluido em seu orifício de entrada. Inicialmente, um aumento de velocidade significativa do fluido causa o arrasto das partículas formando uma pequena cavidade no interior do leito (Figura 2.4a); um aumento adicional na velocidade do

fluido expande o jato, obtendo-se o chamado jorro interno (Figura 2.4b); com o aumento progressivo da velocidade, o jorro rompe a superfície de partículas formando-se o jorro externo (Figura 2.4c).

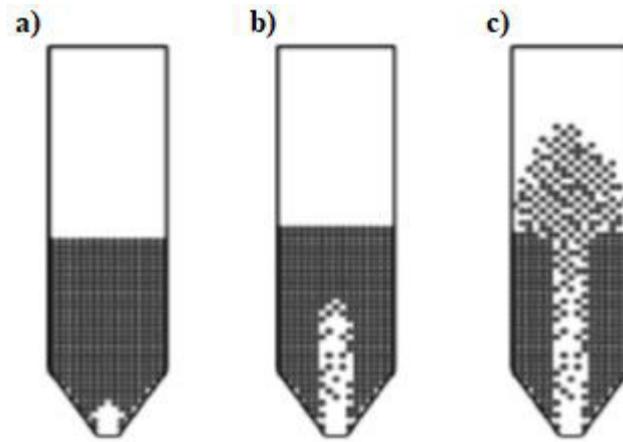


Figura 2.4. Evolução do jorro: a) formação de uma pequena cavidade, b) desenvolvimento do jorro interno e, c) início do jorro externo (EPSTEIN e GRACE, 2010).

Assim, a caracterização do desenvolvimento fluidodinâmico do jorro pode ser feita com base na construção de sua curva característica, sendo obtida graficamente a partir da queda de pressão do sistema em função da vazão ou velocidade do fluido de entrada (Figura 2.5). A linha sólida é obtida quando se promove a passagem do jorro interno para o externo, com o aumento da vazão de fluido, conhecida como “Curva de Ida”. Já a linha pontilhada, representa a operação inversa, conhecida como “Curva de Volta”.

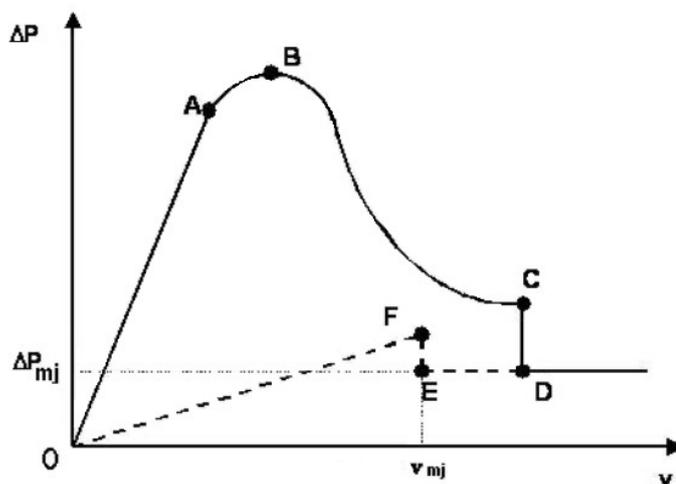


Figura 2.5. Curva característica do leito de jorro (BACELOS, 2006).

Na curva característica mostrada na Figura 2.5, pode-se observar que inicialmente o leito de partículas se comporta como um leito fixo (trecho OA), devido à baixa velocidade do fluido, que apenas percola as partículas sem causar modificação na estrutura do leito. Nesta etapa, a queda de pressão aumenta praticamente de modo linear com a velocidade.

Com o aumento da velocidade do fluido, a força de arraste sobre as partículas se torna suficiente para arrastá-las e estas começam a se compactar na região de entrada do leito, formando uma pequena cavidade que fornece maior resistência para a passagem do fluido e, desta forma, a queda de pressão total do sistema aumenta. A cavidade começa a se alongar até a formação de um jorro interno no sistema, causando a queda de pressão máxima (trecho AB).

A cavidade se expande com o aumento da velocidade e se aproxima da região da superfície do leito; o jorro incipiente é atingido (ponto C); qualquer aumento a partir deste ponto causa o rompimento do leito, provocando o jorro externo, diminuindo a concentração de partículas na região do jorro (ponto C ao D) e, conseqüentemente, diminuindo a queda de pressão. O regime de jorro estável é então alcançado com o aumento da velocidade, causando alturas de fonte cada vez maiores e sem um aumento significativo na queda de pressão (BACELOS, 2006).

Um importante parâmetro a ser observado no desenvolvimento fluidodinâmico do leito de jorro é a velocidade de mínimo jorro, a qual corresponde à velocidade em que o jorro estável colapsa com a velocidade de gás decrescente. A queda de pressão correspondente a este ponto é definida como queda de pressão de mínimo jorro. Algumas correlações para a predição da velocidade de mínimo jorro, podem ser encontradas em Epstein (2010).

Na literatura, encontram-se algumas desvantagens inerentes à operação do leito de jorro vinculadas à necessidade de *scale-up*, visto que, dependendo das condições geométricas e operacionais, o leito de jorro apresenta instabilidades as quais são caracterizadas por formações de bolhas, acarretando o surgimento de pulsações da fonte e, conseqüentemente, a diminuição de sua eficiência.

Limitações também estão vinculadas à alta queda de pressão para o estabelecimento de jorro e a uma altura máxima para o jorro estável. Além disto, muitas das aplicações utilizando-se o leito de jorro envolvem a mistura de partículas regulares e densas que garantem a estabilidade do leito com boa mistura e transferência de calor. Porém, quando a operação do sistema ocorre com partículas caracterizadas por diferentes propriedades físicas (diferentes diâmetros, densidades e formas), a mistura de partículas no interior do leito não se torna tão

eficiente, provocando a segregação e a formação de zonas mortas. Como consequência, um produto não uniforme pode ser obtido comprometendo a performance do equipamento (PALLAI *et al.*, 1984; FERREIRA e FREIRE, 2009).

Desta forma, um melhor entendimento das características fluidodinâmicas no interior do leito de jorro e do fenômeno indesejado de segregação, se mostra de fundamental importância para o seu projeto, operação e otimização.

### 2.2 Fenômenos de Mistura e Segregação

Define-se a mistura como uma operação unitária pela qual dois ou mais materiais são dispersos de forma randômica dentro de um sistema, sendo aplicada para atingir resultados específicos, em situações tais como: dispersar líquidos imiscíveis uns nos outros, misturar sistemas particulados, criar suspensões de partículas sólidas e promover a homogeneização de líquidos miscíveis (FAN *et al.*, 1970; CHEREMISINOFF., 2000).

Os principais mecanismos envolvidos no processo de mistura de sistemas particulados são comumente denominados como difusivos, convectivos e de cisalhamento (FITZPATRICK., 2009; BRIDGWATER., 2012).

**Mecanismo difusivo (micromistura):** neste mecanismo, as partículas passam por determinados períodos em contato íntimo, até se deslocarem por ação externa (agitador, rotação do equipamento, e etc.), distribuindo-se pelo sistema formando novos contatos partícula-partícula.

**Mecanismo convectivo (macromistura):** refere-se ao movimento grosseiro de partículas que se movem por ação do misturador em aglomerados que se deslocam em relação uns aos outros. Desta forma, a área de superfície de contato entre os componentes é aumentada, melhorando-se a homogeneidade espacial em larga escala.

**Mecanismo de cisalhamento:** a mistura ocorre quando camadas de partículas deslizam em planos sobrepostos onde, devido ao alto gradiente de velocidade, há o colapso das camadas umas sobre as outras, levando-se a mecanismos de misturas difusiva e convectiva.

A obtenção de um produto final em uma mistura de sólidos com homogeneidade satisfatória pode ser influenciada por diversos fatores devido à complexidade do processo de

mistura. Estes fatores estão atrelados às características dos sólidos, às condições operacionais e às características do equipamento utilizado (FAN *et al.*, 1970). Pode-se classificar o processo de mistura, de acordo com as características e homogeneidade do produto final, em três diferentes tipos (FITZPATRICK, 2009):

**Mistura perfeita:** é considerada quando há uma concentração uniforme de cada componente em toda a mistura. Considere, por exemplo, uma mistura com quantidades iguais de partículas pretas e brancas. Em uma mistura perfeita, as partículas se posicionam de forma regular como apresentado na Figura 2.6a. Na prática, equipamentos de mistura não são capazes de gerar este tipo de sistema;

**Mistura randomizada:** neste tipo de mistura, a probabilidade de se encontrar uma partícula de determinado componente é a mesma em todas as posições da mistura, sendo a proporção em uma amostra igual a proporção do componente em toda o sistema (Figura 2.6b);

**Mistura segregada:** é o tipo de mistura que se tem grande probabilidade de encontrar apenas um componente da mistura em determinada região do sistema, sendo um tipo indesejado de mistura por não haver homogeneidade (Figura 2.6c).

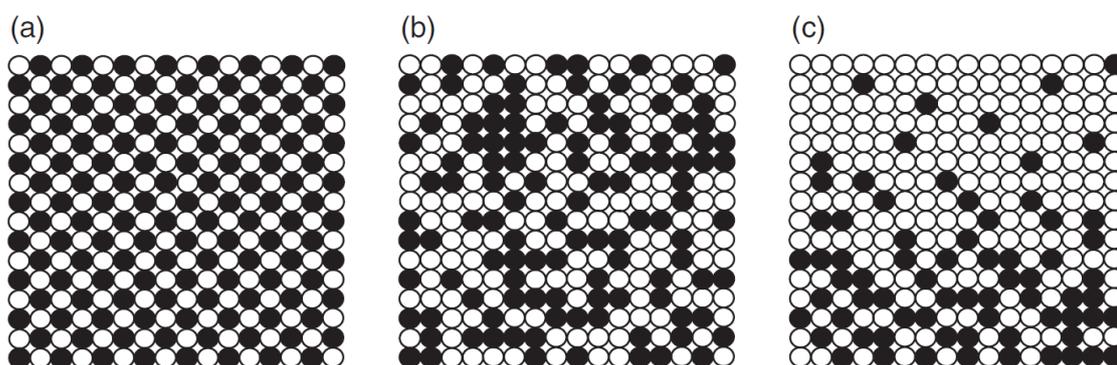


Figura 2.6. Tipos de mistura: a) mistura perfeita, b) mistura randomizada, e c) mistura segregada (FITZPATRICK, 2009).

Na mistura segregada, o fenômeno de segregação rege a dinâmica das partículas no interior do equipamento, sendo causado por diferentes tipos de mecanismos evidenciados na literatura que dependem das características das partículas e do método utilizado. Alguns destes

mecanismo são listados a seguir, embora muitos outros possam ser encontrados na literatura (WILLIAMS, 1976; MOSBY *et al.*, 1996; AMENÁBAR, 2009; PERRY, 2008).

**Segregação por percolação:** é comumente encontrado em sistemas com partículas granulares de tamanhos diferentes. Neste mecanismo, durante o fluxo do sistema, as partículas podem-se rearranjar e as de menor diâmetro “caem” nos interstícios das maiores partículas, atingindo o fundo do recipiente (Figura 2.7). Ocorre, geralmente, em equipamentos que possuem mecanismos de agitação, vibração e tombamento (AMENÁBAR, 2009; PERRY, 2008).



Figura 2.7. Segregação por percolação (AMENÁBAR, 2009).

**Segregação por fluidização:** está presente em sistemas como o leito fluidizado, onde as partículas estão sob influência de forças de arraste e gravitacionais (Figura 2.8). Neste sistema, as partículas de menor diâmetro ou menor massa específica migram para a parte superior do leito, enquanto as partículas de maior diâmetro ou maior massa específica se movem em direção ao fundo do leito (AMENÁBAR, 2009).

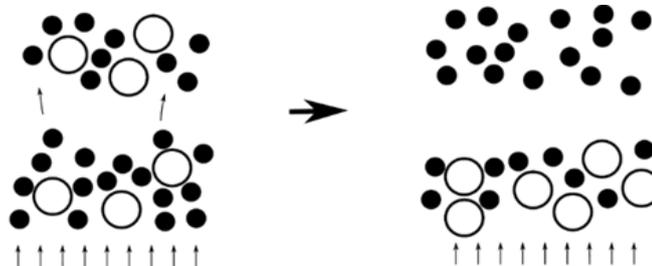


Figura 2.8. Segregação por fluidização (AMENÁBAR, 2009).

**Segregação por trajetória:** é baseada na distância, ou “distância de parada”, que uma partícula pode percorrer horizontalmente antes de aterrissar quando é projetada com uma velocidade  $v$  em um fluido com viscosidade  $\mu_f$  (Figura 2.9). Segundo a lei de

Stokes, esta distância ( $S$ ) pode ser representada pela Equação 2.1, considerando-se que uma partícula com o dobro do diâmetro pode percorrer quatro vezes mais uma determinada distância. Desta forma, partículas com maiores diâmetros percorrem distâncias maiores do que as partículas de menores diâmetros, antes de alcançarem o estado de repouso, resultando em segregação (AMENÁBAR, 2009).

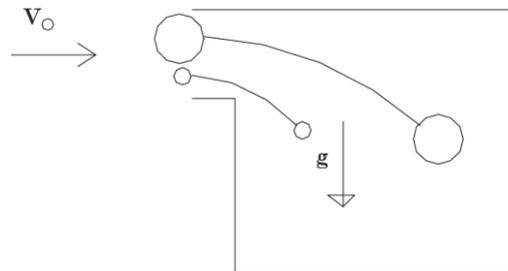


Figura 2.9. Segregação por trajetória (PERRY, 2008).

$$S = \frac{v\rho d_p^2}{18\mu_f} \quad (2.1)$$

sendo  $\rho$  e  $d_p$ , a densidade e o diâmetro da partícula, respectivamente.

**Segregação por convecção:** corresponde à aglomeração de partículas de maior diâmetro na superfície superior em equipamentos com mecanismo de vibração. Neste, o movimento ascendente convectivo das partículas na região média de um leito vibrado faz com que todas as partículas se elevem, e a segregação por tamanho ocorre quando as partículas de maior diâmetro são impedidas de retornarem à superfície inferior devido à presença de uma fina camada de partículas de menor diâmetro nas paredes do equipamento, sendo esta apresentada na Figura 2.10 (AMENÁBAR, 2009).



Figura 2.10. Segregação por convecção (AMENÁBAR, 2009).

**Segregação por impacto:** ocorre quando as partículas estão em movimento, colidindo umas com as outras ou com a superfície do equipamento. Pode acontecer em sistemas contendo partículas densas e leves, pequenas e grandes, e elásticas e não-elásticas, que colidem de diferentes maneiras. Desta forma, ao final do processo de mistura, as partículas podem ser encontradas em diferentes locais. Quando este processo ocorre entre partículas de diferentes diâmetros, as colisões causam um aumento da velocidade das menores partículas, que são espalhadas por uma área maior do que as partículas grosseiras (BROWN, 1939 Apud MOSBY *et al.*, 1996; KALMAN e LEVY, 2001; AMENÁBAR, 2009).

De forma a quantificar a segregação em misturas, foram desenvolvidas algumas variáveis adimensionais, chamadas de Índices de Mistura ou Índices de Segregação, que proporcionam um melhor entendimento da homogeneidade de um sistema, medindo-se o grau de mistura. Estes índices devem apresentar resultados mais próximos possíveis das características da mistura final, serem independentes do processo de mistura e serem facilmente determinados (FAN *et al.*, 1970).

Nos estudos de Olazar *et al.* (1993) e San José *et al.* (1994), o índice de mistura utilizado para a quantificação da segregação em um leito de jorro foi similar ao utilizado por Rowe *et al.* (1972) para leitos fluidizados (Equação 2.2). Neste caso, a segregação é considerada negligenciável quando o índice se encontra entre 0,95 e 1,05.

$$I = (\overline{X_B})_u / \overline{X_B} \quad (2.2)$$

sendo,  $(\overline{X_B})_u$  a fração mássica das partículas de maior diâmetro presentes na metade superior do leito e  $\overline{X_B}$  a fração mássica das mesmas partículas presentes em todo o leito.

A fração mássica das partículas de maior diâmetro presentes na metade superior do leito  $((\overline{X_B})_u)$ , é calculada experimentalmente com amostras coletadas em diferentes posições radiais (r) e longitudinais (h) no leito. Os autores Bortolotti *et al.* (2013), Barrozo *et al.* (2018) e Santos *et al.* (2018), utilizaram-se deste índice levando em conta apenas a variação longitudinal no leito.

Devido à natureza aleatória do processo de mistura, a abordagem estatística tornou-se a mais utilizada pelos pesquisadores na definição do índice de misturas binárias, com a análise do desvio padrão ou da variância de amostras pontuais coletadas da mistura. Fan *et al.* (1970),

Chou *et al.* (2010) e Santos (2016), utilizaram desta análise na obtenção do índice de mistura no tratamento de imagens em tambores rotatórios (Equação 2.3).

$$I_r = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (C - C_{\text{médio}})^2}{N-1}} \quad (2.3)$$

sendo  $C$  e  $C_{\text{médio}}$  a concentração de pixels pretos local em cada célula e a concentração de pixels pretos média de todas as células, respectivamente, e  $N$  o número total de células ocupadas pelas partículas.

A mistura perfeita ocorre quando  $I_r$  possui valor de 0, e a segregação completa com o valor de 0,5. Ressalta-se que, no presente trabalho serão utilizados, para a contabilização da segregação de partículas no interior de um leito de jorro, variações dos dois índices apresentados anteriormente (Equações 2.2 e 2.3).

Diversas outras definições para o índice de mistura foram reportadas na literatura, sendo dispostas na Tabela 2.1 a seguir.

Tabela 2.1. Índices de Mistura. Adaptado de Fan *et al.* (1970).

<b>Ashton e Valentin (1966)</b>	$I^2 = \frac{\log \sigma_o^2 - \log \sigma^2}{\log \sigma_o^2 - \log \sigma_r^2} \quad (2.4)$
<b>Lacey (1995)</b>	$I = \frac{\sigma_o^2 - \sigma^2}{\sigma_o^2 - \sigma_r^2} \quad (2.5)$
<b>Kramer (1995)</b>	$I = \frac{\sigma_o - \sigma}{\sigma_o - \sigma_r} \quad (2.6)$
<b>Lacey (1996)</b>	$I = \frac{\sigma_r}{\sigma} \quad (2.7)$

Na Tabela 2.1, as variáveis representam os valores do desvio padrão entre as amostras ( $\sigma$ ), do desvio padrão antes da mistura ( $\sigma_o$ ) e do desvio padrão de uma mistura randômica ( $\sigma_r$ ).

Os equipamentos que promovem a mistura de sólidos são chamados de misturadores, sendo usualmente classificados de acordo com o mecanismo de mistura ou com o movimento do misturador. Fan *et al.* (1970), classificam os equipamentos de mistura de acordo com o tipo

de operação: misturadores em batelada e misturadores contínuos. Já Perry (2008), classificou os misturadores em quatro grupos: *stockpiles*, do tipo *bunker*, rotativo e com mistura direta na alimentação. Em seus estudos, William (1968), Wells e Venables (2001), e Brigwater (2012), propuseram, de acordo com o mecanismo de mistura, duas classes de misturadores: misturadores difusivos e misturadores convectivos. Esta classificação é adotada no presente texto, e uma breve explanação sobre as duas classes é apresentada a seguir.

