



---

# **Universidade Estadual Paulista**

Câmpus de São José do Rio Preto

Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas

---

## **AVALIAÇÃO DE UM BIORREATOR ROTATIVO PARA FERMENTAÇÃO EM ESTADO SÓLIDO.**

**LINA MARÍA GRAJALES AGUDELO**  
Engenheira Química

**Prof. JOÃO CLÁUDIO THOMÉO**  
Orientador

**São José do Rio Preto,**

**Fevereiro 2010**

**LINA MARÍA GRAJALES AGUDELO**

**AVALIAÇÃO DE UM BIORREATOR ROTATIVO PARA  
FERMENTAÇÃO EM ESTADO SÓLIDO.**

Dissertação apresentada ao Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas da Universidade Estadual Paulista, Campus São José do Rio Preto, como parte dos requisitos para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia e Ciência de Alimentos na Área de concentração em Engenharia de Alimentos.

Orientador: **Prof. JOÃO CLÁUDIO THOMÉO**

**São José do Rio Preto,**

**Fevereiro 2010**

Grajales Agudelo, Lina María.

Avaliação de um biorreator rotativo para fermentação em estado sólido  
/ Lina María Grajales Agudelo. - São José do Rio Preto : [s.n.], 2010.  
98 f. : il. ; 30 cm.

Orientador: João Cláudio Thoméo  
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Instituto de  
Biociências, Letras e Ciências Exatas

1. Microbiologia industrial. 2. Biorreatores. 3. Fermentação em estado  
sólido. 4. Análise térmica. 5. Partículas - Movimentação. 6. Partículas -  
Molhabilidade. I. Thoméo, João Cláudio. II. Universidade Estadual  
Paulista, Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas. III. Título.

CDU -. 663.15

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca do IBILCE  
Campus de São José do Rio Preto - UNESP

**LINA MARÍA GRAJALES AGUDELO**

**AVALIAÇÃO DE UM BIORREATOR ROTATIVO PARA  
FERMENTAÇÃO EM ESTADO SÓLIDO.**

Dissertação apresentada ao Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas da Universidade Estadual Paulista, Campus São José do Rio Preto, como parte dos requisitos para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia e Ciência de Alimentos na Área de concentração em Engenharia de Alimentos.

**BANCA EXAMINADORA**

Prof. Dr. João Cláudio Thoméo  
Professor Associado  
UNESP – São José do Rio Preto  
Orientador

Prof. Dr. José Teixeira Freire  
Professor Titular  
UFSCAR – São Carlos

Profa. Dra. Maria Aparecida Mauro  
Professor Assistente Doutor  
UNESP – São José do Rio Preto

**São José do Rio Preto, Fevereiro 2010**

*Às meus adorados pais,  
Hermes e Cristina,  
e ao meu querido irmãozinho,  
Leonardo.  
Dedico.*



## *Agradecimentos*

A Deus por permitir a realização do meu grande sonho de estudar no Brasil.

A mis papitos y a mi Leín por apoyarme siempre, en todos los proyectos de mi vida, los quiero mucho !!!!!.

Ao meu orientador João Cláudio pela paciência, pelos conhecimentos, pela ajuda e sobre todo por permitir que eu fizesse parte da sua grande família acadêmica. A experiência foi um sucesso, lhe agradeço muitíssimo por TUDO. Obrigada “pai”.

Aos professores José Freire, Maria do Carmo, Cida e José Antônio, membros da banca, por acrescentar a qualidade do trabalho mediante suas recomendações, conselhos e sugestões.

Ao meu grande Maestro e Amigo Carlos Eduardo por me ensinar todo o que podia precisar para me enfrentar na vida, longe da Faculdade, longe da Colômbia, longe de você. Por ter me agüentado tantos anos e ajudar-me a crescer pessoal e profissionalmente. Na verdade não tenho palavras para expressar minha gratidão e admiração por você, só posso falar ... obrigada!!!.

À professora Cida por ser quase uma mãe para mim e por ter me ajudado muito na minha vinda ao Brasil.

Ao professor Roger por fazer parte da minha formação acadêmica e acrescentar meus conhecimentos na área de engenharia de processos.

Ao Rodiak por caminhar do meu lado em busca da felicidade, simplesmente, adoro você!!!!.

*Lina María Grajales Agudelo*

## *Agradecimentos*

À Cinthya, Rafis, Harvey e Camilo por serem meus amigos e poder contar com vocês nas situações que se apresentam sempre, e que, se complicam ainda mais quando estamos fora de casa.

Ao Pablito, Alex e a Kelly por compartilhar aqueles incríveis momentos durante e depois das aulas.

À Carol por se tornar uma grande amiga em muito pouco tempo e pelos longos períodos de companhia no laboratório.

À Milena, uma super amiga, por me ajudar na aprendizagem do português.

Ao João e à Natália por colaborar na parte experimental e facilitar-me o desenvolvimento do trabalho.

Aos técnicos do laboratório por fornecer-me as ferramentas necessárias para concluir com grande sucesso meu projeto.

Ao Cesar e os outros colegas do laboratório que me agüentaram durante este tempo.

Ao CNPq e ao programa PEC-PG que financiaram meus dois anos de mestrado.

A lista é longa!!!!. Peço desculpas para quem não está nesta lista e que de alguma maneira têm influenciado nas grandes mudanças da minha vida.