**Misturadores difusivos:** estes tipos de misturadores são compostos por um tambor que gira em torno do seu eixo central, causando o deslizamento do material a ser misturado no interior do equipamento, tendo como os principais mecanismo de mistura o difusivo e o cisalhante. Alguns exemplos destes misturadores são apresentados na Figura 2.11, sendo o tambor rotatório (Figura 2.11a), o misturador duplo cone (Figura 2.11b) e o misturador em V (Figura 2.11c).

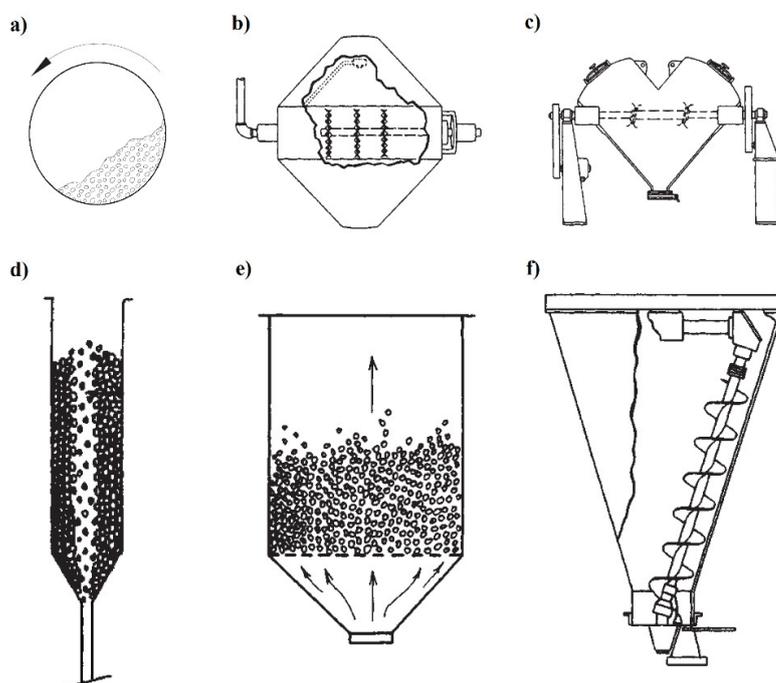


Figura 2.11. Exemplos de misturadores de sólidos: a) Tambor Rotatório, b) Misturador Duplo Cone, c) Misturador em V, d) Leito de Jorro, e) Leito Fluidizado e, f) Misturador tipo Nauta (Adaptado de PERRY, 2009).

**Misturadores convectivos:** são compostos por uma carcaça estacionária, porém possuem agitadores mecânicos internos ou sistemas de agitação pneumática,

predominando o mecanismo convectivo de mistura. O leito de jorro (Figura 2.11d), o leito fluidizado (Figura 2.11e) e o misturador tipo Nauta (Figura 2.11f), são alguns exemplos desta classe de misturadores.

### 2.3 Fenômenos de Mistura e Segregação em Leitos de Jorro

A segregação é um importante fator a ser analisado ao se operar um leito de jorro, pois quanto maior a homogeneidade da mistura, melhor será a qualidade do produto desejado. Desta forma, encontra-se na literatura alguns estudos evidenciando o fenômeno de mistura e segregação em leitos de jorro, que podem auxiliar em uma melhor compreensão das causas e dos fatores que proporcionam a redução da segregação, sendo os principais estudos e suas respectivas técnicas de análise, intrusivas e não intrusivas, apresentados no decorrer do presente texto.

Os estudos experimentais para a investigação do fenômeno de segregação no interior de um leito de jorro iniciaram-se, primeiramente, por Piccinini *et al.* (1977) e Cook e Bridgwater (1978), em que ambos analisaram leitos de jorro com geometria cilíndrica de base cônica e meia-cana.

Piccinini *et al.* (1977), investigaram a segregação, de forma visual, em um leito de jorro meia-cana contínuo confeccionado em acrílico, e em um leito de jorro cônico-cilíndrico contínuo, com amostras sendo retiradas na saída do sistema e comparadas com a composição inicial da alimentação. Foram utilizadas, neste estudo, misturas binárias de partículas de vidro de diferentes diâmetros e partículas de aço. Os autores concluíram que a segregação ocorre quando misturas de partículas com diferentes propriedades físicas foram utilizadas. Em misturas com diferentes diâmetros, as maiores partículas se concentraram na parte superior da região anular. Já em sistemas com diferenças de densidade, as partículas mais densas também se concentraram na região anular, porém, se distribuíram longitudinalmente em toda a extensão do leito. Em todos os casos, a segregação se tornou menos pronunciada com o aumento da velocidade de gás de arraste.

Cook e Bridgwater (1978), estudaram a dinâmica de partículas em leitos de jorro contendo misturas binárias de esferas de vidro, sementes de mostarda e esferas de acrílico, por meio de uma análise não-intrusiva (visual) e intrusiva, com a retirada de amostras por um sistema de sucção. Os autores identificaram a presença da segregação radial dos componentes, causando zonas mortas que concentraram, preferencialmente, apenas um dos componentes da

mistura devido à percolação interpartícula. Observaram, também, que, em sistemas com diferenças de densidade, as partículas mais densas se concentraram longitudinalmente na parte superfície superior do leito e radialmente na região anular, ao contrário dos estudos de Piccinini *et al.* (1977).

Kutluoglu *et al.* (1983), estudaram a segregação de misturas binárias, a partir de uma metodologia não intrusiva, com o tratamento de imagens. Os autores utilizaram misturas de partículas quase esféricas de poliestireno, vidro, ureia e sementes de mostarda. Segundo os autores, o fator principal que promoveu a segregação, foi que as partículas mais densas foram espalhadas de forma muito menos efetiva na direção radial do que as partículas mais leves, durante as colisões que ocorreram na região da fonte.

Uemaki *et al.* (1983), investigaram a segregação radial e axial em um leito de jorro cônico por meio de uma técnica intrusiva de análise, com tubos de amostragem alocados em diferentes posições radiais e longitudinais. Os efeitos da diferença de diâmetro entre as partículas e do aumento da velocidade de fluido de arraste foram analisados. Os autores concluíram que a segregação radial, assim como, a segregação axial, ocorreram em sistemas com grandes diferenças de diâmetro, mesmo sob elevadas velocidades de gás de arraste, e que o grau de segregação aumentou com o aumento da razão de diâmetros da mistura binária.

Uma análise quantitativa da segregação radial e axial em diferentes misturas binárias de esferas de vidro, foi realizada por Olazar *et al.* (1993) em um leito de jorro cônico, por meio de uma técnica com sonda conectada à uma bomba de sucção. Os autores verificaram que misturas binárias de qualquer composição com razão de diâmetros menor do que 4 não apresentaram segregação apreciável. San José *et al.* (1994), utilizaram o mesmo aparato experimental e a mesma metodologia em seus estudos sobre segregação. Os mesmos concluíram que a segregação foi menos pronunciada sob velocidades de gás de arraste mais elevadas e com menores alturas de leito estático. Conclusões semelhantes, foram obtidas por Kutluoglu *et al.* (1983). Estes autores concluíram, também, que, a segregação foi mais evidenciada quando a mistura binária possui a mesma fração mássica de ambos os componentes, e que se tornou praticamente nula sob velocidades de gás de arraste 40% acima da velocidade de mínimo jorro.

Estudos de grande destaque em âmbito nacional na investigação da segregação em leitos de jorro cônico, foram produzidos pelos autores Bacelos e Freire (2006), que utilizaram uma metodologia intrusiva de análise, com tubos longitudinais posicionados em três diferentes

posições axiais para a coleta de amostras, e por Bacelos e Freire (2007), com uma metodologia não intrusiva de análise, que consistiu na captura e análise de imagens do topo do leito de partículas, que foi capaz de prever o comportamento da segregação radial em diferentes alturas de leito estático.

Nos estudos de Bacelos e Freire (2006), foram utilizadas partículas de vidro com diferentes diâmetros médios de Sauter de 0,78 a 4,38 mm, pertencentes aos grupos C e D de Geldart. Como resultado, constatou-se que as partículas de maiores diâmetros se encontraram na superfície do leito de material e, quanto maior a altura do leito estático, menos pronunciada se tornou a segregação para todas as misturas estudadas, fato este que contradiz os estudos de Kutluoglu *et al.* (1983). Ainda no estudo de Bacelos e Freire (2006), os resultados dos índices de mistura foram comparados com aqueles obtidos por Olazar *et al.* (1994), comprovando-se que, a geometria do leito de jorro modifica significativamente o comportamento da segregação na presença de misturas binárias.

Misturas binárias e ternárias contendo esferas de vidro revestidas com glicerol, foram utilizadas nos estudos de Bacelos e Freire (2007). O glicerol foi inserido no sistema no intuito de simular a presença de uma pasta ou suspensão com partículas inertes. Com base nos resultados obtidos, pôde-se observar que as partículas de menor diâmetro se encontraram localizadas próximas à parede do leito, enquanto que as partículas de maior diâmetro se concentraram próximas da região jorro-ânulo. Quando considerada a mistura de partículas ternárias, as partículas de diâmetro intermediário se posicionaram entre as partículas menores e as partículas maiores no sistema. Os autores observaram também que, as forças interpartículas em misturas afetaram a dinâmica das partículas no interior do leito de forma diferente quando comparadas à um sistema de monopartículas. Os efeitos atribuídos à segregação das partículas, geram forças interpartículas de magnitude variável na interface jorro-ânulo.

Hao *et al.* (2008), propuseram uma diferente geometria de leito de jorro anular, a qual possuía uma alimentação diferenciada com cone rotativo. Como metodologia para a análise do grau de mistura, divisões foram projetadas na superfície externa do leito, proporcionando diferentes amostras de mesmo volume. De acordo com estas divisões, as partículas foram cuidadosamente removidas e pesadas. Os autores concluíram que este tipo de alimentação aumentou o grau de mistura das partículas, homogeneizando-as antes de adentrarem a região anular, uniformizando toda a mistura do leito dez vezes mais rápido quando comparado com um leito de jorro convencional. Eles observaram, também, que, com o aumento da velocidade

do ar, a velocidade de mistura axial de partículas aumentou de forma mais significativa do que a mistura radial.

Alguns autores modificaram a região cônica de leitos de jorro cônico-cilíndricos, inserindo guilhotinas longitudinais de forma a extrair amostras e possibilitar a análise quantitativa da segregação axial em diferentes sistemas particulados. No entanto, essa metodologia intrusiva de análise pode causar distúrbios no leito de partículas, uma vez que estas podem se deslocar devido ao cisalhamento promovido pelo movimento da guilhotina. Bortolotti *et al.* (2013), aplicaram esta técnica na observação da segregação durante a secagem de resíduos de acerola com a adição de sementes de soja, sendo estas últimas adicionadas no intuito de aumentar a estabilidade e fluidez do sistema. Devido ao fato de a mistura possuir diferentes características físicas, evidenciou-se a presença de segregação, com os resíduos de acerola (mais leves), se concentrando no topo do leito de material e as partículas mais densas (soja), se aglomerando na interface jorro-ânulo. Neste estudo, o índice de mistura apresentou variações durante o tempo de secagem, sendo que o grau de segregação aumentou com o tempo. Os autores atribuíram este aumento ao fato de que, a diferença de densidades entre o resíduo úmido e seco da acerola aumentar a razão de densidade com o tempo, provocando, assim, uma mistura menos efetiva.

Santos *et al.* (2013), investigaram a redução da segregação axial no processamento de bagaço de cana de açúcar com a adição de areia, em diferentes composições, utilizando o método intrusivo de guilhotinas. Os autores observaram que a biomassa, que possui baixa fluidez, se concentrou no topo do leito de partículas, preferencialmente próximo às periferias da região anular. Resultados similares foram relatados por Kutluoglu *et al.* (1983). Observou-se, também, que a fluidez do sistema foi melhorada à medida que a fração volumétrica do componente mais denso (areia) na mistura foi aumentada, o que auxiliou a biomassa a se movimentar de forma mais fácil pelo leito de partículas. Nos estudos de Santos *et al.* (2015), resultados semelhantes foram obtidos para a diminuição da segregação, porém, para misturas binárias compostas por partículas de vidro de 1 mm e 4 mm, com diferentes frações volumétricas e diferentes alturas de leito estático. Constatou-se que a segregação foi reduzida à medida que a fração volumétrica do componente de maior diâmetro foi aumentada.

Uma diferente metodologia foi estudada por San José *et al.* (2013), no intuito de separar misturas binárias com diferentes densidades em um leito de jorro cônico, conectado à dois ciclones. Neste estudo, foram analisadas a segregação axial e radial de partículas e a trajetória

do sistema particulado, com a utilização de uma sonda conectada à uma bomba de sucção (análise quantitativa) e por tratamento de imagens em vídeo, respectivamente. Concluiu-se que a região de fonte tem um importante papel no comportamento segregativo de um sistema.

Du *et al.* (2015), avaliaram o grau de mistura de sistemas binários em um leito de jorro cônico cilíndrico, relacionando-o às flutuações da queda de pressão, por meio da adição de transdutores em diferentes regiões do leito. Foram utilizadas, combinações de partículas de óxido de alumínio, sílica gel e esferas de vidro, como sistemas binários. Neste estudo, observou-se que os picos de pressão estão relacionados com o grau de mistura do sistema, que são influenciados, principalmente, pelas forças interpartículas entre as partículas finas e grosseiras do sistema, e que a estabilidade do sistema está correlacionada com o fenômeno segregativo.

A pirólise de casca de macadâmia foi o tema de estudo dos autores Xavier *et al.* (2016), sendo que, com o objetivo de melhorar a fluidez do sistema, diferentes frações de areia foram adicionadas. Como metodologia de análise, utilizou-se guilhotinas. Os autores concluíram que a mistura binária possuiu uma boa fluidização com frações mássicas entre 25% e 75% de biomassa, apresentando níveis aceitáveis de segregação para o processo de pirólise. Também foi observado que, quanto menor a fração mássica de cascas de macadâmia, menos pronunciado se torna o fenômeno segregativo. A dinâmica do sistema particulado no interior do leito foi semelhante àquela apresentada pelos autores Kutluoglu *et al.* (1983).

Kiani *et al.* (2017), analisaram o efeito da densidade e do diâmetro de partículas de areia, gesso e poliuretano em um pseudo leito de base regular, sobre a segregação axial e radial. Foi utilizada, como técnica de análise, a captura e tratamento de imagens. Os autores concluíram que, a segregação axial aumentou à medida que a razão de diâmetros foi elevada, e que a dinâmica das partículas se diferiu entre sistemas com partículas de diferentes diâmetros e diferentes densidades. Em misturas binárias com diferentes diâmetros, o caminho percorrido pelo fluido de arraste se concentrou ao longo do eixo central do leito. Já em sistemas com diferentes densidades, o fluido de arraste tendeu a se desviar do eixo central do leito, causando maiores instabilidades no sistema. Estas instabilidades foram caracterizadas pela formação de bolhas e de maiores cavidades internas, devido à menor resistência no fluxo de gás.

Santos *et al.* (2018), estudaram o comportamento de um leito de jorro cônico operando com misturas binárias de partículas de vidro e polietileno, com o auxílio da análise por guilhotinas. Os autores investigaram os efeitos da fração mássica e da altura do leito estático na velocidade de mínimo jorro e no índice de mistura axial. Foi observado que, as partículas mais

pesadas tenderam a se aglomerar próximas ao fundo do leito, na região jorro-ânulo, sendo que este comportamento também foi observado por San José *et al.* (2013). Contatou-se, também, que, para alturas de leito estático elevadas e uma maior fração de partículas densas, a velocidade de mínimo jorro se tornou maior e a mistura de partículas mais efetiva, diminuindo-se, desta forma, a segregação axial.

Uma metodologia avançada de análise foi proposta por Al-Juwaya *et al.* (2019), com a utilização de uma técnica de rastreamento de partículas radioativas, sendo aplicada ao estudo da segregação de partículas de vidro e aço. Concluiu-se que, a região da fonte tem um importante papel na segregação devido à maior quantidade de colisões interpartículas. Em uma mistura binária, isto resulta em uma maior deflexão radial da partícula mais leve, percorrendo trajetórias maiores na direção radial e, conseqüentemente, se acumulando na superfície externa da região anular.

Moliner *et al.* (2019), investigaram, de forma visual, a mistura de partículas binárias com diferentes densidades, tamanhos e formatos, em um leito de jorro retangular de base piramidal. Os autores constataram que, quanto maiores as razões dos diâmetros e das densidades em misturas binárias, mais evidente foi a segregação das partículas. Destacando-se, também, que, para todos os tipos de misturas binárias estudadas, uma vazão de 60% acima da vazão de mínimo jorro causou uma segregação menos pronunciada ou praticamente nula.

Pietsch *et al.* (2019), estudaram o comportamento dinâmico e o efeito segregativo de misturas binárias e ternárias com diferentes diâmetros de partículas de óxido de alumínio, em um leito de jorro prismático tridimensional, com bocal de entrada de fluido de arraste diferenciado. Para tanto, uma metodologia que utiliza a Transformada de Fourier das flutuações de queda de pressão na análise do comportamento dinâmico foi empregada, além de uma análise visual do processo segregativo. Observou-se que a instabilidade no leito de jorro levou ao aparecimento da segregação, fato também observado por Du *et al.* (2015). Desta forma, segundo os autores, a queda de pressão pode ser utilizada para monitorar a instabilidade do jorro e a segregação em processos industriais.

Apesar dos vários estudos reportados na literatura com relação ao processo de mistura e segregação, os mecanismos presentes durante este fenômeno no interior de um leito de jorro são ainda pouco compreendidos. Desta forma, uma investigação sistemática acerca deste fenômeno se mostra de fundamental importância.

---

---

# CAPÍTULO 3

---

## Materiais e Métodos

Nesta seção, será apresentado todo o aparato necessário para a investigação experimental da dinâmica de misturas binárias em um leito de jorro, assim como, a descrição detalhada da metodologia de gelificação proposta para a análise, qualitativa e quantitativa, do fenômeno de segregação neste equipamento.

### 3.1 Unidade Experimental

A unidade experimental utilizada no presente estudo, está localizada no “Laboratório de Sistemas Particulados e Termodinâmica Computacional” (SisParTec) do Instituto de Química, da Universidade Federal de Goiás (UFG), sendo apresentada na Figura 3.1.