*Lina María Grajales Agudelo*



## Resumo

O objetivo geral deste trabalho foi contribuir no projeto de um biorreator rotativo para aplicação de Fermentação em Estado Sólido (FES), visando à produção do fungo entomopatogênico *M. anisopliae*, empregando arroz como substrato. O desenvolvimento do projeto foi realizado em duas etapas. A primeira etapa consistiu em visualizar a homogeneidade e a movimentação de partículas de arroz, em um protótipo construído em acrílico. Isto, com o objetivo de avaliar as melhores configurações dos componentes internos do reator. O método empregado na análise de homogeneidade foi a técnica de traçadores coloridos, utilizando uma concentração de 10% em massa de arroz tingido de preto e 90% de arroz branco. A concentração da mistura foi determinada de duas maneiras: (i) manualmente, por separação e pesagem das amostras e, (ii) por análise de imagem mediante o software *Lenseye (E&CS Programs)*. Além disso, foram determinadas as velocidades das partículas em três regiões do leito: na superfície, centro do leito e do lado da parede do cilindro, e foram estabelecidos os regimes de escoamento e os graus de enchimento trabalhados. As variáveis estudadas foram massa total de arroz (5, 10 e 15 Kg), velocidade de rotação (1, 4 e 7 RPM) e a presença e ausência de tubos simuladores de alimentação dentro do tambor. Posteriormente, no mesmo equipamento, foi analisada a molhabilidade do leito, por determinação da umidade em três pontos do leito, na seção longitudinal do tambor. O material particulado empregado nestes experimentos foram esferas de sílica gel de 6mm de diâmetro. As variáveis avaliadas foram quantidade de água aspergida (0,1 e 0,05 mL/g material), vazão de água (1600, 2000 e 2400 mL/min) e carga total de material (5,8 e 12,6 Kg). A segunda etapa consistiu em analisar o comportamento térmico do reator, empregando o equipamento construído em aço inoxidável. Os testes foram conduzidos com um material sólido inerte, esferas de vidro de 3 mm de diâmetro. O objetivo principal foi avaliar a homogeneidade e distribuição da temperatura, onde foram examinadas algumas variáveis como a presença e ausência de ar, carga total de esferas de vidro e o leito na posição fixa e móvel. Da primeira etapa avaliada, os resultados mostraram que a homogeneidade das partículas foi alcançada após 5, 9 e 11 giros para amostras de 5, 10 e 15 Kg, respectivamente. Isto é, independente da concentração de traçador, da

*Lina María Grajales Agudelo*



velocidade de rotação e da presença de tubos alimentadores. O regime de escoamento em cascata foi observado na movimentação das partículas de arroz, devido à velocidade e ao grau de enchimento do leito. A classificação em sub-regimes dependeu da velocidade de rotação, sendo sub-classificada como em queda, rolante e cascata, para 1, 4 e 7 RPM, respectivamente. Os experimentos realizados em ausência de tubos alimentadores apresentaram boa mistura em todas as regiões do leito, enquanto que, os testes realizados na presença de tubos mostraram regiões de arroz branco do lado dos tubos, indicando pontos de velocidades muito baixas nessa zona. A quantidade total de água absorvida pelo leito de sílica gel, foi estatisticamente igual, nas três posições longitudinais do tambor, para 5,8 e 12,6 Kg de sílica gel, após 5 e 9 giros, respectivamente. Na segunda etapa analisada, para os três graus de enchimento avaliados, a temperatura das esferas de vidro permaneceu quase constante em torno dos 28 °C para experimentos realizados em ausência de ar e temperatura da camisa a 28 °C, demonstrando influência externa desprezível. Nos experimentos em presença de ar, a 60 °C e 15L/min, a influência do ar sobre a resposta térmica do sistema foi desprezível, enquanto que para a vazão 150L/min houve um sensível gradiente radial de temperatura no interior do leito. Nos experimentos realizados em presença e ausência de ar submetidos à rotação do tambor, houve homogeneização das temperaturas medidas, que foram praticamente as mesmas em todas as posições de medida.



## Abstract

This work is aimed to contribute to the development of a rotary drum bioreactor for *Metarhizium anisopliae* spore production by Solid State Fermentation, using rice as a substrate. This work is comprised of two parts, one corresponding to particle moving analysis and another on thermal aspects. The first part assesses both the mixture and the movement of particles of rice in a Plexiglas rotary drum, in order to identify the optimal operational conditions for the best particle mixture. Tracer method was applied to assess the particle mixture and two techniques were applied to assess the mixture: manual sampling and image analysis using *Lenseye (E&CS Programs)* software. The flow regime and particle velocities were also identified by filming the bed while rotating. For particle measurements three regions were analyzed: wall, core and surface. Rice load (5, 10, and 15 kg), rotation velocity (1, 4, and 7 RPM), and the presence or absence of inner tubes within the bed were the independent variables for all the tests. Afterwards, the bed wettability was analyzed in the same equipment, using 6mm diameter silica gel particles. Water was sprinkled over the particles in three axial positions. The selected variables were the volume of water by the bed mass ratio (0,1 and 0,05 mL/g), the water flow rate (1600, 2000, and 2400 mL/min), and the particle load (5,8, and 12,6 kg). The second part assessed the thermal behavior of a glass beads bed, 3mm diameter, in a stainless steel rotary drum. The main purpose of this step was to identify the optimal operational conditions for the best thermal homogeneity. The selected variables were the air flow rate, the bed load, and the rotational conditions (static or mobile). From the first part, the results showed that a complete mixture was obtained after 5, 9, and 11 drum revolutions for 5, 10, and 15 kg loads, respectively, independently from the tracer concentration, rotation velocity, and presence of inner tubes. The cascading regime was verified due to the drum rotational velocity and the bed filling space. The sub-regimens were classified in slumping, rolling and cascading, according to the bed velocities 1, 4, and 7 RPM, respectively. Tests performed in the absence of inner tubes showed good mixing in all analyzed regions, while tests using inner tubes presented very low velocities around the tubes. The total water absorbed by the silica gel particles in all axial positions were statistically equal after 5 and 9 revolutions for the loads 5,8 and 12,6 kg, respectively. From

*Lina María Grajales Agudelo*

the second part, for all filling degrees, the bed temperature was almost constant at 28 °C, when no air was introduced into the equipment and the wall temperature was kept constant at 28 °C, showing weak influence of external heat sources. In the experiments with air flow at 60 °C and 15 L/min, no air influence was noticed over the bed thermal behavior, while for 150L/min an expressive radial temperature gradient was observed within the bed. In the experiments with drum rotation, with and without air flow, the temperatures were almost the same after the drum revolutions.



## Resumen

El objetivo general de este proyecto fue contribuir en el diseño de un bioreactor rotativo para procesos de Fermentación en Estado Sólido (FES), con la finalidad de producir el hongo entomopatogénico *M. Anisopliae*, empleando arroz como sustrato. El proyecto fue realizado en dos etapas. La primera etapa consistió en visualizar la homogeneidad y el movimiento de partículas de arroz, en un prototipo construido en acrílico. Esto con el propósito de evaluar las mejores configuraciones de los componentes internos del reactor. El método utilizado en el análisis de homogeneidad de partículas fue la técnica de trazadores coloridos, empleando una concentración de 10% en masa de arroz pintado de negro y 90% de arroz blanco. La concentración de la mezcla fue determinada mediante dos métodos de análisis: (i) manualmente, por separación y pesado de las muestras y (ii) por análisis de imagen mediante el software *Lenseye (E&CS Programs)*. Además, las velocidades de las partículas se determinaron en tres regiones del lecho sólido: en la superficie, en el centro y contiguo a la pared del cilindro. Otros parámetros como los regímenes de movimiento y grado de llenado, también fueron determinados. Las variables estudiadas fueron masa total de arroz (5, 10 e 15 Kg), velocidad de rotación (1, 4 e 7 RPM) y la presencia y ausencia de tubos simuladores de alimentación dentro del cilindro. Posteriormente, en el mismo equipo, fue analizada la mojabilidad del lecho, por determinación de la humedad en tres puntos del lecho, ubicados en la sección longitudinal del tambor. El material particulado empleado en estos experimentos fueron esferas de sílica gel de 6mm de diámetro. Las variables evaluadas fueron cantidad de agua aspergida (0,1 e 0,05 mL/g material), caudal de agua (1600, 2000 e 2400 mL/min) y carga total de material (5,8 y 12,6 Kg). La segunda etapa consistió en analizar el comportamiento térmico del reactor, empleando el equipo construido en acero inoxidable. Los ensayos fueron llevados a cabo con un material sólido inerte, esferas de vidrio de 3mm de diámetro. El objetivo principal fue evaluar la homogeneidad y distribución de temperatura, donde fueron examinadas algunas variables como la presencia y ausencia de aire, carga total de esferas de vidrio y el lecho en la posición fija y móvil. De la primera etapa evaluada, los resultados

*Lina María Grajales Agudelo*

mostraron que la homogeneidad de las partículas fue obtenida después de 5, 9 y 11 giros para muestras de 5, 10 y 15 Kg, respectivamente. Esto es, independiente de la concentración de trazador, de la velocidad de rotación y de la presencia o ausencia de tubos alimentadores. El régimen de movimentación en cascada fue observado en el movimiento de las partículas de arroz. La clasificación en sub-régímenes dependió de la velocidad de rotación, siendo sub-clasificada como: en caída, rodante y cascada, para 1, 4 y 7 RPM, respectivamente. Los experimentos realizados en ausencia de tubos alimentadores presentaron homogeneidad satisfactoria en todas las regiones del lecho, mientras que, las pruebas realizadas en presencia de tubos mostraron regiones de arroz blanco al lado de los tubos, indicando puntos de velocidades muy bajas en esa zona. La cantidad de humedad absorbida por el lecho de sílica gel, fue estadísticamente igual, en las tres posiciones longitudinales del tambor, para 5,8 y 12,6 Kg de sílica gel, después de 5 e 9 giros, respectivamente. En la segunda etapa analizada, para los tres grados de llenado evaluados, la temperatura de las esferas de vidrio permaneció casi constante alrededor de los 28 °C, en los experimentos realizados sin aire y con temperatura de la camisa a 28 °C, demostrando influencia externa despreciable. En los experimentos con aire a 60 °C y 15 L/min, la influencia del aire sobre el comportamiento térmico del sistema fue despreciable, mientras que para el caudal de 150 L/min hubo un gradiente radial sensible de temperatura en el interior del lecho. En los experimentos realizados con y sin aire que fueron sometidos a rotación del tambor, hubo homogenización de las temperaturas medidas, donde fueron prácticamente las mismas en todas las posiciones de medida.