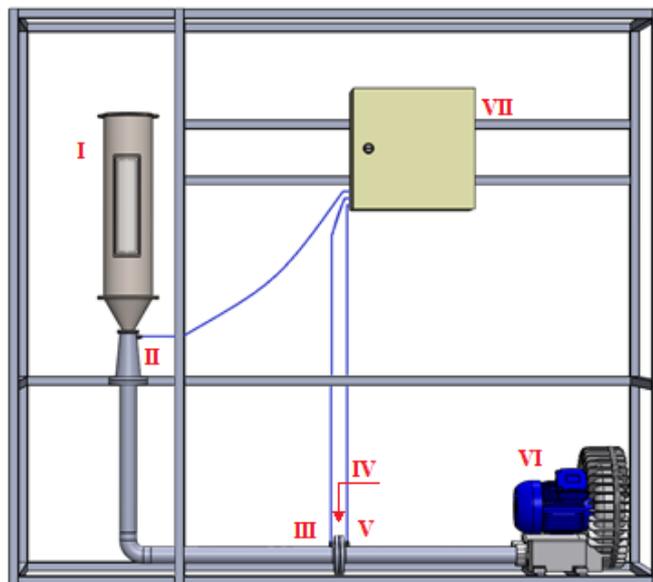


Figura 3.1. Unidade Experimental do Leito de Jorro.

A unidade experimental do leito de jorro mostrada na Figura 3.1 é constituída de: um leito de jorro cilíndrico de base cônica (cujas dimensões estão representadas na Figura 3.2), confeccionado em aço inox e contendo uma parede frontal de vidro transparente, permitindo a observação do escoamento das partículas em seu interior (item I); um ponto de aquisição de

pressão manométrica na entrada do leito de jorro com engate rápido rosqueado por conector pneumático (item II); placa de orifício (item IV) com tomadas de pressão a montante (item III) e a jusante (item V) da placa, também com engates rápidos rosqueados por conector pneumático; um motor soprador radial de 4,0 cv de potência, trifásico de baixa rotação (item VI); e, um sistema de automação constituído de uma placa Arduino UNO, para o controle da unidade, com resolução de entrada de 10 *bit* e saída de 8 *bit*, um inversor de frequência WEG CFW-500 de 5 cv, três sensores de pressão e um sensor de temperatura (item VII).

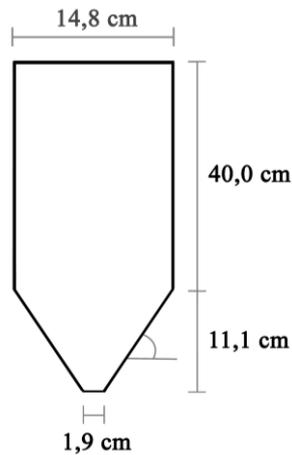


Figura 3.2. Dimensões do Leito de Jorro.

A placa Arduino Uno foi utilizada para a aquisição de dados de pressão manométrica e de temperatura na entrada do leito e para o controle da velocidade do ar. O controle da velocidade do ar na entrada do leito de jorro, via Arduino, foi realizado da seguinte forma: os sinais analógicos, provenientes dos sensores de pressão a montante e a jusante da placa de orifício, foram lidos e convertidos pela placa Arduino em sinais digitais e enviados ao computador para, com os sinais já digitalizados, realizar os cálculos necessários de controle com o auxílio de um *sketch* ou programa, escrito aqui em linguagem C++; os resultados dos cálculos, com base nas equações de calibração da placa de orifício e dos sensores aqui obtidas, foram reconvertidos em sinais analógicos e enviados ao inversor de frequências, o qual funciona como um atuador, aumentando ou diminuindo a frequência de rotação do motor e, conseqüentemente, controlando a velocidade do ar na entrada do leito. Todo este processo era repetido 100 vezes a cada segundo, ou seja, com uma frequência de 100 Hz.

Logo, com este sistema, pôde-se controlar a velocidade de ar, com base no *setpoint* desejado, e obter as medidas de queda de pressão e temperatura na entrada do leito, assim como, determinar o tempo de mistura com uma satisfatória precisão.

O controle de velocidade do ar na entrada do leito foi realizado por meio de um Controlador Proporcional e Integral (PI), cuja implementação foi realizada, também, em linguagem C++. Todos os parâmetros do controlador PI, assim como todas as curvas de calibração dos sensores de pressão, temperatura, e da placa de orifício, foram ajustados experimentalmente.

### **3.2 Verificação da Concentração do Agente Aglutinante (Gelatina)**

Nos experimentos para a mistura e segregação de partículas, utilizou-se como agente aglutinante, a gelatina de origem suína, que foi fornecida pela empresa GELNEX (Nazário, GO - Brasil), possuindo alto teor de pureza.

Nos testes para a escolha da melhor concentração de gelatina, foram utilizadas diferentes concentrações em massa de gelatina em uma solução aquosa, tais como 9,0%, 11,5%, 14,5%, 18,0%, 21%, 23% e 28%, sendo avaliados os seguintes fatores:

- facilidade de percolação do material pelo leito de partículas;
- capacidade de endurecimento;
- tempo necessário para a solidificação do sistema;
- necessidade ou não de refrigeração;
- capacidade de aglomeração das partículas;
- facilidade e precisão de corte do sistema após o endurecimento.

Com base nestes fatores, a concentração de gelatina que apresentou os melhores resultados e que foi utilizada na investigação do fenômeno de mistura e segregação das partículas granulares, foi de 21% em massa. Nesta concentração, não houve a necessidade de refrigeração para atingir o ponto de solidificação, sendo que este aconteceu após um período de 4 horas em temperatura ambiente, e todas as características supracitadas foram satisfatórias.

### **3.3 Metodologia Experimental**

Para o estudo do fenômeno de segregação no interior de um leito de jorro, foram utilizados diferentes tipos de materiais particulados, compostos por: esferas de alta precisão de vidro, de poliacetal e de aço cromo, assim como, semiesferas de plástico. A caracterização das propriedades físicas das partículas, tais como, massa específica e porosidade do leito de

material, foram medidas por meio de picnômetria e teste de proveta, respectivamente. Os materiais particulados são apresentados na Figura 3.3, assim como suas propriedades físicas, estão dispostas na Tabela 3.1.



Figura 3.3. Sistema particulado utilizado: (a) esferas de vidro de 2 mm de diâmetro; (b) esferas de vidro de 4 mm de diâmetro; (c) esferas de vidro de 9 mm de diâmetro; (d) esferas de poliacetal de 4 mm de diâmetro; (e) esferas de aço cromo de 4 mm de diâmetro; (f) semiesferas de plástico de 4,69 mm de diâmetro volumétrico.

Tabela 3.1. Características físicas dos materiais particulados.

Material	Diâmetro (mm)	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	Porosidade
Vidro	2,00	2,52	0,38
Vidro	4,00	2,52	0,38
Vidro	9,00	2,52	0,41
Poliacetal	4,00	1,35	0,38
Aço cromo	4,00	7,86	0,37
Plástico	4,69*	1,23	0,35

\*Diâmetro volumétrico

No presente trabalho, foram analisados, tanto o efeito do equipamento em si, sobre o fenômeno de mistura e segregação de partículas, quanto os efeitos ocasionados pelas diferenças de forma, densidade e diâmetro das partículas.

Para a realização destes experimentos, os seis tipos de materiais particulados apresentados anteriormente na Tabela 3.1, foram combinados de forma a obter seis configurações diferentes de misturas binárias, com volumes iguais de cada componente (misturas equivolúmetricas). As composições destas misturas binárias, juntamente com os respectivos efeitos analisados e a velocidade de mínimo jorro característica de cada mistura ( $V_{mj}$ ), são apresentadas na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 Diferentes configurações de partículas utilizadas na avaliação do fenômeno de segregação em leito de jorro.

Configuração	Mistura binária		Efeito analisado	$V_{mj}$ (m/s)
<b>A</b>	Poliacetel	Poliacetel	Equipamento	32,0
<b>B</b>	Poliacetel	Plástico	Forma	33,0
<b>C</b>	Vidro-2 mm	Vidro-4 mm	Diâmetro	28,0
<b>D</b>	Vidro-2 mm	Vidro-9 mm	Diâmetro	28,0
<b>E</b>	Poliacetel	Vidro-4 mm	Densidade	39,0
<b>F</b>	Vidro-4 mm	Aço cromo	Densidade	125,0
<b>G</b>	Poliacetel	Aço cromo	Densidade	106,0

Na análise do efeito da geometria do equipamento sobre o fenômeno de segregação foi utilizada a Configuração A (Tabela 3.2), considerando apenas esferas de poliacetel, sendo metade delas pintadas na cor vermelha, e a outra metade na cor branca. Este experimento é considerado como o “branco” da análise, pois os seus resultados apresentam a segregação que ocorre exclusivamente devido à geometria do leito de jorro utilizado. Logo, qualquer efeito segregativo nas demais condições, será atribuído à diferença nas propriedades físicas das partículas.

Na Configuração B, as partículas de poliacetel e plástico se diferenciam em 8,63% em densidade e 17,25% em diâmetro volumétrico. Desta forma, foram desconsiderados, neste trabalho, qualquer influência do diâmetro e/ou densidade sobre o escoamento granular, sendo considerado apenas o efeito da diferença entre as formas das partículas, que possuem uma razão de aspecto de 2,0. Vale ressaltar que, devido as condições experimentais e orçamentais, esta foi a única combinação de sistema particulado que permitiu a análise da diferença de forma entre as partículas.

Nos experimentos para a análise do efeito do diâmetro, foram utilizadas razões de diâmetros de 2,0 e 4,5, sendo estas representadas pelas Configurações C e D, respectivamente (Tabela 3.2). Para a análise do efeito da densidade, razões de densidades de 1,9, 3,2 e 5,8, correspondentes às Configurações E, F e G, respectivamente, foram utilizadas.

No estudo da mistura e segregação de partículas em um leito de jorro, a metodologia proposta neste trabalho foi similar à metodologia proposta por Realpe *et al.* (2015), para tambores rotatórios. Esta metodologia se baseou na gelificação e corte do leito de partículas, com a utilização de uma solução aquosa de gelatina, a qual, após ser dispersa sobre o leito de partículas, possibilitou a análise quantitativa e qualitativa da distribuição radial e axial das concentrações dos sólidos de interesse. Desta forma, o fenômeno de segregação pôde ser analisado em toda a extensão do leito de partículas em estado estacionário, sem haver a perturbação da distribuição final do sistema particulado.

As etapas do procedimento experimental para a investigação dos efeitos do equipamento, do diâmetro e da densidade sobre a segregação das partículas, são descritas a seguir:

**Etapa 1.** Primeiramente, as partículas foram alimentadas no leito de jorro, de forma equivolúmica, com uma configuração inicial de alimentação lado-a-lado (totalmente segregado). Após isto, o leito foi colocado em operação por um período de 5 minutos. Este tempo de mistura foi estipulado com base em estudos preliminares, onde não se observou mais mudanças significativas. Vale ressaltar que, no intuito de evitar qualquer influência humana na realização dos experimentos, foram programadas rampas de velocidade de ar na entrada do leito de subida, até atingir o *setpoint* desejado, e de decida, até o desligamento do equipamento, após decorrido o tempo de mistura.

**Etapa 2.** Com a finalização do período de mistura no leito de jorro, este foi desconectado da unidade experimental, e a parte cônica do leito (local que contém todas as partículas) (Figura 3.4a) foi desparafusada da parte cilíndrica. Nesta etapa, a solução aquecida de gelatina preparada com concentração de 21% em massa, foi adicionada cuidadosamente sobre as partículas contidas na parte cônica, de forma a não causar perturbação no leito de material (Figura 3.4b).

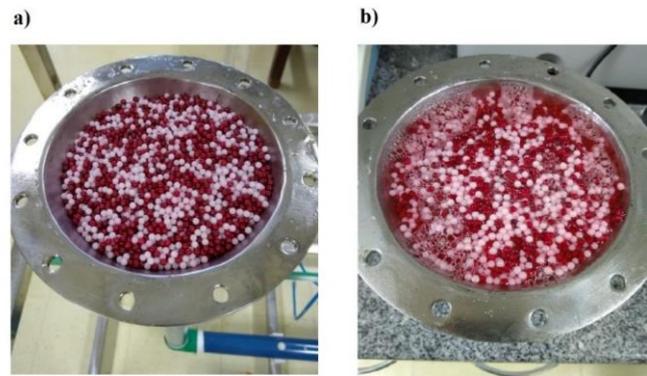


Figura 3.4. Exemplo do processo de adição da solução aquecida de gelatina (21% em massa) sobre o leito de material: a) região cônica do leito com partículas, b) leito com partículas após a adição da solução de gelatina.

Vale ressaltar que, a concentração ideal do agente aglutinante utilizado (gelatina), foi previamente obtida em testes experimentais preliminares, que são descritos em maiores detalhes anteriormente na seção 3.2.

Com a adição da gelatina, o sistema foi mantido em repouso, por um período superior a 4 horas. Após este período, a gelatina encontrou-se em fase sólida, podendo ser realizada a retirada do leito de partículas da região cônica do equipamento. Nesta etapa, o aquecimento da superfície externa do leito foi realizado, até que ocorresse o descolamento da gelatina nas laterais da região cônica e todas as partículas agregadas à gelatina fossem retiradas, com a formação de um cone de partículas (Figura 3.5). Após este processo, uma pequena quantidade de gelatina líquida, foi adicionada em toda a extensão do cone, de forma a manter a estabilidade das partículas na superfície, e então todo o sistema foi mantido em repouso novamente, por um período de uma hora.



Figura 3.5. Exemplo de um cone de partículas solidificado com a solução de gelatina. Imagem referente ao experimento de Configuração A (Tabela 3.2).

**Etapa 3.** Após todos os procedimentos anteriores, o sistema se encontrou apto para a retirada de amostras, onde foram realizados cortes longitudinais e verticais, padronizados. Os primeiros cortes foram efetuados longitudinalmente no leito de partículas, em cinco diferentes alturas:  $L_A$ ,  $L_B$ ,  $L_C$ ,  $L_D$  e  $L_E$  (Figura 3.6).

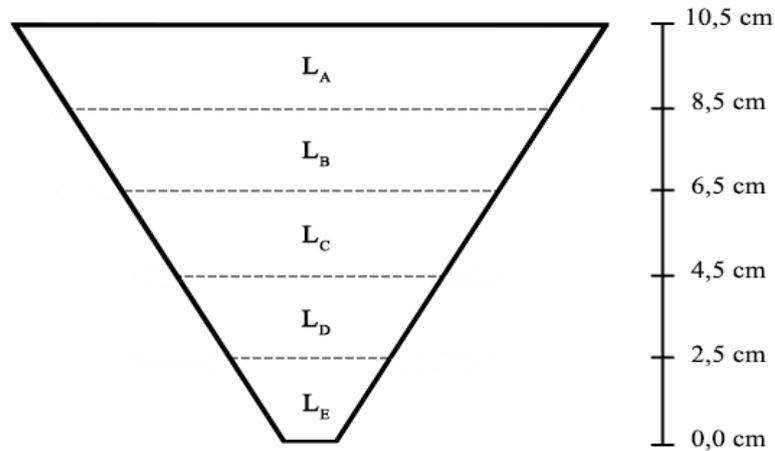


Figura 3.6. Exemplo de cortes longitudinais no leito de partículas.

Após se obter cada corte longitudinal, cada fatia foi dividida transversalmente de acordo com a Figura 3.7, com quatro cortes circulares verticais, gerando cinco regiões circulares (Figura 3.7a) e dois cortes retos verticais, gerando quatro pedaços de um quarto de círculo (Figura 3.7b). Vale ressaltar que, no Corte  $L_E$ , não foram realizadas nenhuma divisão, sendo considerado uma amostra unitária.

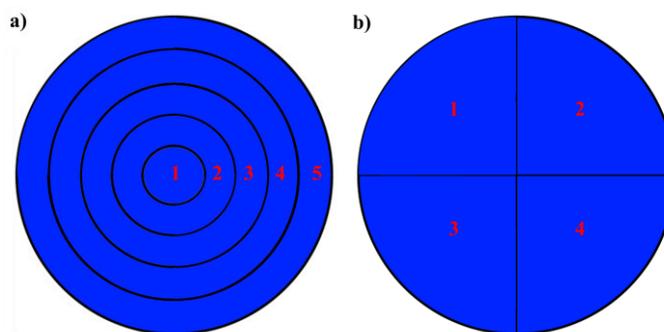


Figura 3.7. Exemplo de cortes efetuados para a obtenção de amostras: (a) Cortes verticais circulares; (b) Cortes verticais lineares.

Um exemplo completo de todas as divisões, em uma única fatia, com a respectiva nomenclatura utilizada na demarcação de cada amostra (por exemplo, nos índices RA1, RA2,1, RA2,2, RB1,1, RB2,2 etc., onde o subscrito “A” significa Corte  $L_A$ , e assim por diante), é

apresentado na Figura 3.8. Desta forma, foram coletadas 57 amostras do cone de partículas, para cada condição experimental.

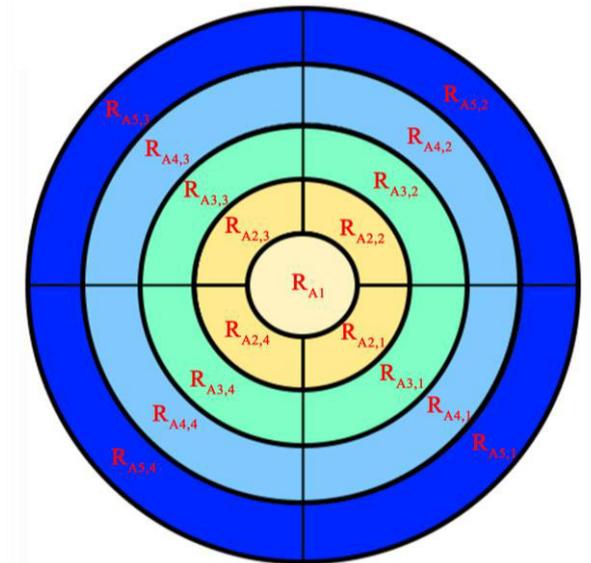


Figura 3.8. Exemplo de todos os cortes efetuados na obtenção de amostras e a respectiva nomenclatura adota.

**Etapa 4.** Com todos os cortes efetuados, foi realizada a lavagem e a secagem, em uma estufa por 24 horas, de cada amostra, para a retirada da gelatina. As partículas foram então separadas e cada componente da mistura foi pesado, separadamente. Com os valores da fração mássica de cada amostra, foi possível a análise qualitativa da segregação com a construção de gráficos de distribuição de frações volumétricas ao longo da direção longitudinal do leito de material, assim como, a análise quantitativa da segregação por meio do cálculo dos índices de segregação, radial e axial.

No cálculo da fração volumétrica ( $\alpha_s$ ), foi utilizado o volume do componente com maior esfericidade, diâmetro ou densidade como a base de cálculo. Na obtenção do volume para cada componente, foi considerado apenas o volume efetivo ocupado pelas partículas, desconsiderado os espaços advindos dos interstícios gerados no empacotamento do leito. Desta forma, a fração volumétrica para cada amostra foi calculada com a Equação 3.1:

$$\alpha_s = \frac{m_1/\rho_1}{m_1/\rho_1 + m_2/\rho_2} \quad (3.1)$$

sendo  $\alpha_s$  a fração volumétrica, m a massa de cada componente da mistura binária em uma determinada amostra (massa obtida na Etapa 4 da metodologia experimental),  $\rho$  a densidade de cada componente da mistura binária, o subscrito 1 refere-se ao componente de maior diâmetro/densidade/esfericidade em uma determinada amostra, e o subscrito 2 refere-se ao componente de menor diâmetro/densidade/esfericidade em uma determinada amostra.

Os índices de segregação são comumente utilizados para quantificar a homogeneidade de um leito de mistura de partículas sólidas, descrevendo o grau de mistura ou de segregação. No presente trabalho, foram utilizados dois diferentes índices de segregação. Para o cálculo do índice de segregação radial, foi utilizado o índice apresentado na Equação 2.3, modificado, aqui, por meio da Equação 3.2, sendo, agora,  $\alpha_s$  e  $\bar{\alpha}_s$  a concentração volumétrica de partículas de maior diâmetro/densidade/esfericidade em cada amostra (posição) presente em uma determinada fatia ( $L_A$ ,  $L_B$ , etc.), e a média da concentração volumétrica de partículas de maior diâmetro/densidade/esfericidade na correspondente fatia ( $L_A$ ,  $L_B$ , etc.), respectivamente.

$$I_r = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\alpha_s - \bar{\alpha}_s)^2}{N-1}} \quad (3.2)$$

Já na análise da segregação axial, foi utilizada uma derivação do índice de mistura apresentada na Equação 2.2 e reescrita novamente a seguir por meio da Equação 3.3.

$$I_a = \frac{\alpha_i}{\alpha_o} \quad (3.3)$$

sendo  $\alpha_i$  a fração volumétrica final das partículas de maior diâmetro/densidade/esfericidade em uma determinada fatia ou posição axial  $i$  (Cortes  $L_A$ ,  $L_B$ ,  $L_C$ ,  $L_D$  e  $L_E$  na Figura 3.5), e  $\alpha_o$  a fração volumétrica inicial das partículas de maior diâmetro/densidade/esfericidade em todo o leito.

Foi analisado, também neste trabalho, o efeito da distribuição inicial de partículas (tipo de alimentação) no interior do leito de jorro sobre o processo de mistura. Para tanto, foram escolhidas as piores condições de mistura, dentre as promovidas pelas diferenças no diâmetro das partículas e nas diferenças de densidade, obtidas das análises descritas anteriormente. Também foram verificados os efeitos combinados da distribuição inicial de partículas no interior do leito e da forma das partículas na segregação. Nestes casos, foram utilizadas três

diferentes configurações de alimentação inicial, apresentadas na Figura 3.9. Vale ressaltar que, na Figura 3.9, a região sombreada mais escura sempre foi ocupada pelas partículas mais densas (efeito de densidade), maiores (efeito de diâmetro) e mais esféricas (efeito da forma).

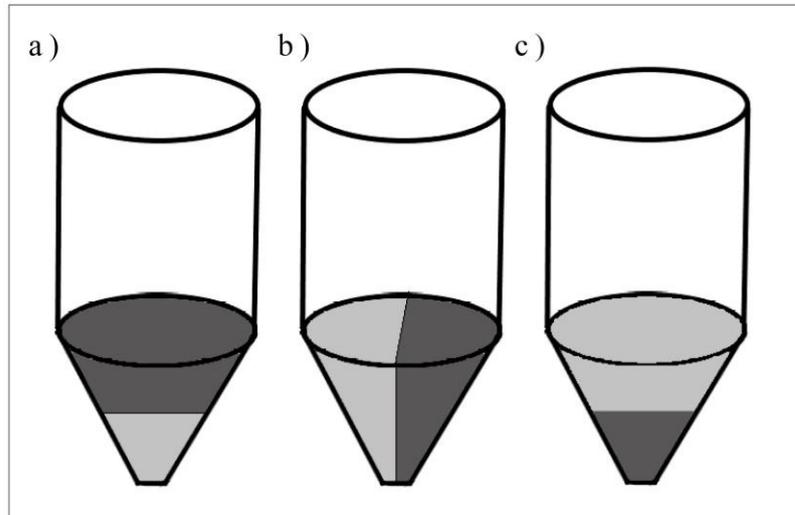


Figura 3.9. Diferentes configurações de alimentação inicial a serem investigadas em um leito de jorro: a) Configuração 1 – partículas distribuídas de forma sobrepostas, com as partículas de maior diâmetro/densidade/esfericidade alocadas na parte superior; b) Configuração 2 – partículas distribuídas lado a lado; c) Configuração 3 – partículas distribuídas de forma sobreposta, com as partículas de menor diâmetro/densidade/esfericidade na parte superior.

A alimentação de Configuração 2, lado a lado, foi realizada com o auxílio de uma “pá”, que foi previamente colocada dentro do leito, de forma a dividi-lo verticalmente em duas partes de mesmo volume (Figura 3.10). Após a alimentação do leito com as partículas, e a subsequente retirada da “pá”, foi obtida uma divisão equivolumétrica, como a ilustrada na Figura 3.11.



Figura 3.10. “Pá” utilizada para auxiliar na alimentação da Configuração 2 (lado-a-lado).



Figura 3.11. Vista superior do leito de partículas, exemplificando a alimentação de Configuração 2 (lado-a-lado).

Vale ressaltar que, os experimentos de Configuração B, C, D, E, F e G, foram realizados em uma primeira análise, apenas com a distribuição inicial de partículas de Configuração 2 (lado-a-lado), pois, mantendo-se fixa a alimentação, pôde-se comparar os demais efeitos.

Todos os experimentos descritos acima, foram realizados com uma composição equivolúmica dos dois componentes da mistura binária, com uma altura de leito estático de 10,5 cm e a velocidade de gás de arraste 20% superior à velocidade de mínimo jorro.

Por fim, foi realizada a análise do efeito da variação da velocidade de gás de arraste no sistema. Nesta etapa, a condição que apresentou maior efeito segregativo dos experimentos realizados na investigação da influência da condição inicial de partículas (efeito da alimentação inicial), foi analisada sob diferentes valores de velocidade de entrada de ar, sendo estes de 20%, 40% e 60% acima da velocidade de mínimo jorro para a mistura considerada. Vale ressaltar que, para avaliar uma possível interação entre a velocidade do ar e as diferentes condições de alimentação, cada condição de velocidade foi realizada sob as três diferentes condições iniciais de alimentação inicial, Configurações 1, 2 e 3, como apresentadas anteriormente na Figura 3.9.

---

---

# CAPÍTULO 4

---

## Resultados e Discussão

Este tópico tem por objetivo apresentar e discutir os resultados relativos aos experimentos realizados na análise do fenômeno de mistura e segregação em um leito de jorro cônico. Serão apresentados, tanto os resultados da análise qualitativa da distribuição das frações volumétricas em diferentes posições do leito de partículas, quanto os resultados da análise quantitativa, por meio da distribuição longitudinal dos índices de segregação axial e radial, para todos os efeitos analisados sobre a segregação, sendo eles: o efeito da geometria do equipamento, das características físicas do sistema particulado (forma, diâmetro e densidade das partículas), assim como, o efeito da distribuição inicial das partículas e da velocidade superficial de gás de entrada.

### 4.1. Análise do Efeito do Equipamento

Com o intuito de analisar o efeito da geometria do equipamento sobre o processo de segregação, considerado-o como o “branco” da análise, foi utilizada a Configuração A (Tabela 3.2), composta por partículas de poliacetal, com proporções iguais de partículas pintadas de cor vermelha e de cor branca. Todos os experimentos foram realizados em triplicata, e com uma alimentação inicial do tipo lado-a-lado (Configuração 2).

Os resultados médios da distribuição radial da fração volumétrica de poliacetal em diferentes posições longitudinais do leito de jorro e os valores médios dos índices de segregação radial e axial, são apresentados na Figura 4.1. As partículas pintadas de vermelho foram tomadas como referência para os cálculos da fração volumétrica e dos índices de segregação.

Como evidenciado na Figura 4.1, independentemente da posição longitudinal do leito de jorro, o sistema atingiu uma condição de mistura randômica, cuja fração volumétrica final, em qualquer posição transversal, foi aproximadamente igual à fração volumétrica inicial de alimentação ( $\alpha_s = 0,5$ ).

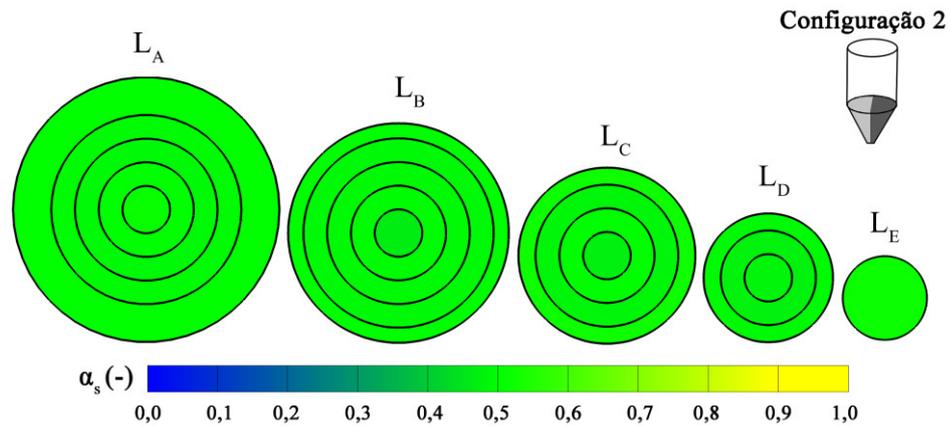


Figura 4.1. Distribuição da fração volumétrica de sólidos ao longo de diferentes posições longitudinais do leito de partículas para a Configuração A (partículas idênticas). Considerando como base de cálculo as partículas de poliacetal pintadas de vermelho.

O comportamento apresentado na Figura 4.1, pode ser melhor observado por meio da análise dos valores médios dos índices de segregação radial e axial, apresentados na Figura 4.2.

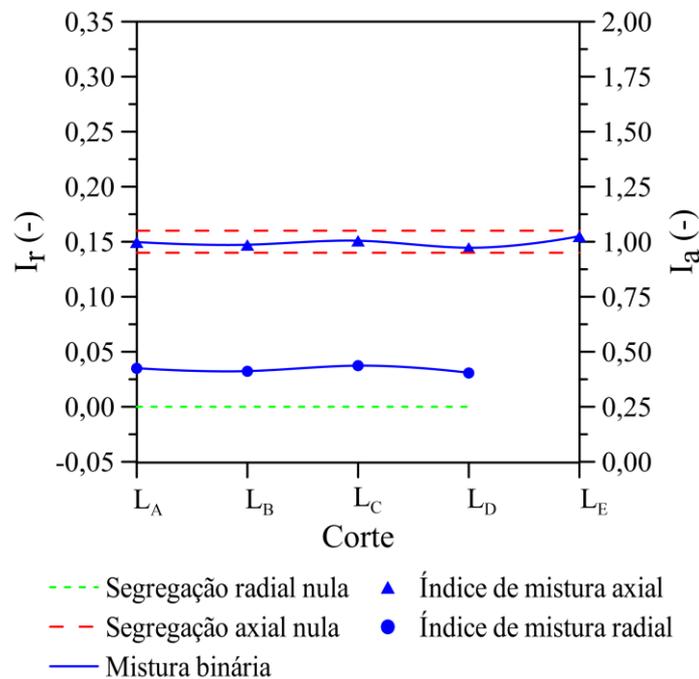


Figura 4.2. Índices de segregação radial e axial ao longo de diferentes posições longitudinais do leito de partículas para a Configuração A (partículas idênticas).

Pode-se notar, por meio da Figura 4.2, que os valores para o índice de segregação axial ( $I_a$ ) se encontraram entre os valores de 0,95 e 1,05, para todas as posições longitudinais

analisadas, caracterizando a ausência de segregação axial das partículas (Olazar *et al.*, 1993). Por outro lado, como esperado, os índices de segregação radial mostraram-se aproximadamente constantes e maiores do que zero, divergindo entre 3,1% a 3,7% do valor referido para uma mistura perfeita, ou seja,  $I_r = 0$ . Vale ressaltar que, uma mistura perfeita é apenas uma idealização para fins de cálculo de eficiência de mistura (FITZPATRICK, 2009).

Desta forma, a curva de distribuição dos valores do índice de segregação radial em diferentes posições do leito de partículas, apresentada na Figura 4.2, foi considerada, neste trabalho, como os valores de referência para a segregação radial nula no leito de jorro em estudo (efeito do equipamento), e qualquer desvio dessa curva será promovido exclusivamente pela diferença de propriedades físicas entre as partículas, ou pela condição inicial de alimentação. Já no caso do índice de mistura axial, os valores médios obtidos estão dentro dos limites estabelecidos na literatura (entre 0,95 e 1,05), sendo estes, então, mantidos para os valores de segregação axial nula.

Vale ressaltar que, todas as figuras referentes aos índices de segregação no decorrer das próximas seções, tiveram os valores de referência para a segregação radial nula, alterados para os valores da curva de referência obtidos na presente seção, e que, os valores de referência para o índice de segregação axial, foram mantidos conforme à literatura.

### **4.2 Análise do Efeito da Forma das Partículas**

Para a análise do efeito da forma da partícula sobre o processo segregativo, foi empregada a Configuração B (Tabela 3.2), a qual é composta por partículas esféricas de poliacetal e semiesféricas de plástico, cujas razões de aspecto são de 1,0 e 2,0, respectivamente.

A Figura 4.3 apresenta a distribuição radial das frações volumétricas de poliacetal em diferentes posições do leito de jorro para a Configuração B. As partículas de poliacetal (partículas esféricas), foram considerados como referência para os cálculos da fração volumétrica e dos os índices de segregação.

Na Figura 4.3, as partículas se distribuíram uniformemente ao longo das direções radial e axial. De forma similar ao que aconteceu na análise anterior do efeito do equipamento, o valor da fração volumétrica final, em qualquer posição, foi aproximadamente igual à fração volumétrica inicial de partículas na mistura ( $\alpha_s = 0,5$ ).

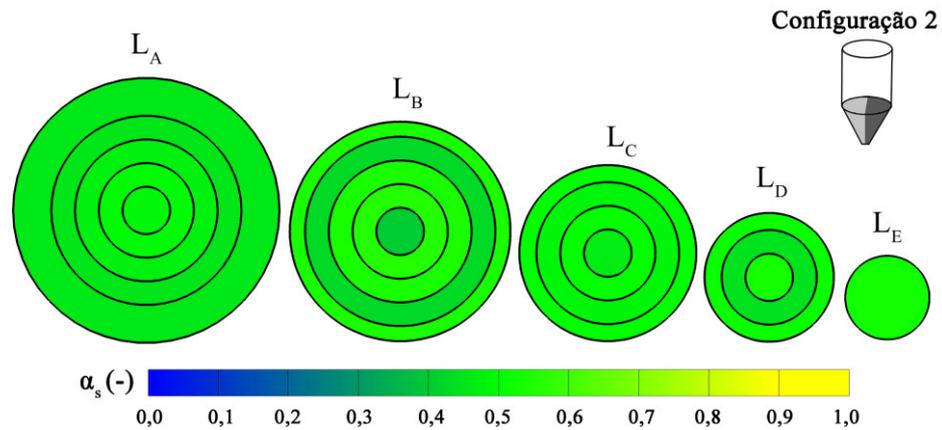


Figura 4.3. Distribuição da fração volumétrica de sólidos ao longo de diferentes posições longitudinais do leito de partículas para a Configuração B (razão de aspecto = 2,0). Considerando como base de cálculo as partículas de poliacetal.

As distribuições longitudinais dos índices radial e axial, para a análise da forma da partícula, são mostradas na Figura 4.4.

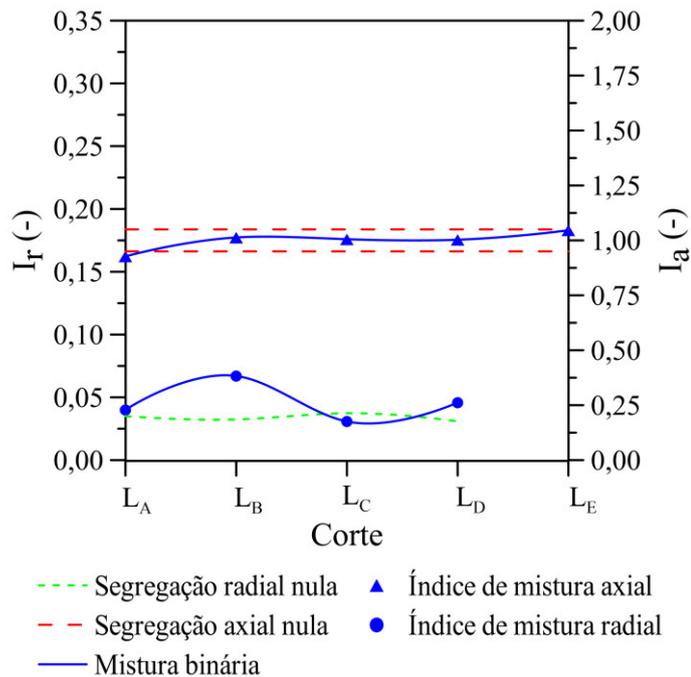


Figura 4.4. Índices de segregação radial e axial ao longo de diferentes posições longitudinais do leito de partículas para a Configuração B (razão de aspecto = 2,0).

A modificação da razão de aspecto por um fator de dois, não causou efeitos significativos de segregação, sendo observada, apenas, uma ligeira alteração no índice de

segregação radial (Figura 4.4). Desta forma, a mistura se comportou como um sistema composto por monopartículas, visto que não houveram diferenças significativas na dinâmica das diferentes partículas no interior do leito, embora experimentos adicionais, envolvendo partículas de formas diversas, sejam necessários para explorar estes resultados.

### 4.3 Análise do Efeito do Diâmetro das Partículas

As Configurações C e D (Tabela 2), compostas por partículas de vidro com razões de diâmetros de 2,0 e 4,5, respectivamente, foram empregadas no estudo do efeito do diâmetro sobre o processo de mistura no interior de um leito de jorro. Ambos os experimentos foram realizados com a Configuração 2 de alimentação (lado-a-lado). Os resultados da distribuição radial das frações volumétricas, ao longo de diferentes posições longitudinais no leito, são apresentados na Figura 4.5, para as Configurações C e D. Nos cálculos das frações volumétricas e dos índices de segregação, as partículas maiores de cada uma das misturas binárias (vidro de 4 mm na Configuração C, e vidro de 9 mm na Configuração D) foram utilizadas como referência.