## *Nomenclatura*

$D$	Diâmetro do cilindro (m)
$d$	Diâmetro da partícula (m)
$F$	Frequência (revoluções/s)
$f$	Grau de enchimento
$g$	Força da gravidade (9,81 m/s <sup>2</sup> )
$L$	Comprimento do cilindro (m)
$m$	Massa (g)
$R$	Raio do cilindro (m)
$r$	Raio em qualquer distancia de $R$ (m)
$r_o$	Distância do eixo de rotação (m)
$S$	Corda do cilindro e distância recorrida por uma partícula de arroz do leito sólido (m)
$t$	Tempo (s)
$v$	Velocidade de uma partícula de arroz (m/s)

### **Símbolos gregos**

$\varepsilon$	Ângulo de enchimento ou metade do ângulo do segmento circular ocupado pelos sólidos (Graus ou radianos)
$\rho_{ap}$	Densidade aparente (g/cm <sup>3</sup> )
$\omega$	Velocidade angular (rad/s)
$\Theta$	Ângulo de repouso dinâmico (Graus)
$\varphi_M$	Diâmetro molhado (cm)
$\forall$	Volume (cm <sup>3</sup> )
$\forall_{ap}$	Volume aparente (cm <sup>3</sup> )
$\bar{\forall}$	Vazão (cm <sup>3</sup> /min)

### **Adimensionais**

$Fr$	Froude
------	--------



## Sumário

<b>1. CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO .....</b>	<b>10</b>
<b>2. CAPÍTULO 2: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>12</b>
2.1 Fermentação em Estado Sólido (FES).....	12
2.2 Controle microbiano de pragas.....	14
2.3 Produção de fungos entomopatogênicos.....	16
2.4 Biorreatores para FES.....	17
2.5 Movimentação das partículas em tambores rotativos.....	20
2.5.1 Número de Froude e Grau de enchimento.....	20
2.5.2 Ângulo de repouso dinâmico.....	26
<b>3. CAPÍTULO 3: MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>27</b>
<b>3.1 MATERIAIS.....</b>	<b>27</b>
3.1.1 Partículas.....	27
3.1.2 Equipamento.....	28
3.1.2.1 Protótipo de acrílico.....	28
3.1.2.2 Bioreator.....	30
<b>3.2 MÉTODO EXPERIMENTAL.....</b>	<b>33</b>
3.2.1 Caracterização das partículas de arroz.....	33
3.2.2 Mistura das partículas.....	34
3.2.2.1 Técnica de traçadores.....	34
3.2.2.2 Calibração do <i>software</i> Lenseye.....	35
3.2.3 Visualização do movimento das partículas.....	36
3.2.4 Grau de enchimento e regime de escoamento.....	38
3.2.4.1 Grau de enchimento.....	38
3.2.4.2 Regime de escoamento.....	39

3.2.5 Molhabilidade.....	40
3.2.5.1 Área de molhabilidade dos aspersores.....	40
3.2.5.2 Quantidade de água aspergida.....	40
3.2.5.3 Experimentos de molhabilidade.....	41
3.2.6 Homogeneidade térmica.....	42
3.2.6.1 Ensaios preliminares.....	43
3.2.6.2 Ensaios térmicos.....	44
3.2.7 Planejamento experimental.....	45
<b>4. CAPÍTULO 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>48</b>
<b>4.1 Caracterização das partículas de arroz.....</b>	<b>48</b>
<b>4.2 Mistura das partículas.....</b>	<b>49</b>
4.2.1 Calibração com o <i>software</i> Lenseye ( <i>E&amp;CS Programs</i> ).....	49
4.2.2 Técnica de traçadores coloridos.....	55
<b>4.3 Visualização do movimento das partículas.....</b>	<b>60</b>
4.3.1 Avaliação qualitativa.....	60
4.3.2 Avaliação quantitativa: Cálculo das velocidades.....	60
<b>4.4 Grau de enchimento e regime de movimentação.....</b>	<b>63</b>
4.4.1 Grau de enchimento.....	63
4.4.2 Regime de movimentação.....	66
<b>4.5 Molhabilidade.....</b>	<b>68</b>
4.5.1 Área de molhabilidade dos aspersores.....	68
4.5.2 Quantidade de água aspergida.....	69
4.5.3 Experimentos de molhabilidade.....	70
<b>4.6 Análise térmica.....</b>	<b>73</b>
4.6.1 Ensaios preliminares.....	73
4.6.2 Ensaios térmicos.....	82
<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>89</b>
<b>SUGESTÕES.....</b>	<b>91</b>
<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>92</b>





## Capítulo 1

### Introdução

Atualmente, muitos fungos são produzidos para serem aplicados na indústria, principalmente, na indústria agrícola, já que constituem uma alternativa compatível com o ambiente. Um claro exemplo é o uso do fungo entomopatogênico *Metarhizium anisopliae* empregado como pesticida biológico para controlar pragas como a *Mahanarva posticata*, a cigarrinha-da-folha que se dá nos cultivos de cana-de-açúcar (ALVES, 1990). Esses fatores, aliados à gradativa adesão dos plantadores de cana ao uso dos pesticidas biológicos e ao recente crescimento do parque industrial sucro-alcooleiro, permitem antecipar em um futuro próximo uma situação altamente favorável à expansão do bio-controle e justificam plenamente o investimento em novas tecnologias de produção de bioinseticidas que possam torná-lo mais acessível e eficiente.

Mas, apesar da grande importância econômica e ambiental do controle microbiano de pragas, a produção deste tipo de fungo por Fermentação em Estado Sólido (FES) é ainda muito artesanal, e os procedimentos utilizados são muito similares aos empregados por Metchnikoff no século XIX. Assim, a ampliação da escala de produção passa, necessariamente, pelo desenvolvimento de biorreatores, em um primeiro momento em escala de bancada e, posteriormente, em larga escala.

O principal problema associado à ampliação de escala na FES é a remoção do calor gerado pelas atividades metabólicas dos microrganismos. As altas temperaturas nos processos fermentativos podem comprometer o metabolismo microbiano e desnaturar enzimas, de modo que o controle desta variável é chave para ter um processo estável e de produtividade elevada (RANI et al., 2009).

Em FES dispõe-se de duas arquiteturas básicas de fermentadores, os de leito estacionário e os de leito móvel. Os de leito estacionário são mais simples de construir e operar, mas têm como inconveniente a remoção do calor metabólico, que é feita apenas por meio do ar que escoar entre as partículas e a parede do biorreator. Os de leito móvel são mecanicamente mais complexos e operacionalmente mais trabalhosos, mas dão flexibilidade na remoção do calor gerado pelo microorganismo, pois permite que água seja

*Lina María Grajales Agudelo*

aspergida sobre o sólido ao longo do processo, resfriando o meio. Assim, a água deve ser adicionada homogeneamente sobre o substrato sólido, induzindo assim, uma boa mistura dentro do reator. Além disso, deve existir uma sinergia entre o substrato sólido e as atividades metabólicas do fungo, ou seja, entre a movimentação do leito de partículas e a sobrevivência do microrganismo (IGNATIUS, 2002).

Consequentemente, o desenvolvimento de um biorreator de leito móvel para aplicação em FES é uma necessidade para a indústria biológica, já que torna possível a manipulação das configurações internas do equipamento e de variáveis operacionais que favoreçam os processos fermentativos. A escassez de informações experimentais na literatura compromete a validação dos modelos obtidos e a possibilidade de utilizar o equipamento industrialmente.

Devido à carência de estudos relacionados ao tema, este trabalho teve como objetivo geral contribuir para o projeto de um fermentador rotativo visando à produção do fungo *M. anisopliae* por FES, utilizando arroz como substrato. Para tanto, os objetivos específicos foram:

- ❖ Avaliar a movimentação de partículas de arroz e determinar a melhor configuração dos componentes internos do biorreator que proporcionam a melhor taxa de mistura.
- ❖ Avaliar a molhabilidade do leito através da aspersão de água sobre partículas de sílica gel.
- ❖ Avaliar o comportamento térmico do reator frente às diferentes condições operacionais.



## Capítulo 2

# Revisão Bibliográfica

### 2.1 Fermentação em estado sólido (FES)

A fermentação em estado sólido (FES) pode ser definida como um processo fermentativo realizado sobre um meio sólido insolúvel o qual age como suporte físico e como fonte de nutrientes para os microrganismos, com uma quantidade de água suficiente para garantir o crescimento microbiano e as atividades metabólicas das células, sem exceder a capacidade de retenção de água do substrato sólido. Este processo natural pode ser utilizado em aplicações industriais para produzir o produto desejado, operando sob condições controladas (DURAND et al., 1988; PANDEY, 1992; PANDEY et al., 2000; RODRIGUEZ, 2005; 2006; RANI et al., 2009).

A FES é uma técnica milenar no Oriente, particularmente na Ásia, para produção de alimentos fermentados, onde o cultivo dos fungos é feito em ausência de água sobre um substrato sólido, como grãos de cereal, feijão e arroz, entre outros. Porém, hoje em dia, no mundo Ocidental, a indústria de fermentação dá preferência ao cultivo de fungos e alguns outros microrganismos por fermentação com substratos líquidos, técnica conhecida como fermentação submersa (FSb) (IGNATIUS, 2002; RODRIGUEZ, 2005).

Não obstante, devido ao uso potencial de rejeitos sólidos provenientes de atividades agro-industriais, o interesse pelas pesquisas relacionadas à FES cresceu significativamente desde 1990 até hoje, como pode ser observado na Figura 2.1. Nesta Figura são mostrados resultados compilados da base de dados “Web of Science”, onde o total de artigos publicados advém da busca através da expressão booleana *Bioreactor AND Solid State Fermentation*. É de se observar que enquanto há um crescimento expressivo no total de artigos sobre FES, o número de trabalhos específicos sobre biorreatores permanece estável e em pequeno número, revelando uma carência de pesquisas com este enfoque.

*Lina María Grajales Agudelo*

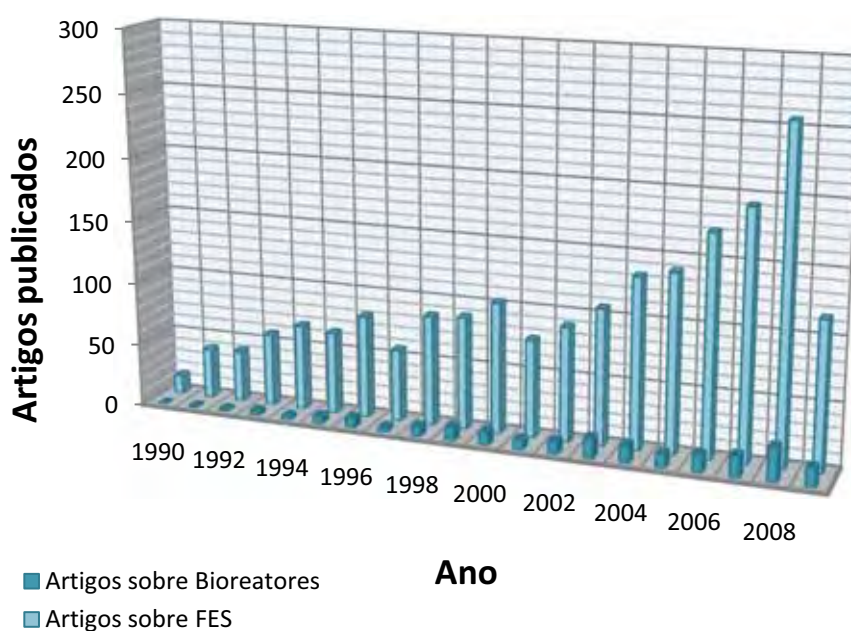


Figura 2.1. Trabalhos publicados sobre FES e indexados pela “Web of Science”.