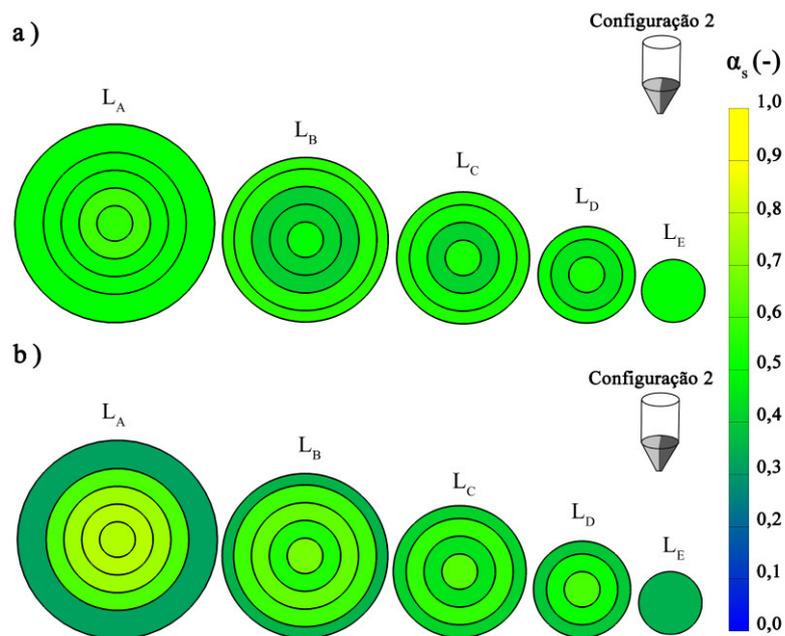


Figura 4.5. Distribuição da fração volumétrica de sólidos ao longo de diferentes posições longitudinais do leito de partículas: (a) Configuração C (razão de diâmetro = 2,0); (b) Configuração D (razão de diâmetro = 4,5). Considerando como base de cálculo as partículas de vidro de 4 mm em (a) e as partículas de vidro de 9 mm em (b).

Na Figura (4.5a), foi observado que, para a Configuração C o processo de mistura resultou em uma distribuição radial e axial de fração de sólidos praticamente uniforme.

Já na Figura (4.5b), observou-se nitidamente o efeito da segregação radial no sistema (Configuração D), em que as partículas de maior diâmetro (vidro de 9 mm) tenderam a se concentrar na região central, enquanto que as partículas de menor diâmetro (vidro de 2 mm) se moveram para a região anular, próximas à parede do equipamento, longitudinalmente entre os Cortes  $L_A$  e  $L_D$  no leito de material. Pode-se observar, também, uma tendência à segregação axial na base do leito de material (Corte  $L_E$ , na Figura 4.5b), onde têm-se uma maior concentração de vidro de 2 mm.

Os resultados das respectivas distribuições dos índices de segregação são mostrados na Figura 4.6a, para a Configuração C, e Figura 4.6b, para a Configuração D.

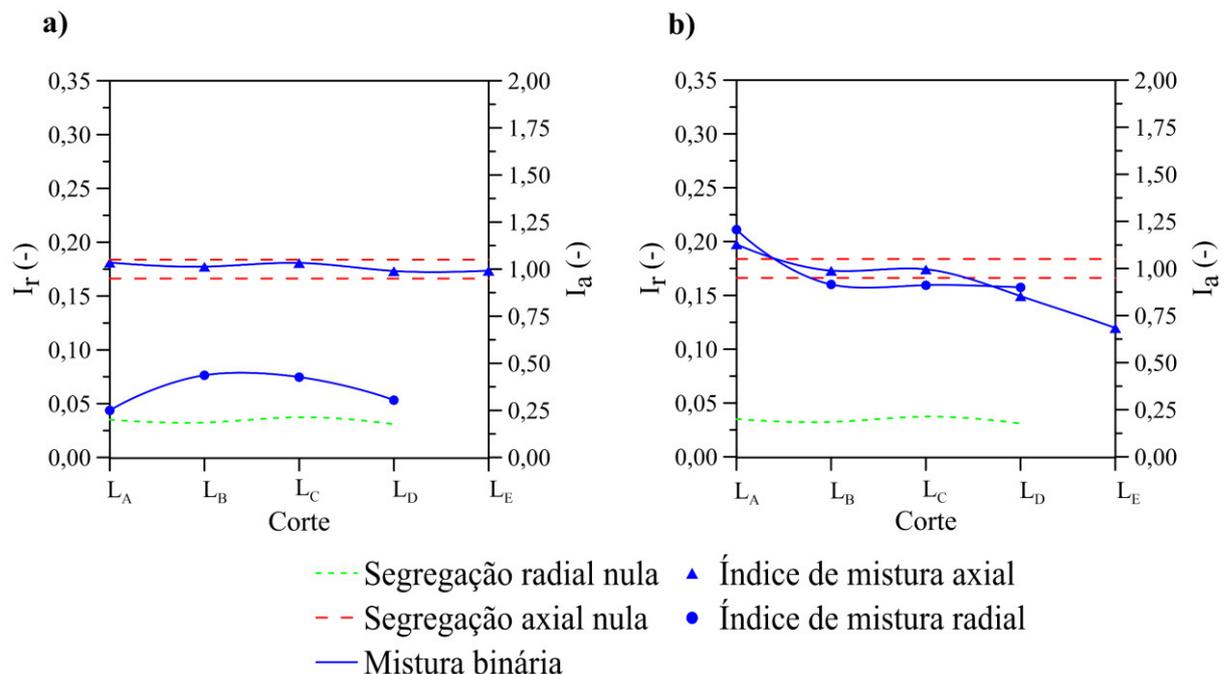


Figura 4.6. Índices de segregação radial e axial ao longo de diferentes posições longitudinais do leito de partículas: (a) Configuração C (razão de diâmetro = 2,0); (b) Configuração D (razão de diâmetro = 4,5).

Na Configuração C (Figura 4.6a), os valores para o índice axial se encontraram dentro do limite para a segregação axial nula, enquanto que, para o índice radial, os valores se mostraram ligeiramente acima da condição de segregação radial nula. Com relação à Configuração D (Figura 4.6b), os índices radiais de segregação foram elevados, e a segregação

axial foi observada apenas no fundo do leito de partículas (Corte  $L_E$ ). Os resultados das distribuições dos índices de segregação foram coerentes com os apresentados para a distribuição das frações volumétricas na Figura 4.5.

O comportamento segregativo das partículas na Configuração D, foi condizente com os resultados apresentados por Picinini *et al.* (1977), que estudaram de forma qualitativa a segregação em um leito de jorro meia-cana com partículas de vidro de diferentes diâmetros, e por Santos *et al.* (2015), que estudaram a segregação axial em um leito de jorro cônico-cilíndrico com partículas de vidro com razão de diâmetro de 4. Nestes estudos, foi concluído que o comportamento segregativo entre partículas de diferentes diâmetros foi ocasionado devido as partículas de maior diâmetro não serem arrastadas por grandes distâncias pelo fluido de arraste, caindo imediatamente ao longo da parte mais interna da região anular e tendo seu fluxo mais contido na região superior do leito de partículas, ao contrário das partículas de menor diâmetro, que foram arrastadas a maiores distâncias na região da fonte, caindo próximas às paredes do leito e circulando preferencialmente na região anular. Esta diferença entre os caminhos percorridos pelas partículas ao longo do leito, ocasionou o surgimento de diferentes concentrações de partículas de maiores diâmetros, longitudinalmente na região superior e radialmente na região central do leito.

Resultados diferentes com relação à concentração de partícula no fundo do leito foram obtidos por Moliner *et al.* (2019), que investigaram a influência de sistemas particulados com razões de diâmetros de 2,7 e 4,0, na segregação, em que, as partículas de maior diâmetro se acumularam na base do leito de partículas.

Fisicamente, a segregação em sistemas com diferentes diâmetros pode ser melhor explicada devido à combinação entre o mecanismo de segregação por percolação, em que as partículas de menor diâmetro percolam nos interstícios da matriz das partículas de maior diâmetro, e pelo mecanismo de segregação por impacto, que ocorre devido as colisões de diferentes partículas na região da fonte, que causam, uma menor velocidade radial às partículas maiores. A força de arrasto também possui um importante papel na dinâmica das partículas, atuando com maior magnitude nas partículas de menor diâmetro (SAN JOSÉ *et al.*, 1994; AMENÁBAR, 2009; DALEFFE *et al.*, 2008; PERRY, 2008).

Devido a estes fatores, a segregação na Configuração D foi mais pronunciada, pois a porosidade do leito empacotado de partículas de vidro de 9 mm é maior (porosidade = 0,41) e

seu diâmetro é 4,5 vezes maior do que o diâmetro das partículas de vidro de 2 mm (porosidade = 0,38), causando uma percolação mais acentuada das partículas de vidro de 2 mm nos interstícios das partículas de vidro de 9 mm. Uma maior velocidade também foi atribuída às partículas de vidro de 2 mm devido à força de arrasto e as colisões na região da fonte (percorrendo maiores distâncias radiais).

Com relação à Configuração C, as porosidades do leito empacotado das partículas de vidro de 2 mm e vidro de 4 mm são iguais e a diferença entre os diâmetros das partículas é pequena, não sendo, desta forma, afetada pelos mecanismos de percolação ou por impacto. Nos estudos de Olazar *et al.* (1993), foi apresentado que misturas binárias de partículas apresentaram efeitos insignificantes de segregação quando estas possuem razões de diâmetro menores do que 4.

#### 4.4 Análise do Efeito da Densidade

Na investigação do efeito da densidade das partículas sobre o fenômeno de mistura e segregação, os experimentos anteriormente apresentados na Tabela 2, com Configurações E, F e G, com razões de densidade de 1,9, 3,1 e 5,8, respectivamente, foram realizados.

Os resultados da distribuição da fração volumétrica para os experimentos de Configurações E, F e G, são apresentados na Figura 4.7. Neste caso, as partículas com maiores densidades para cada sistema binário (partículas de vidro de 4 mm na Configuração E, e partículas de aço cromo nas Configurações F e G) foram utilizadas como referência para os cálculos da fração volumétrica e para os cálculos dos índices de segregação.

Na Figura 4.7, pode-se observar que à medida que a razão de densidades aumenta, tanto a segregação radial, quanto a segregação axial, se tornaram mais pronunciadas no sistema (SAN JOSÉ *et al.*, 2013; MOLINER *et al.*, 2019). O comportamento foi similar ao apresentado para os sistemas com diferenças de diâmetro (ver seção 4.1.3), porém, no presente caso, as partículas menos densas se concentraram na região anular (próximas a parede do leito), e as partículas mais densas se concentraram preferencialmente na região central do leito.

Segundo Al-Juwaya *et al.* (2019), este comportamento foi evidenciado devido à elevada diferença de densidade entre as partículas, em que as colisões entre as duas fases na região da fonte resulta em uma maior deflexão radial das partículas menos densas, e, conseqüentemente, estas foram espalhadas em maiores distâncias ao longo da direção radial do que as partículas

mais densas, se acumulando preferencialmente na região anular. Este comportamento ocorreu devido ao mecanismo de segregação por impacto na região da fonte, e também pela combinação entre a força de arrasto e o empuxo que agem nas regiões de jorro e anular, respectivamente. A força de arrasto é elevada na região de jorro, sendo mais pronunciada em partículas com menor densidade, causando seu maior deslocamento, já na região anular, próximo ao fundo do equipamento, o fluido de arraste causa o cisalhamento das partículas, e estas, se deslocam por difusão para as regiões próximas à parede do equipamento devido ao empuxo, causando a segregação do material particulado (AMENÁBAR, 2009; EPSTEIN e GRACE, 2010; TRIPATHI *et al.*, 2013).

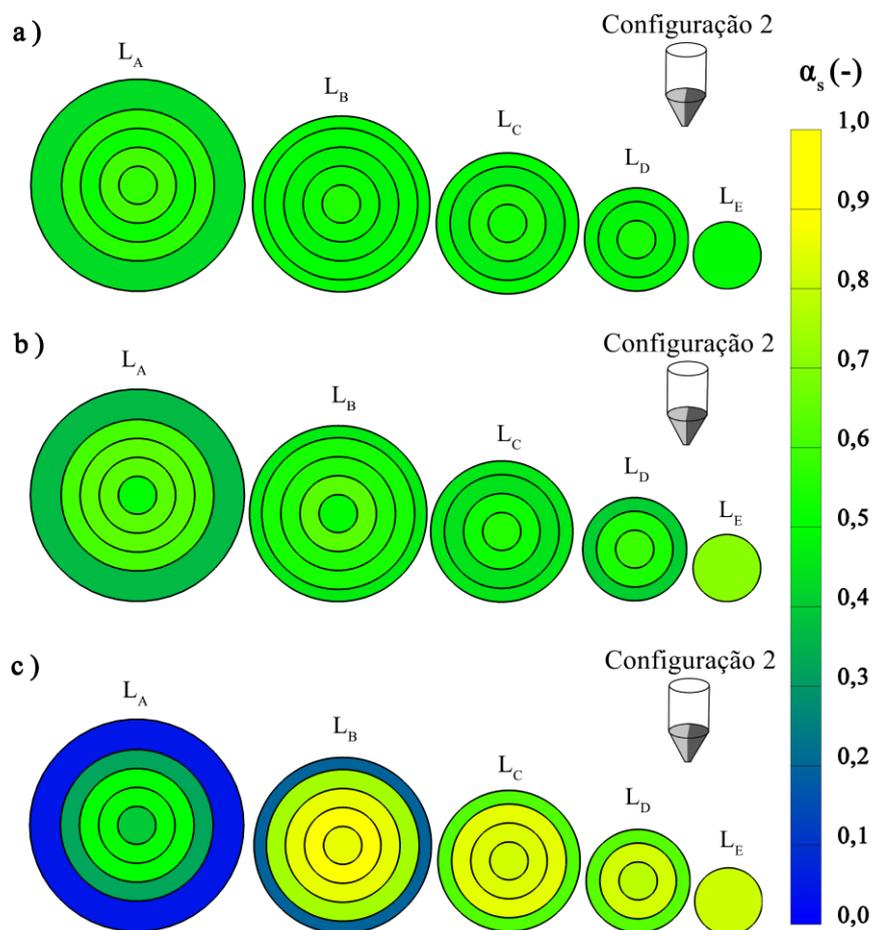


Figura 4.7. Distribuição da fração volumétrica de sólidos ao longo de diferentes posições longitudinais do leito de partículas: (a) Configuração E (razão de densidade = 1,9); (b) Configuração F (razão de densidade = 3,1); (c) Configuração G (razão de densidade = 5,8). Considerando como base de cálculo as partículas de vidro de 4 mm em (a) e as partículas de aço cromo em (b) e (c).

Os valores quantitativos dos índices de segregação axial e radial para os experimentos de Configuração E, F e G, são apresentados na Figura 4.8.

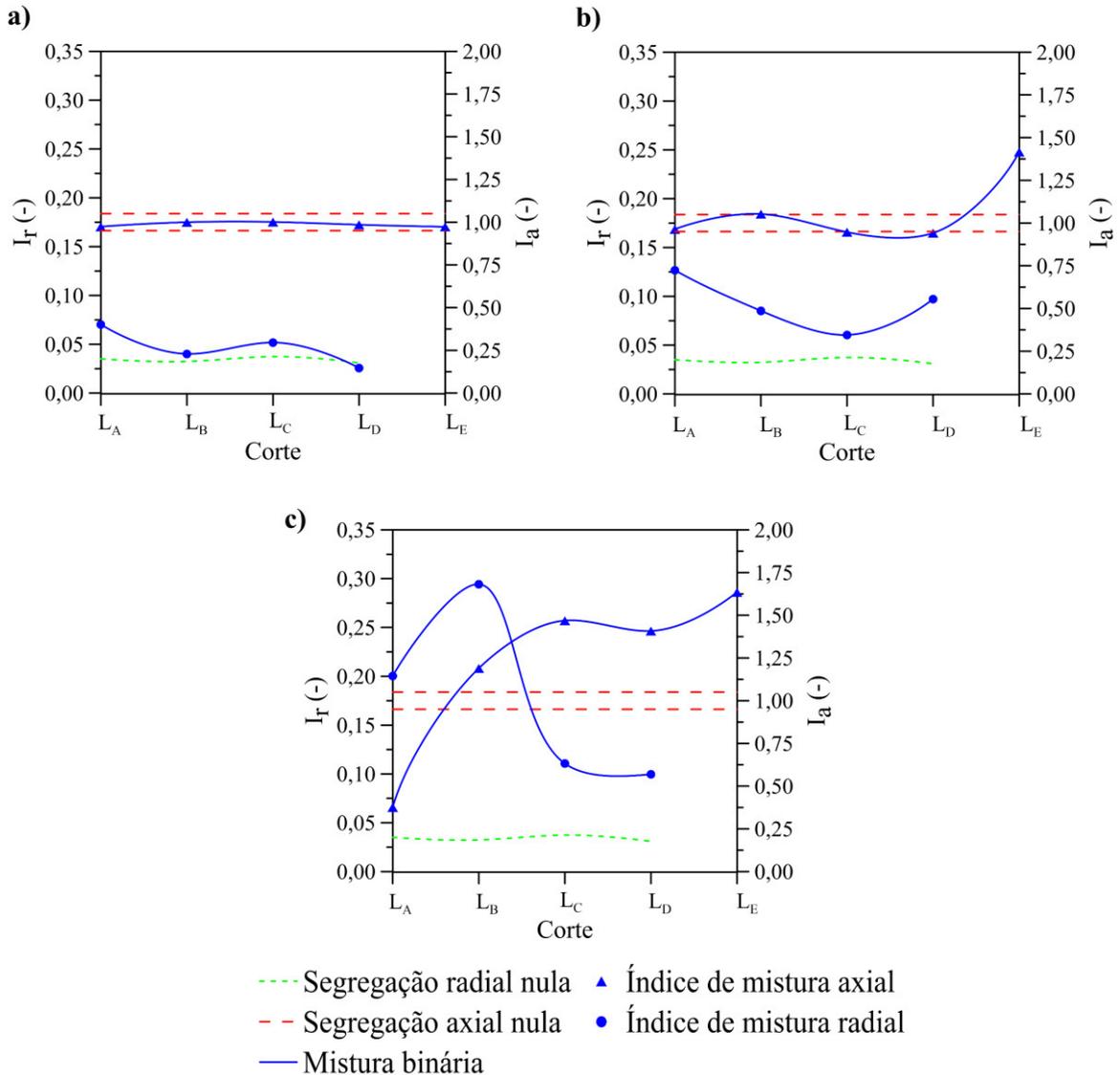


Figura 4.8. Índices de segregação radial e axial ao longo de diferentes posições longitudinais do leito de partículas: (a) Configuração E (razão de densidade = 1,9); (b) Configuração F (razão de densidade = 3,1); (c) Configuração G (razão de densidade = 5,8).

Os resultados quantitativos apresentados na Figura 4.8, estão de acordo com o comportamento apresentados na Figura 4.7 para a distribuição da fração volumétrica, variando de uma condição de mistura aproximadamente randômica (Configuração E na Figura 4.8a), para um estado evidente de segregação axial e radial (Configuração G na Figura 4.12c).

Os autores Piccinini *et al.* (1977) e Bridgwater e Cook (1978), investigaram a dinâmica de sistemas binários compostos por vidro e aço cromo, e sementes de mostarda e esferas de vidro, respectivamente, em que obtiveram resultados similares com relação a distribuição radial do sistema particulado. Porém, com relação à distribuição axial, nos resultados aqui encontrados, as partículas mais densas se concentraram na região da base do leito de partículas (Figuras 4.8b e 4.8c), fato observado também por Piccinini *et al.* (1997), mas, contraditório aos estudos de Bridgwater e Cook (1978).