Uma das razões do grande sucesso da FES é a ampla gama de produtos que pode ser obtida, tais como alcoóis, polissacarídeos, ácidos, enzimas, fungos e bactérias, com aplicações em indústrias de alimentos, farmacêuticas, de cosméticos e de pigmentos, entre outras. Os substratos sólidos comumente empregados podem ser grãos de arroz e seus derivados (ALVES, PEREIRA, 1998), bagaços de cana-de-açúcar (MILAGRES et al., 2002; SENTHIL, DAS, 2004) e de laranja (MARTIN et al., 2004), palha e farelo de trigo (KALOGERIS et al., 2003), sementes de uva (RODRIGUEZ et al., 2006) e farelo de mandioca (ASAGBRA et al., 2005), dentre vários outros. Além destes produtos, a FES pode ser empregada para produzir uma grande variedade de biomoléculas complexas, as quais dificilmente podem ser obtidas por síntese química (IGNATIUS, 2002). Mas, em alguns casos é necessário fazer um pré-tratamento para adequar o substrato às condições adequadas de cultivo, como por exemplo, redução do tamanho das partículas por quebra, hidrólise enzimática, física ou química dos polímeros de açúcar, adição de nutrientes, adequação do pH e umidade e, cozimento com vapor para eliminar contaminantes ou pré-degradar a estrutura molecular (EDUARDO, 2009). Outro fator que faz com que a FES seja de interesse para os pesquisadores é a seletividade do microorganismo com o substrato, com uma conseqüente otimização dos parâmetros no processo e um produto final mais puro (RANI et al., 2009).

Processos por FES podem utilizar um meio poroso inerte, que serve como suporte a um substrato aquoso e, podem utilizar as próprias partículas como fonte de nutrientes aos microrganismos. As reações podem ocorrer na superfície das partículas ou em seu interior, definindo diversos mecanismos de transferência de massa. Parte do interesse científico e industrial pela FES é a possibilidade da utilização de resíduos sólidos como matriz porosa, agregando valor a estes rejeitos e minimizando problemas ambientais devido a descartes inadequados (LAURENTINO, 2007; RANI et al., 2009).

Na FES, fungos crescem e desenvolvem suas atividades metabólicas com grande sucesso porque as condições de cultivo são similares às do seu ambiente natural, tais como rejeitos orgânicos e árvores (IGNATIUS, 2002; RANI et al., 2009). Ademais, a FES apresenta uma série de vantagens sobre a FSb, dentre as quais destacam-se: maior simplicidade do processo, menor espaço requerido e menores custos de implantação e energéticos; maior concentração de produtos e conseqüentemente, maior rendimento; facilidade de extração do produto; maior disponibilidade de oxigênio; menor possibilidade de contaminação devido à menor atividade de água. Mas, existem também algumas desvantagens, como: heterogeneidade térmica do sistema, devido à menor capacidade de dissipação de calor através do meio poroso; distribuição desigual de umidade; possibilidade de colapso da matriz porosa durante o processo, em decorrência do consumo de substrato; heterogeneidade dos produtos obtidos (HESSELTINE, 1972; AIDOO et al., 1982; LONSANE, RAMESH, 1992; FERNANDEZ et al. 1996).

## **2.2 Controle microbiano de pragas**

Um dos maiores desafios da agricultura moderna é possibilitar o aumento da produção agrícola sem a contaminação dos alimentos produzidos, da água e do solo e sem comprometer o meio ambiente. Sob esse ponto de vista, o controle microbiano de insetos tem se destacado em diversas situações como importante alternativa ao controle químico de pragas agrícolas. A respeito dos microrganismos entomopatogênicos usados no controle microbiano, tais como bactérias, vírus, protozoários e fungos, pode-se dizer que, em comparação com os agrotóxicos, os patógenos apresentam não só vantagens econômicas, mas também ambientais, uma vez que não são agressivos ao meio ambiente e ao homem (LACEY, 1995; 2000; FERRON, 1978).

Entre as mais de 700 espécies de fungos já relatadas como causadoras de doenças em insetos, cerca de 20 são patogênicas para pragas de importância econômica, dos quais *Metarhizium anisopliae* é uma das espécies mais estudadas para controle microbiano no mundo.

Atualmente, *M. anisopliae* é produzido no Brasil em biofábricas com aplicações principalmente em cana-de-açúcar, e também em cítricos, hortaliças e pastagens. Seu emprego no Brasil data da década de 70, quando começou a ser utilizado no nordeste para controlar *Mahanarva posticata*, a cigarrinha-da-folha em cana-de-açúcar. Entre 1977 e 1991, foi responsável pelo controle desta praga na região de Alagoas, ao reduzir a infestação em cerca de 72% nos 670 mil ha onde foi aplicado e ao ocasionar uma diminuição na área tratada com agrotóxicos de 150 mil para 30 mil ha por ano (MARQUES, 1992).

Mais recentemente, a crescente utilização de colheita mecanizada na cultura da cana-de-açúcar (cana crua) no estado de São Paulo foi responsável pelo ressurgimento da cigarrinha-da-raiz, praga contra a qual *M. anisopliae* é intensamente utilizado. Na Figura 2.2 a e b apresentam-se duas ilustrações de *Mahanarva fimbriolata* e *Deois flavopicta* depois de serem infectadas e atacadas pelo fungo.



Figura 2.2. Cigarrinha-da-raiz (*Mahanarva fimbriolata*) (a) e Cigarrinha-das-pastagens (*Deois flavopicta*) (b) infectadas pelo fungo *Metarhizium anisopliae*.

Fonte: ROVEDA JUNIOR, 2008.