### 4.5 Análise do Efeito da Alimentação

A análise da influência da configuração inicial das partículas no interior do leito de jorro sobre a dinâmica do processo de mistura, foi realizada considerando os sistemas que apresentaram os maiores graus de segregação, dentre os efeitos do diâmetro e da densidade das partículas anteriormente analisados. O efeito da alimentação inicial, combinado com o efeito da forma das partículas, também foi analisado. Desta forma, com base nas discussões anteriores, as Configurações B, D e G apresentadas anteriormente na Tabela 2, foram combinadas com as diferentes alimentações de Configurações 1, 2, e 3 (Figura 3.9).

O primeiro experimento a ser realizado na análise do efeito da alimentação sobre a segregação, foi o experimento de Configuração B, composto por partículas de poliacetal e plástico, cujos resultados da distribuição da fração volumétrica ao longo do leito de partículas (tendo como base de cálculo as partículas de poliacetal), e dos índices de segregação radial e axial, são apresentados na Figura 4.9 e Figura 4.10, respectivamente.

Como pode se observar nestas figuras, a modificação na forma de alimentação inicial no sistema, não alterou a dinâmica das partículas no interior do leito de jorro para uma mistura binária com razão de aspecto igual a 2,0 (Configuração B), sendo que a mistura continuou sendo aproximadamente randômica, nas direções axiais e radiais, independentemente da distribuição inicial da mistura binária no equipamento.

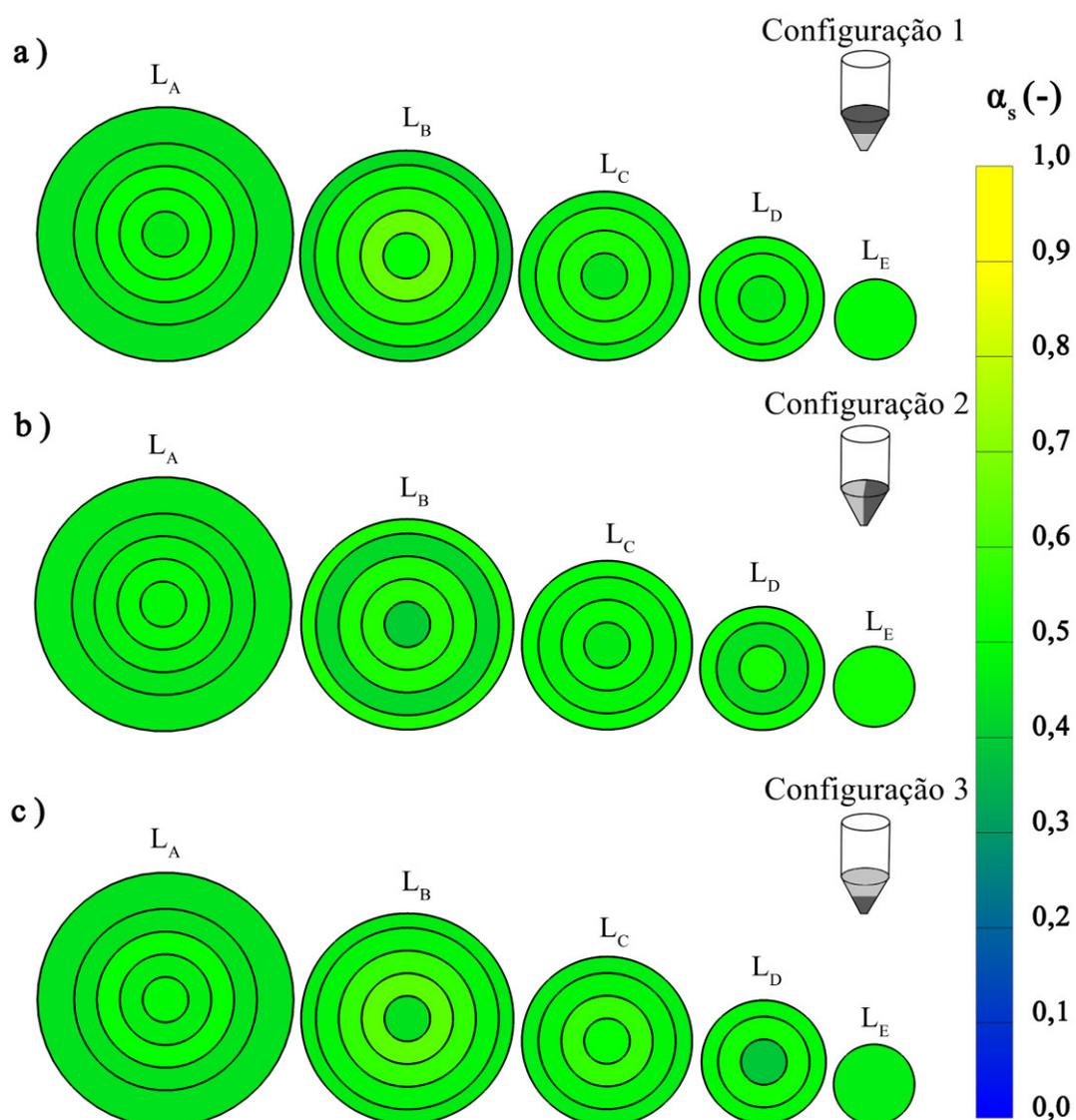


Figura 4.9. Distribuição da fração volumétrica de sólidos ao longo de diferentes posições longitudinais do leito de partículas para a Configuração B (razão de aspecto = 2,0): (a) Configuração 1; (b) Configuração 2; (c) Configuração 3. Considerando como base de cálculo as partículas de poliacetal.

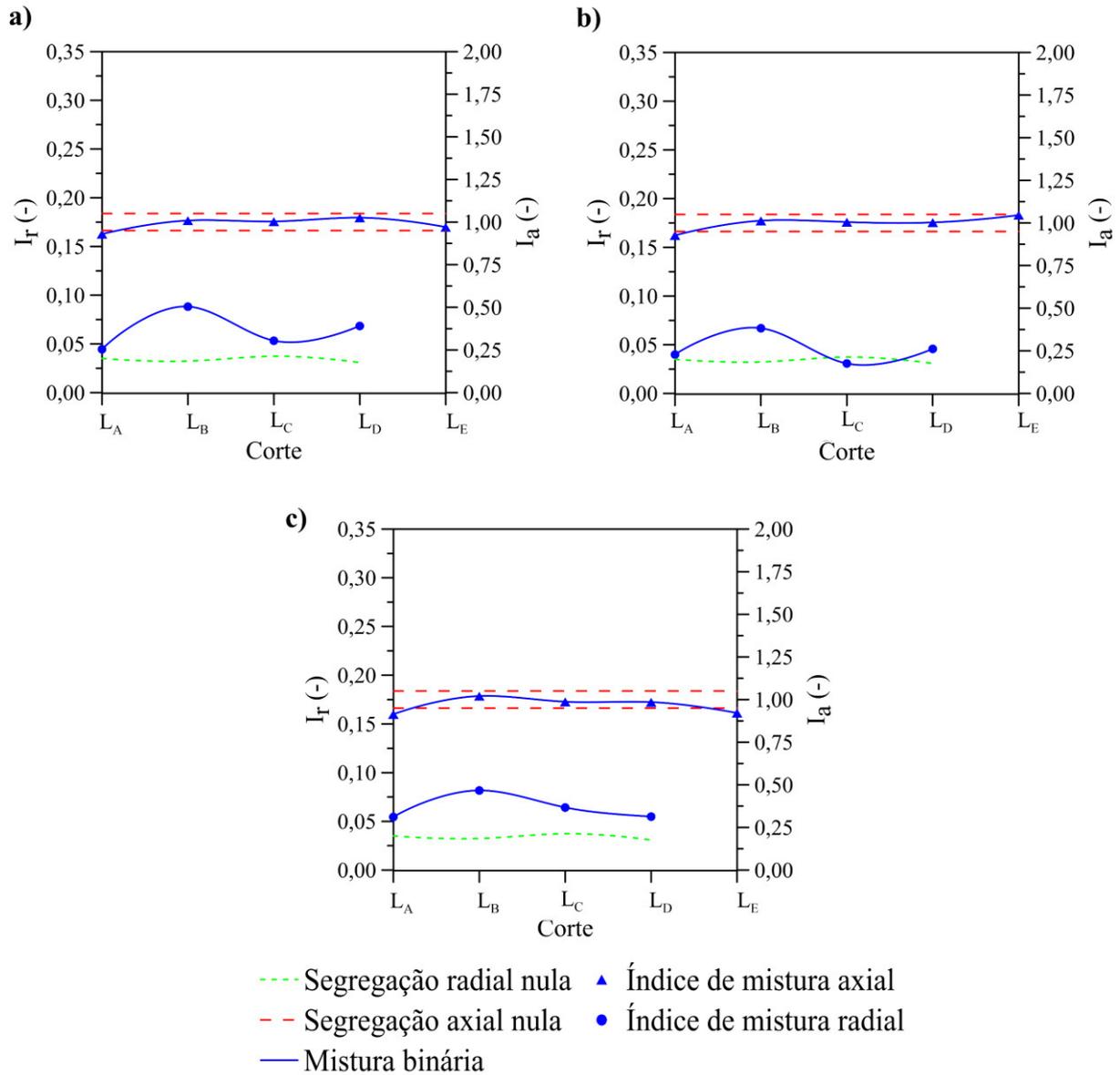


Figura 4.10. Índices de segregação radial e axial ao longo de diferentes posições longitudinais do leito de partículas para a Configuração B (razão de aspecto = 2,0,): (a) Configuração 1; (b) Configuração 2; (c) Configuração 3.

As Figuras 4.11 e 4.12 apresentam, respectivamente, a distribuição da fração volumétrica ao longo do leito de partículas (considerando como base de cálculo as partículas de vidro de 9 mm), e os índices de segregação radial e axial para a Configuração D, que foi a pior condição de mistura promovida pela diferença de diâmetro das partículas (razão de diâmetro de 4,5).

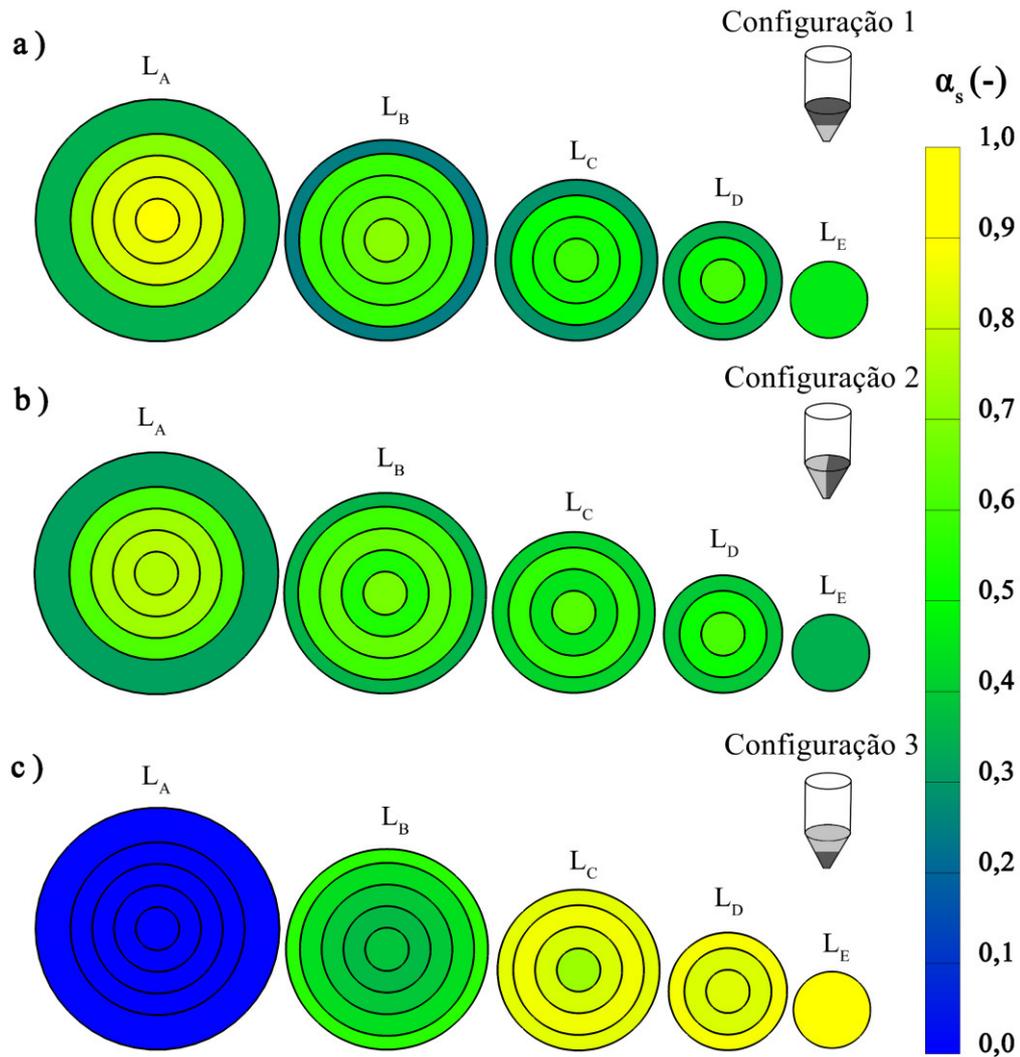


Figura 4.11. Distribuição da fração volumétrica de sólidos ao longo de diferentes posições longitudinais do leito de partículas para a Configuração D (razão de diâmetro = 4,5): (a) Configuração 1; (b) Configuração 2; (c) Configuração 3. Considerando como base de cálculo as partículas de vidro de 9 mm.

Pôde-se notar um comportamento semelhante entre as Configurações 1 e 2 de alimentação, em que as partículas menores (vidro de 2 mm) se concentraram próximas à parede do leito, e as partículas maiores (vidro de 9 mm), se concentraram na região central (Figura 4.11a). Desta forma, as partículas sob a Configuração 1 foram submetidas aos mesmos mecanismos segregativos que aquelas sob a Configuração 2, com colisões interpartículas na região da fonte, provocando o maior deslocamento das partículas de menor diâmetro (vidro de 2 mm) na direção radial (mecanismo segregativo de impacto), e a percolação das menores

partículas nos interstício das partículas de maior diâmetro (mecanismo segregativo de percolação). Os correspondentes índices de segregação radial e axial também se distribuíram de maneira semelhante (Figura 4.12a e Figura 4.12b), sendo que, as diferenças dos índices radial e axial entre as alimentações de Configuração 1 e 2, variaram entre 9,4% e 28,5%, e 0,1% e 24,7%, respectivamente.

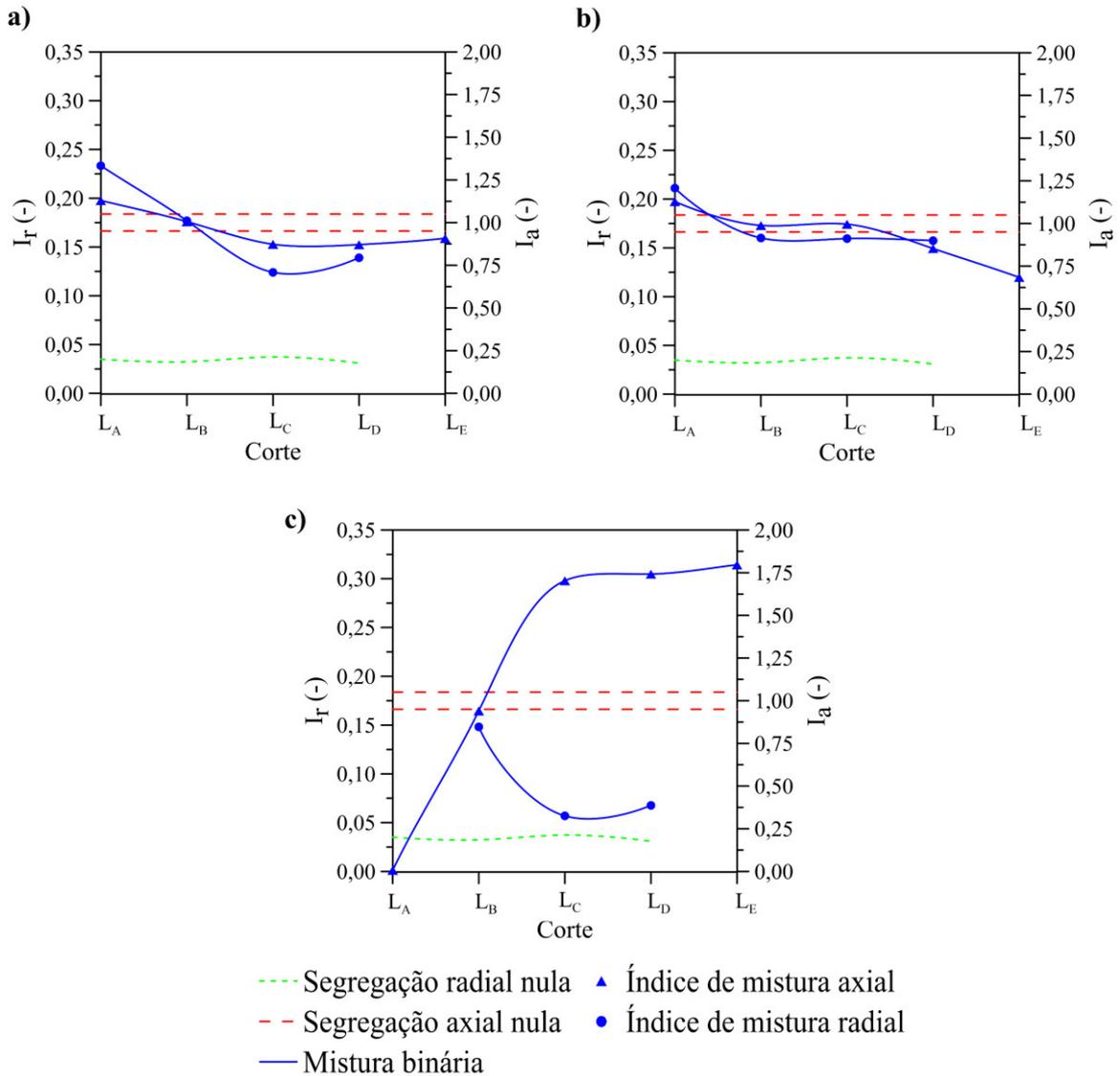


Figura 4.12. Índices de segregação radial e axial ao longo de diferentes posições longitudinais do leito de partículas para a Configuração D (razão de diâmetro = 4,5): (a) Configuração 1; (b) Configuração 2; (c) Configuração 3.

Por outro lado, na alimentação de Configuração 3 (Figura 4.11c), foi observado um comportamento dinâmico do processo de mistura distinto daqueles apresentados nas Configurações 1 e 2 (Figuras 4.11a e 4.11b, respectivamente), ou seja, um alto grau de segregação axial. A Configuração 3 apresentou uma alta concentração de partículas de menor diâmetro (vidro de 2 mm) na superfície do leito de partículas. No Corte  $L_A$ , a fração volumétrica foi de 99,6%, o que corresponde a 44,3% do total de partículas de vidro de 2 mm em todo o leito de partículas. O comportamento inverso acontece com as partículas maiores (vidro de 9 mm), que possuem concentração elevada nos Cortes  $L_C$ ,  $L_D$  e  $L_E$  (Figura 4.11c). Com relação à segregação radial, os índices possuem um menor valor quando comparados aos índices das Configurações 1 e 2, porém, este comportamento só ocorre devido à alta concentração de partículas de apenas um dos componentes na mistura (vidro de 9 mm) nos Cortes  $L_D$  e  $L_E$ .

Vale ressaltar que, o cálculo do índice de segregação axial na Configuração 3, Corte  $L_A$ , não foi possível de ser realizado, devido à quase inexistência de partículas de 9 mm nesta posição.

Na Configuração 3 de alimentação, as partículas de menor diâmetro inicialmente ocupavam a posição superior do leito (superfície do leito) e, neste caso, as partículas menores se movimentavam ao longo dos interstícios das partículas maiores, devido a força gravitacional (mecanismo de percolação), formando um leito de estrutura estável, facilitando a coesão das partículas e, conseqüentemente, suprimindo o processo de mistura. Devido a este comportamento, não houve o rompimento do leito de partículas, acontecendo, apenas, a formação de caminhos preferências para a passagem do fluido de arraste, que causaram a formação de bolhas, que apareceram em diferentes posições radiais ao longo da superfície do leito de partículas.

Na parte final da investigação do efeito da condição inicial de distribuição de partículas, foi utilizada a Configuração G (efeito de densidade), que apresentou nos experimentos anteriores (item 4.4) a pior condição de mistura promovida pela diferença de densidade entre as partículas. As Figuras 4.13 e 4.14, apresentam os valores para a distribuição da fração volumétrica ao longo do leito (tendo como base de cálculos as partículas de aço cromo), e os valores dos índices de segregação axial e radial, respectivamente.

Nas Figuras 4.13 e 4.14, a dinâmica das partículas não pareceu ser afetada pela modificação da alimentação inicial do sistema. Em todos os casos apresentados, as partículas

mais densas (aço cromo), tenderam a se concentrar na região central, enquanto as partículas menos densas (poliacetal), se distribuíram na região anular, próximas à parede do leito, ocorrendo a segregação radial.

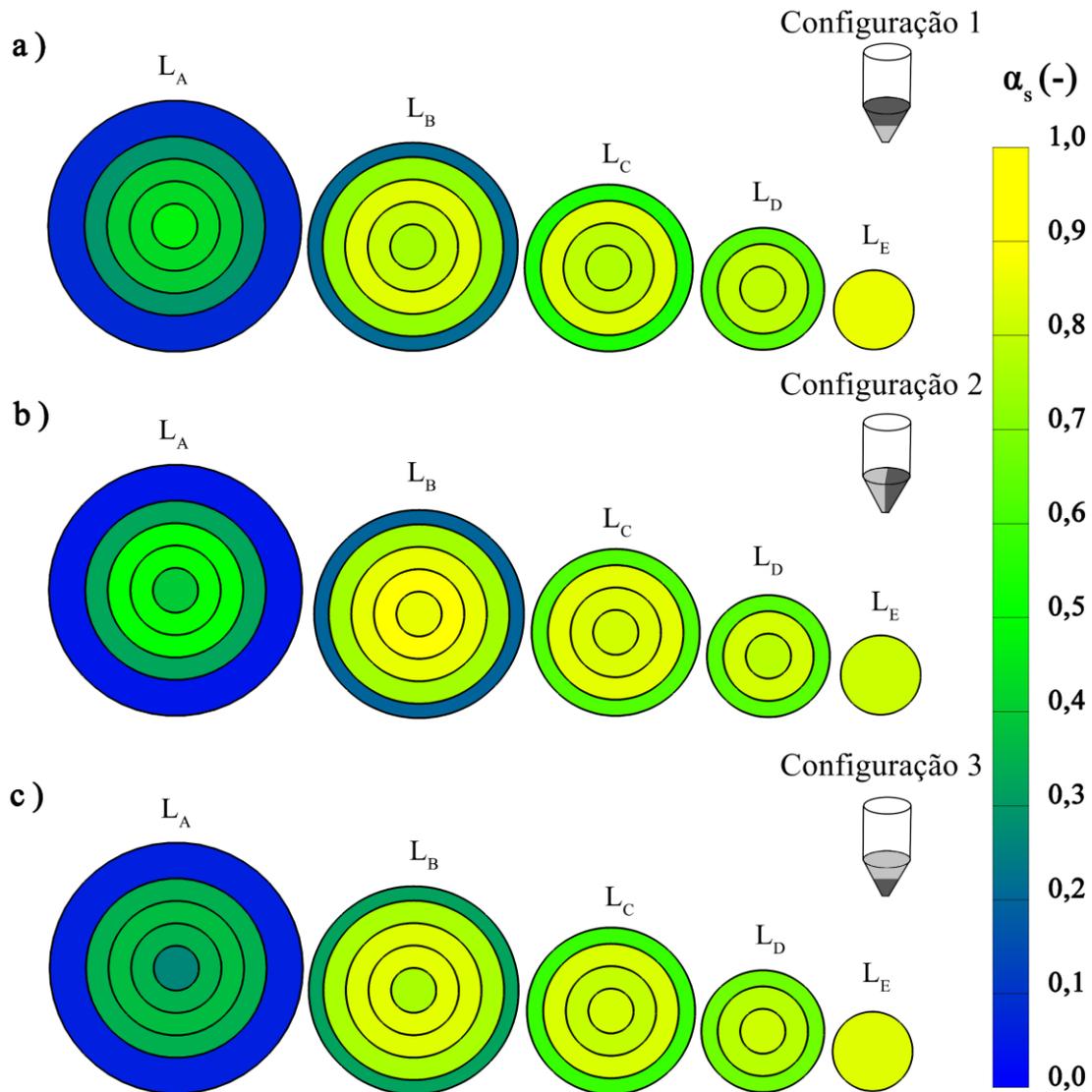


Figura 4.13. Distribuição da fração volumétrica de sólidos ao longo de diferentes posições longitudinais do leito de partículas para a Configuração G (razão de densidade = 5,8): (a) Configuração 1; (b) Configuração 2; (c) Configuração 3. Considerando como base de cálculo as partículas de aço cromo.

Em todas as condições de alimentação (Configurações 1, 2 e 3), ocorreu a segregação axial (Figura 4.14), pois as partículas mais densas se concentraram na base do leito, enquanto

as menos densas se encontraram na superfície do leito de partículas. As diferenças nos índices radial e axial entre as alimentações de Configurações 1 e 2, variando entre 1,2% a 25,6% e de 0,9% a 6,3%, respectivamente. Na comparação das alimentações de Configurações 1 e 3, as diferenças entre os índices radial e axial, variando entre 12,2% e 21,6% e de 2,3% a 13,7%, respectivamente.

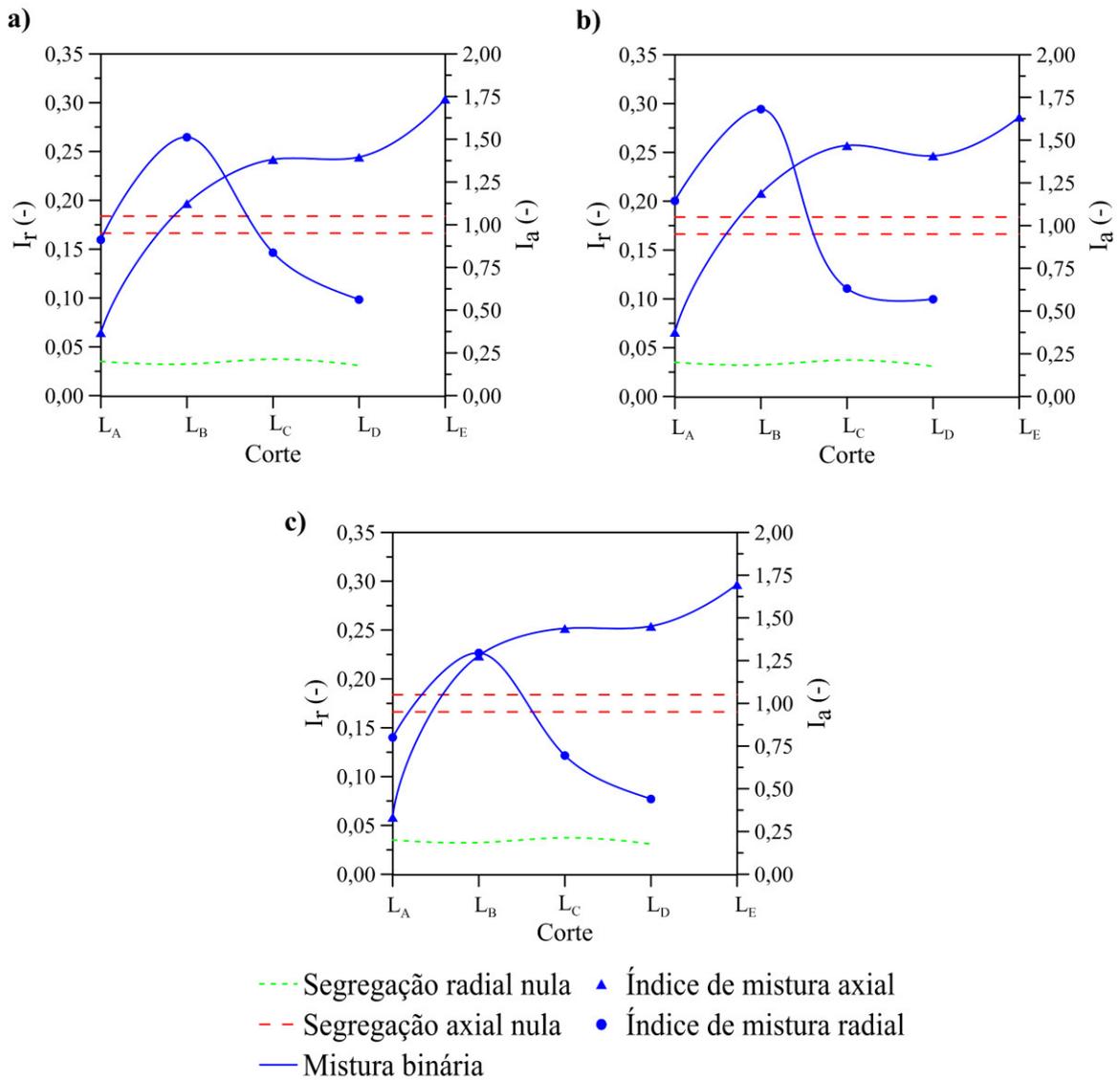


Figura 4.14. Índices de segregação radial e axial ao longo de diferentes posições longitudinais do leito de partículas para a Configuração G (razão de densidade = 5,8): (a) Configuração 1; (b) Configuração 2; (c) Configuração 3.

Este fato pode ser explicado, pois, durante a operação do sistema, pôde ser observado visualmente que, independentemente da distribuição inicial do sistema particulado, as partículas menos densas (poliacetal), foram “transportadas” para a superfície do leito de partículas, antes do início da condição de jorro. Desta forma, a condição de jorro iniciou-se de forma muito parecida em todas as configurações de alimentação.

### 4.6 Efeito da Velocidade Superficial de Gás

O último efeito analisado sobre o fenômeno de segregação, foi o efeito da velocidade superficial de entrada de gás, utilizando a Configuração D, com base no alto grau de segregação medido na seção anterior (item 4.1.5), e nas restrições do soprador de ar para outras configurações apresentadas.

Como mencionado anteriormente, para investigar uma possível interação entre as variáveis independentes, foram aplicadas três velocidade de entrada de ar, ou seja, 20%, 40% e 60% maiores do que a velocidade de mínimo jorro para a mistura binária utilizada, combinadas com as três diferentes condições iniciais de alimentação (Configurações 1, 2 e 3).

As Figuras 4.15 e 4.16, apresentam os valores para os índices de segregação axial, nos Cortes  $L_A$ ,  $L_B$ ,  $L_C$ ,  $L_D$  e  $L_E$ , e os valores para o índice de segregação radial nos Cortes  $L_A$ ,  $L_B$ ,  $L_C$  e  $L_D$  em função da velocidade superficial de ar, respectivamente. De acordo com as Figuras 4.15 e 4.16, independentemente da configuração de alimentação utilizada, a velocidade de ar superior a 20% acima da velocidade de mínimo jorro, não afetou significativamente a segregação axial, e nem a segregação radial, exceto para o fundo do leito de partículas (Corte  $L_E$ ), onde o incremento da velocidade de ar reduziu ligeiramente a segregação axial para todas as configurações de alimentação (4.15e), e no Corte  $L_B$ , onde o grau de segregação radial aumentou juntamente o aumento da velocidade de ar na Configuração 3.

A alimentação de Configuração 3, possuiu o pior caso de segregação axial, enquanto as Configurações 1 e 2, não apresentaram segregação axial significativa (Figura 4.15). No geral, as Configurações 1, 2 e 3, levaram à segregação radial em todos os casos, sendo esta, mais pronunciada próximo à superfície do leito de partículas (Cortes  $L_A$  e  $L_B$ ). Como mencionado anteriormente, não foi possível calcular o índice de segregação radial na posição  $L_A$  na Configuração 3, devido à ausência de partículas de maior diâmetro (vidro de 9 mm).

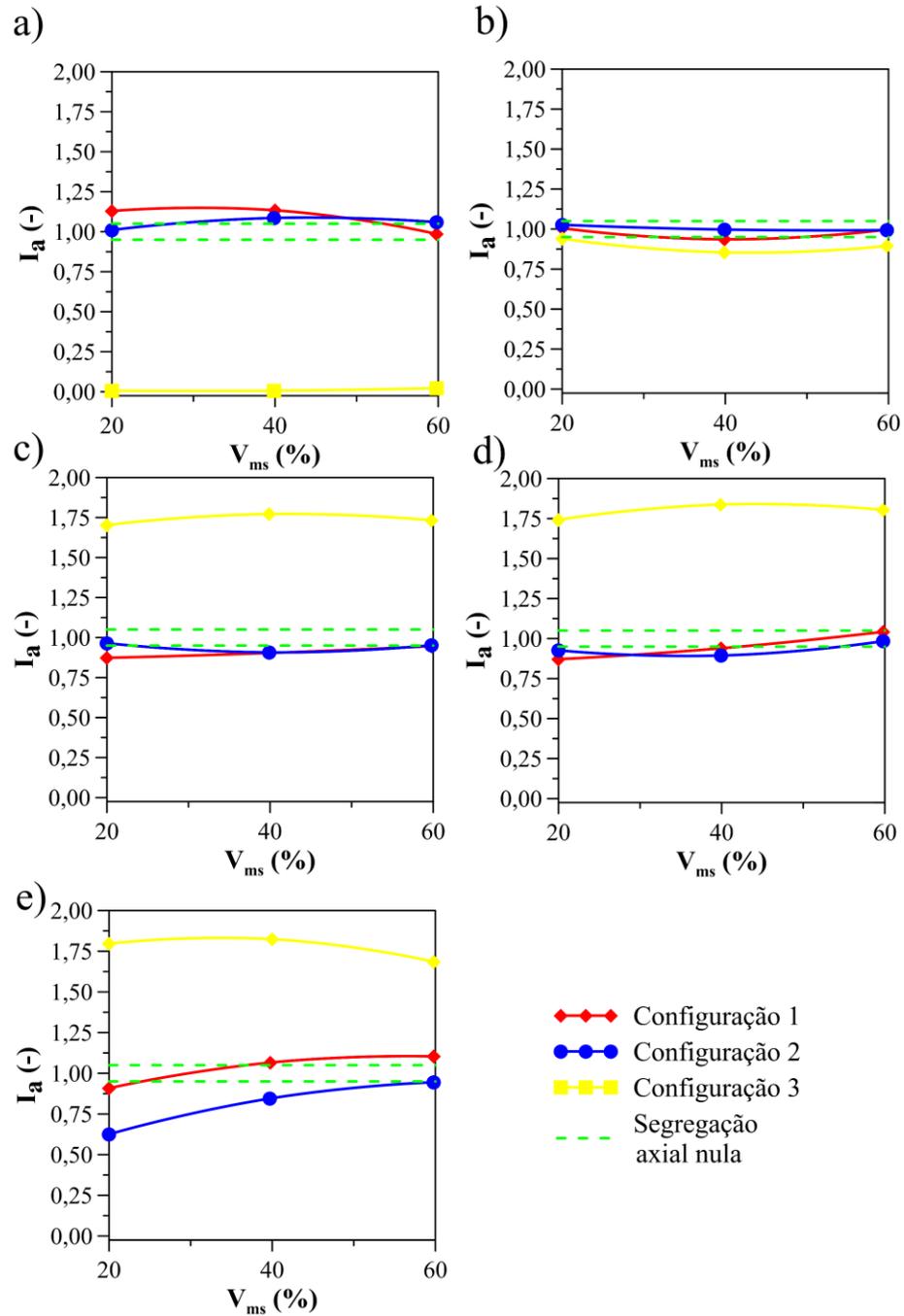


Figura 4.15. Índices de segregação axial ao longo de diferentes posições longitudinais do leito de partículas para a Configuração D (razão de diâmetro = 4,5): (a) Corte L<sub>A</sub>; (b) Corte L<sub>B</sub>; (c) Corte L<sub>C</sub>; (d) Corte L<sub>D</sub>; (e) Corte L<sub>E</sub>.