O atual impulso da indústria sucro-alcóoleira deve contribuir ainda mais para o aumento da demanda do controle biológico, uma vez que a adição de cerca de 40 novas unidades de processamento até 2010 e mais o aumento de capacidade de unidades já instaladas devem dobrar a quantidade de cana moída durante os próximos anos no estado (BATISTA FILHO et al., 2004).



Nesse contexto, as várias biofábricas e laboratórios de usinas no estado de São Paulo, chegaram a produzir no biênio 2002-2003 cerca de 270 toneladas de fungo comercializado junto com o substrato (arroz), tratando uma área de aproximadamente 162 mil ha plantada com cana-de-açúcar. A atividade permitiu a geração de cerca de 150 empregos diretos, originou uma receita bruta de mais de R\$ 2,6 milhões, com uma economia de cerca de R\$120,00 por ha em relação ao controle químico para os produtores, e ainda evitou que mais de 3 mil toneladas de agrotóxicos fossem lançados no ambiente (BATISTA FILHO et al., 2004).

### 2.3 Produção de fungos entomopatogênicos

Embora seja evidente a importância econômica e ecológica da produção de fungos entomopatogênicos, o processo industrial ainda é primário e envolve várias etapas manuais e delicadas que requerem mão de obra extensiva, como mostra o fluxograma da Figura 2.3 (PAMPHILE, 1992). Nas biofábricas as etapas de processamento são realizadas manualmente, o que explica o alto índice de contaminação e perda na produtividade. Além disso, por se tratar de processo manufaturado, há dificuldade na produção em grande escala (LEITE, 2003; ONOFRE, 2001).



Figura 2.3. Diagrama esquemático da produção atual de *M. anisopliae*.

Todas as etapas do processo são realizadas em batelada. Primeiramente, o substrato, em geral arroz tipo 1, é cozido em tanques térmicos a 80°C durante

aproximadamente 4 minutos até atingir consistência firme, que permita o ataque pelo fungo, sem que, no entanto resulte em aglomerados. A quirera não é uma matéria prima desejável já que existe liberação de amido durante seu cozimento, resultando em aglomerados, grandes quantidades de contaminação e baixos índices de produtividade. Após o cozimento, o arroz é retido em peneiras para remover excesso de água, seguido da transferência para sacos de polietileno e posteriormente é levado à esterilização em autoclave. A seguir, os sacos de substrato são levados a um túnel de refrigeração, para serem resfriados por cerca de um dia até atingirem a temperatura ambiente.

Em seguida, a solução inoculante é injetada manualmente em cada saco estéril, em uma câmara de fluxo laminar disposta em uma sala com ar estéril. A incubação é realizada em salas de germinação, com temperatura controlada a 28°C e dotadas de iluminação artificial, de modo a completar o período de incubação. Uma vez terminada a incubação, os sacos com o fungo são levados a salas de secagem, onde são abertos e o processo de secagem ocorre naturalmente. A duração desta etapa depende da umidade do ar no ambiente, sendo sempre superior a 24 horas. Após a secagem, o arroz com o fungo é colocado manualmente em sacos de polipropileno com capacidade de aproximadamente 5,0Kg. Este material é armazenado em câmaras frias, com temperatura em torno de -18 °C e posteriormente distribuído para a venda.

Essa manipulação extensiva tem vários inconvenientes que incluem alta incidência de contaminação, baixa produtividade e insalubridade do ambiente de trabalho (SANTOS, 1978). Por esses motivos há grande dificuldade de produção em grande escala, tornando indispensável desenvolver técnicas e equipamentos que permitam simplificar as operações e obter maior produção do fungo.

## **2.4 Biorreatores para FES**

Em todos os processos fermentativos, o biorreator, proporciona o ambiente para o crescimento e as atividades dos microrganismos, as quais causam a reação biológica (RODRÍGUEZ, 2005). Geralmente, os estudos de FES dividem-se em duas etapas básicas: a escala de frascos, onde as características metabólicas do fungo, sua adaptação ao substrato e as condições operacionais são exploradas, e a escala de reatores, que incorpora os conhecimentos adquiridos na escala de frascos e que propõe soluções tecnológicas para



a produção em larga escala. Os ensaios em escala de frascos podem ser realizados em placas de petri, garrafas de Roux, erlenmeyers ou em sacos plásticos de polietileno. As principais vantagens são a simplicidade, baixo custo, baixo risco de contaminação e flexibilidade de condições operacionais (DURAND et al., 1995; 1988; PANDEY et al., 2001). Nesta escala não há agitação ou aeração forçada, apenas as características do substrato, do microrganismo, da solução inoculante e a temperatura podem ser controladas. Diversas unidades podem ser utilizadas simultaneamente e são indicados para estudos de seleção de microrganismos (DURAND, 2003).

Os biorreatores são mais caros e difíceis de serem construídos, têm um maior número de variáveis que devem ser controladas, incluindo-se as relativas ao ar de refrigeração, são mais susceptíveis à contaminação, são menos homogêneos na distribuição de umidade e de temperatura e, além disso, a quantidade e as características do produto final são mais heterogêneas (DURAND, 2003). As características construtivas dos biorreatores para FES devem prevenir a entrada de organismos contaminantes e evitar a emissão de microrganismos, produtos e substrato para o ambiente. A arquitetura interna tem que promover aeração eficiente, para levar oxigênio aos organismos e remover calor metabólico, manter a uniformidade e integridade do substrato, facilitar as etapas do processo como preparação do substrato, esterilização, recuperação de biomassa e carga e descarga do equipamento (RAGHAVARAO et al., 2002).