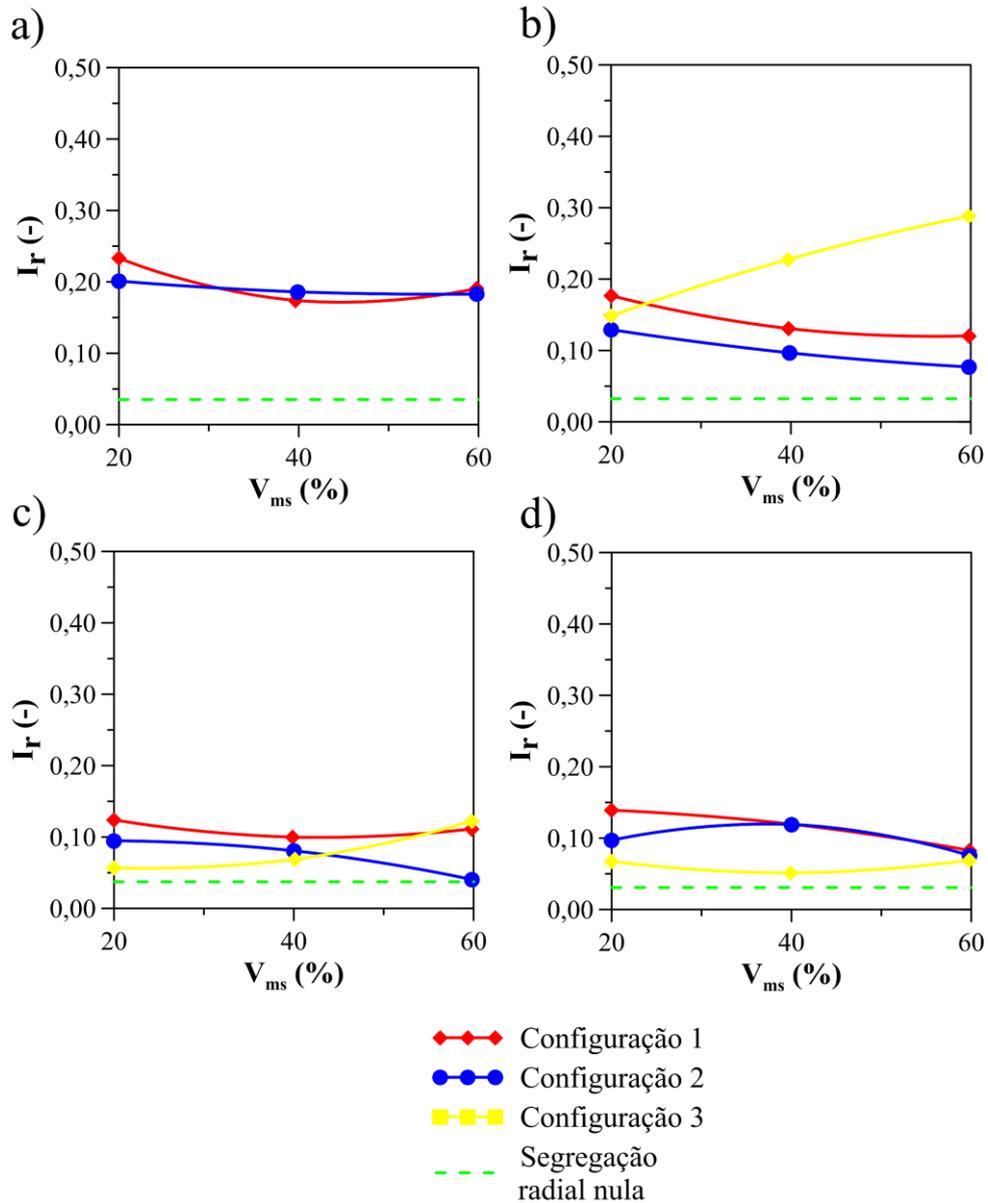


Figura 4.16. Índices de segregação radial ao longo de diferentes posições longitudinais do leito de partículas para a Configuração D (razão de diâmetro = 4,5): (a) Corte L<sub>A</sub>; (b) Corte L<sub>B</sub>; (c) Corte L<sub>C</sub>; (d) Corte L<sub>D</sub>.

Com base nestes resultados, pode-se observar uma dependência significativa do fenômeno de segregação radial e axial com a distribuição inicial das partículas no interior do leito de jorro, para sistemas binários com partículas de elevada razão de diâmetro.

Os resultados também mostraram que, o aumento de velocidade em sistemas com grande razão de diâmetro (4,5), não foi capaz de coibir, de forma satisfatória, os efeitos segregativos. Resultados similares foram obtidos por Uemaki *et al.* (1983), que investigaram a

segregação de misturas binárias de partículas de sílica com razões de diâmetro entre 1,5 e 3,4. Por outro lado, os presentes resultados se mostraram contrários às afirmações realizadas por San José *et al.* (1994), que estudaram a dinâmica de misturas binárias de partículas de vidro com razões de diâmetro entre 3 e 7, e verificaram que a segregação foi praticamente nula para velocidades 40% acima da velocidade de mínimo jorro.

---

---

# CAPÍTULO 6

---

## Conclusão

A metodologia não-intrusiva de gelificação e corte do leito de material utilizada no presente trabalho, possibilitou a investigação experimental do fenômeno de segregação radial e axial em um leito de jorro cônico. Foram analisados, de forma qualitativa e quantitativa, tanto os efeitos do diâmetro, da densidade e da forma das partículas, quanto os efeitos da condição inicial de alimentação das partículas e da velocidade de ar na entrada do leito sobre o fenômeno de segregação. Com base no estudo desenvolvido, as seguintes conclusões puderam ser obtidas:

- Misturas binárias com razão de aspecto de 2,0, razão de densidade de 1,3 e razão diâmetro de 2,0, apresentaram uma mistura final randômica;
- O comportamento dinâmico de misturas binárias compostas por dois componentes diferentes em diâmetro ou densidade, se demonstrou similar. Nestes sistemas, no que se refere à distribuição radial, o componente menor ou mais leve, se concentrou na região anular, próximas à parede do leito, e a partícula maior ou mais densa, se concentrou na região central. Porém, em relação à disposição axial, o fundo do leito possuiu uma maior concentração de partículas menores, em misturas binárias com diferença de diâmetros, e de partículas mais densas, em misturas binárias com diferença de densidade;
- A segregação radial e axial foi mais evidenciada com o aumento da razão de diâmetro e densidade em misturas binária;
- A distribuição inicial das partículas em um leito de jorro, interferiu de forma acentuada no comportamento segregativo axial e radial em sistemas com alta razão de diâmetro (razão de diâmetro de 4,5), porém, não apresentou efeitos significativos em misturas binárias com diferença na forma (razão de aspecto de 2,0) e com diferença na densidade (razão de densidade de 5,8);
- Os mecanismos segregativos de impacto e percolação, apresentaram grande importância no entendimento do fenômeno de segregação;

- Em sistemas com grande diferença de diâmetro (razão de diâmetro de 4,5), o aumento da velocidade superficial de gás de arraste não apresentou resultados satisfatórios para a redução da segregação.

---

---

# CAPÍTULO 6

---

---

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

- AL-JUWAYA, T.; ALI, N.; AL-DAHMAN, M. Investigation of hydrodynamics of binary solids mixture spouted beds using radioactive particle tracking (RPT) technique. **Chemical Engineering Research and Design**, v. 148, p. 21–44, 2019.
- AMENÁBAR, I. M. F. **Exploring analogies between granular materials and fluids**. Thesis (Doctor Degree in Chemical Engineering) – Swanson School of Engineering, University of Pittsburgh, Pennsylvania, 2009.
- BACELOS, M. S.; FREIRE, J. T. Stability of spouting regimes in conical spouted beds with inert particle mixtures. **Industrial and Engineering Chemistry Research**, v. 45, n. 2, p. 808–817, 2006.
- BACELOS, M. S.; PASSOS, M. L.; FREIRE, J. T. Effect of interparticle forces on the conical spouted bed behavior of wet particles with size distribution. **Powder Technology**, v. 174, n. 3, p. 114–126, 2007.
- BARROZO, M. A. S.; BOREL, L. D. M. S.; LIRA, T. S.; ATAÍDE, C. H. Fluid Dynamics Analysis and Pyrolysis of Brewer’s Spent Grain in a Spouted Bed Reactor. **Particuology**, 2018.
- BHATTACHARYA, T. Controlling mixing and segregation in time periodic granular flows. p. 207, 2011.
- BORTOLOTTI, C.T.; SANTOS, K.G.; FRANCISQUETTI, M.C.C.; DUARTE, C.R.; BARROZO, M.A.S. Hydrodynamic study of a mixture of West Indian Cherry Residue and Soybean Grains in a spouted bed. **Canadian Journal of Chemical Engineering**, v. 91(11), p. 1871-1880, 2013.

- BRIDGWATER, J. Mixing of powder and granular materials by mechanical means – A perspective. **Particuology**, Cambridge, v. 10, p. 397-427, 2012.
- BRITO, R.C.; PADUA, T.F.; FREIRE, J.T.; BETTEGA, R. Effect of mechanical energy on the energy efficiency of spouted beds applied on drying of sorghum. **Chemical Engineering and Processing**, 2017.
- BROWN, R. L. The fundamental principles of segregation, **The Institute of Fuel, Journal**, vol. 13, 1939.
- ÇENGE, Y. A.; CIMBALA, J. M. **Mecânica dos Fluidos: Fundamentos e Aplicações**. McGraw-Hill, 2007.
- CHEREMISINOFF, N. P. **Handbook of Chemical Processing Equipment**. Butterworth-Heinemann, p. 353, 2000.
- CHIELLE D. P.; BERTOUL D. A.; MEILE L.; TANABE E. H.; DOTTO L. G. Spouted bed drying of papaya seeds for oil production. **Food Science and Technology**, 2015.
- CHOU, S. H.; LIAO, C. C.; HSIAU, S. S. An experimental study on the effect of liquid content and viscosity on particle segregation in a rotating drum. **Powder Technology**, v. 201. p. 266-272, 2010.
- COOK, H. H.; BRIDGWATER, J. Segregation in Spouted Beds, **Canadian Journal of Chemical Engineering**, Oxford, v.56, 1980.
- CUI, H.; GRACE, J. R. Spouting of biomass particles: A review. **Bioresource Technol**, v. 99, p. 4008-4020, 2008.
- DALEFFE, R. V.; FERREIRA, M. C.; FREIRE, J. T. Effects of binary particle size distribution on the fluid dynamic behavior of fluidized, vibrated and vibrofluidized beds. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, 2008.

- DU, W.; ZHANG, L.; ZHANG, B.; BAO, S.; XU, J.; WEI, W.; BAO, X. Flow Regime Transition and Hydrodynamics of Spouted Beds with Binary Mixtures. **Powder Technology**, 2015.
- EPSTEIN, N.; GRACE, J. R. **Spouted and Spout-Fluid Beds**. Canada: Cambridge, 2010. 364p.
- FAN, L. T.; CHEN, S. J.; WATSON, C. A. Solids Mixing. **Industrial and Engineering Chemistry**, 1970.
- FERREIRA, C. M.; FREIRE, T. J. **Aplicações em Sistemas Particulados**. São Paulo, 2009. 359p.
- FREIRE, J.T.; SILVEIRA, A.M. (Org.). **Fenômenos de transporte em sistemas particulados: fundamentos e aplicações**. São Carlos - SP: Suprema, 2009, p. 307-343.
- FITZPATRICK, J. J. Particulate and Powder Mixing. **Food Mixing: Principles and Applications**, p. 269–287, 2009.
- HAO, H.; GUOXIN, H.; FENGCHAO, W. Experimental study on particles mixing in an annular spouted bed. **Energy Conversion and Management**, v. 49, n. 2, p. 257–266, 2008.
- JOSÉ, M. J. S. et al. Segregation in Conical Spouted Beds with Binary and Ternary Mixtures of Equidensity Spherical Particles. **Industrial and Engineering Chemistry Research**, v. 33, n. 7, p. 1838–1844, 1994.
- JOSÉ, M. J. S. et al. A Novel Technology to Segregate Binary Mixtures of Different Density in a Conical Spouted Bed. 2013.
- KALMAN, H.; LEVY, A. **Handbook of Conveying and Handling of Particulates Solids**, p.870, 2003.
- KIANI, M.; RAHIMI, M. R.; HOSSEINI, S. H.; AHMADI, G. Mixing in and segregation of solid particles in a conical spouted bed: Effect of particle size and density. **Particuology**, Yasouj, v. 32, p. 132-140, 2017.

- LÓPEZ R.; J. MARÍA JOSÉ S.; ALVAREZ S. Catalytic combustion of vineyard pruning waste in a conical spouted bed combustor. **Catalysis Today**, v. 305, p.13-18, 2018.
- . KUTLUOGLU, E. et al. Particle segregation in spouted beds. **The Canadian Journal of Chemical Engineering**, v. 61, n. 3, p. 308–316, 1983.
- MAKIBAR, J.; FERNANDEZ-AKARREGI, A. R.; ALAVA, I.; CUEVA, F.; LOPEZ, G.; OLAZAR, M. Investigations on heat transfer and hydrodynamics under pyrolysis conditions of a pilot-plant draft tube conical spouted bed reactor, **Chem. Eng. Process**, v. 50 p. 790–798, 2011.
- MALISKA, C. R. **Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional**. LTC, 1995, 460p.
- MARTINS R.; RUOTOLO L. A. M. Remoção de íons cobre de efluentes aquosos por eletrodeposição em reator eletroquímico de leito de jorro. **COBEQ**. 2010.
- MARQUES, I. O. D. R.; BACELOS, M. S. Analysis of Conical Spouted Bed Fluid Dynamics Using Carton Mixtures. **Chemical Engineering and Processing**, v. 70, p. 37-47, 2013.
- MATHUR, K. B.; GISHLER, P. E. **Method of contacting solid particles with fluids**, U.S. Patent No. 2,786,280 to National Research Council of Canada, 1954.
- MATHUR, K. B.; GISHLER, P. E. Study of Application of the Spouted Bed Technique. **Wheat Drying**: Canada, n.5, p.624-636, 1955a.
- MATHUR, K. B.; GISHLER, P. E. A Technique for Contacting gases With Coarse Solid. **National Research Council of Canada**: New York, v.1, n.2, p. 157, 1955b.
- MATHUR, K. B.; EPSTEIN, N. **Spouted Beds**. Canada: Academic Press, 1974. 309p.
- MOLINER, C.; MARCHELLI, F.; CURTI, M.; BOSIO, G.; ROVERO, G. Spouting Behavior of binary mixtures in square-based spouted beds. **Particuology**, v. 43, p. 193-201, 2019.
- MOLINER, C. et al. Spouting behaviour of binary mixtures in square-based spouted beds. **Particuology**, v. 43, p. 193–201, 2019.

- MONAZAM, E. R. et al. Minimum spouting velocity of flat-base spouted fluid bed. **Particuology**, v. 36, p. 27–36, 2018.
- MOSBY, J.; SILVA, S. R.; ENSTAD, G. G. Segregation of particulate materials – Mechanisms and testers. **KONA**, n. 14, 1996.
- OLAZAR, M.; SAN JOSÉ, J.; PEÑAS, F. J.; AGUAYO, T. A.; BILBAO, J. Stability and Hydrodynamics of Conical Spouted Beds with Binary Mixtures. **Ind. Eng. Chem. Res**, Bilbao, v. 32, p. 2826-2834, 1993.
- OLAZAR M.; SALDARRIAGAA J. F.; AGUADO R.; ATXUTEGI A.; BILBAO J. Kinetic modelling of pine sawdust combustion in a conical spouted bed reactor. **FUEL**, v. 227, p. 256-266, 2018.
- OLIVEIRA W. P.; MARTINS G. Z.; SOUZA R. F. C.; SHANKAR T. J. Effect of process variables on fluidynamics and adhesion efficiency during spouted bed coating of hard gelatin capsules. **Chemical Engineering and Processing**, v. 47, p. 2238–2246, 2008.
- OTTINO, J. M.; KHAKHAR, D. V. Mixing and segregation of granular materials. **Annual Review of Fluid Mechanics**, v. 32 p. 55-91, 2000.
- PALLAI, E.; SZENTMARJAY, T.; MUJUMDA, A. S. **Spouted Bed Drying – Handbook of Industrial Drying**. London: CRC Press, 1984.
- PERRY, R. H.; GREEN, D. W. **Perry’s Chemical Engineers’ Handbook**. New York, McGraw-Hill, 2008.
- PERRY, R. H.; GREEN, D. W. **Perry’s Chemical Engineers’ Handbook**. New York, McGraw-Hill, 2009.
- PICCININI, N. et al. Segregation phenomenon in spouted beds. **The Canadian Journal of Chemical Engineering**, 1977.
- PIETSCH, S. et al. A novel method of quantifying the coating progress in a three-dimensional prismatic spouted bed. **Particuology**, v. 42, p. 137–145, 2019.
- REALPE, A.; BARRIOS, K.; ROZO, M. Assessment of homogenization degree of powder

- mixing in a cylinder rotating under cascading regime. **International Journal of Engineering and Technology**, v. 7, n. 2, p. 394–404, 2015.
- SAN JOSÉ, M. J.; OLAZAR, M.; PEÑAS, J.; BILBAO, J. Segregation in Conical Spouted Beds with Binary and Ternary of Equidensity Spherical Particles. *Ind. Eng. Chem. Res. Bilbao*, v. 33, p.1838-1844, 1994.
- SANTOS, K. G.; CAMPOS, A. V.; FERREIRA, L. V.; SANTANA, R. C.; BARROZO, M. A. S. Fluid dynamics of a sand-biomass mixture in a spouted-bed reactor for fast pyrolysis. **Chemical Engineering & Technology**, v. 36, p.2148–2154, 2013.
- SANTOS, K. G. et al. Fluid Dynamic Behavior in a Spouted Bed with Binary Mixtures Differing in Size. **Drying Technology**, v. 33, n. 14, p. 1746–1757, 2015.
- SANTOS, D. A.; DUARTE, C. R.; BARROZO, M. A. S. Segregation Phenomenon in a Rotary Drum: Experimental Study and CFD Simulation. **Powder Technology**, v. 294, p. 1-10, 2016.
- SANTOS, K. G.; SANTANA, R. C.; SOUZA, MURATA, D. L.; MURATA, BARROZO, V. V. Spouting of Binary Particle Mixtures of Different Densities: Fluid Dynamics and Particle Segregation. **Particuology**, 2018.
- SMIRNOVA I.; HEINRICK S.; LEOPOLD C. S.; HENTZSCHEL C. M.; ANTONYUK S. ALNAIEF. A novel process for coating of silica aerogel microspheres for controlled drug release applications. **Microporous and Mesoporous Materials**, v.173, p.160-167, 2012.
- SARI, S.; KULAH, G.; KOKSAL, M. Characterization of gas-solid flow in conical spouted beds operating with heavy particles. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 40, p. 132–139, 2012.
- TAHAM T.; SILVA D. O.; BARROZO M. A. S. Improvement of bixin extraction from annatto seeds using a screen-topped spouted bed. **Separation Purification Technology**, v. 15, p. 313-321, 2016.

- UEMAKI, O.; YAMADA, R.; KUGO, M. Particle Segregation in a Spouted Bed of Binary Mixture of Particles. **The Canadian journal of chemical engineering**, v. 61, 1983.
- VENABLES, H. J.; WELLS, J. I. Powder Mixing. **Drug Development and Industrial Pharmacy**, v. 27, p. 599-612, 2001.
- WILLIAMS, J. C. The mixing of dry powders. **Powder Technology**, v. 2, n. 1, p. 13–20, 1968.
- WILLIAMS, J.C., Segregation of Particulate Materials. A Review\*. **Powder Technology**, 15, No. 2, 245, 1976.
- WIRIYAUMPAIWONG, S.; SOPONRONNARIT, S.; PRACHAYAWARAKORN, S. Soybean drying by two-dimensional spouted bed. **Drying Technol.** v. 21, p. 1735–1757, 2003.
- XAVIER, T. P.; LIBARDI, B. P.; LIRA, T. S.; & BARROZO, M. A. Fluid dynamic analysis for pyrolysis of macadamia shell in a conical spouted bed. **Powder Technology**, v. 299, p.210–216, 2016.
- ZEWAIL T. M.; YOUSEF N.S. Kinetic study of heavy metal ions removal by ion exchange in batch conical air spouted bed. **Jornal**, 2014.