Superficialmente, os reatores para FES podem ser divididos entre os de leito estacionário e os de leito móvel como se ilustra nas Figuras 2.4 e 2.5 (PANDEY et al., 2000; DURAND, 2003, RAGHAVARAO et al., 2002; PERES, 2001).

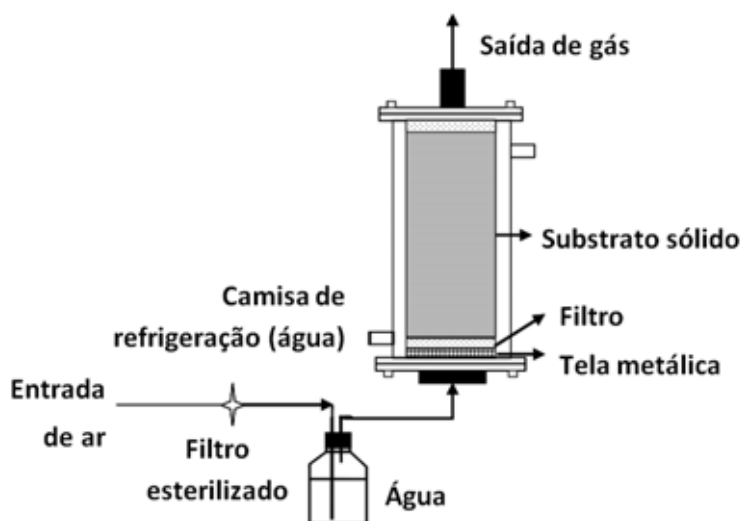


Figura 2.4. Esquema de biorreatores de leito fixo.

Fonte: RODRIGUEZ, 2006.

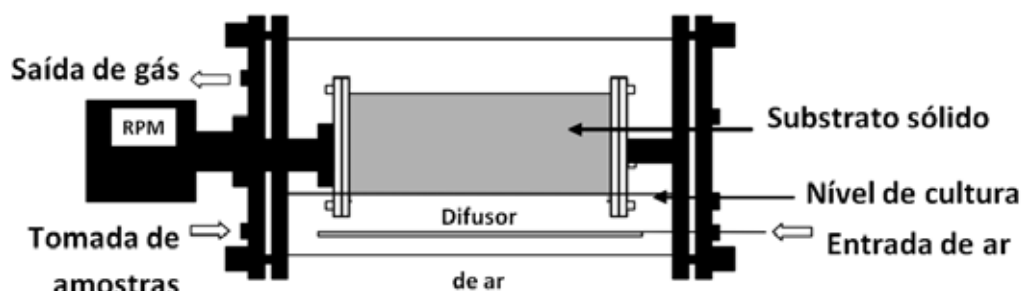


Figura 2.5. Esquema de biorreatores de tambor rotativo.

Fonte: RODRIGUEZ, 2006.

Os reatores de leito fixo mais comuns são os tubulares, de fácil construção, operação e manutenção e constituem um dos primeiros passos para a transposição dos estudos em escala de frascos para os de bancada. Em geral, consistem em tubos verticais encamisados, empacotados com os substratos já inoculados e percolados por ar. Os maiores inconvenientes desta configuração são a não homogeneidade térmica e a possibilidade de ocorrência de regiões com baixa aeração, afetando a taxa, a velocidade e a seletividade das reações (ASHLEY et al., 1999). A ampliação de escala é uma dificuldade adicional, uma vez que o aumento do diâmetro do tubo implica no afastamento da parede do reator das porções mais centrais do leito, agravando a dificuldade de remoção do calor metabólico (ASHLEY et al., 1999; MITCHEL et al., 2002; CHINN, 2003).

Os de leito móvel assemelham-se a secadores de tambor rotativo, empregados com frequência na secagem de materiais particulados, como o açúcar, por exemplo. Neste tipo de secador, um tambor é feito girar com baixa rotação e chicanas internas revolvem o material sólido. Ar, preferivelmente saturado, percola longitudinalmente o tambor, de modo que o contato entre a fase sólida e a fluida é intenso, conferindo grande homogeneidade térmica a estes sistemas. Atualmente, para operações em larga escala, utiliza-se o resfriamento evaporativo para remover calor do leito durante a geração de calor metabólico dos microrganismos (RANI et al., 2009).

No entanto, para fungos filamentosos, os tambores rotativos podem não ser indicados, devido ao rompimento do micélio, interferindo negativamente na atividade microbiana e comprometendo a produtividade (ASHLEY et al., 1999; PANDEY et al., 2000; DURAND, 2003; RAGHAVARAO et al., 2002; RODRIGUEZ, 2005). Porém, os primeiros

resultados de resistência à agitação mecânica para *M. anisopliae*, encontrados por Roveda Júnior (2008) mostraram que não houve diferença estatisticamente significativa entre os tratamentos da produção do fungo com rotação e sem agitação do reator. A rotação do cilindro foi realizada a 1 RPM, uma e quatro vezes por dia, durante os 10 dias de incubação do fungo. Roveda Júnior (2008) argumentou que a alta tolerância à agitação deveu-se à estrutura celular filamentosa do fungo, constituída por hifas ramificadas e septadas, não observando influência na produtividade final dos conídios.

## 2.5 Movimentação das partículas em tambores rotativos

### 2.5.1 Número de Froude e Grau de enchimento

A forma de movimentação do material sólido no cilindro rotativo tem um papel muito importante na distribuição da temperatura e é considerada como função de algumas variáveis de operação, as quais dependem do número de Froude e do grau de enchimento do tambor.

O número de Froude ( $Fr$ ) é calculado como a relação entre a força centrífuga exercida sobre as partículas e a força da gravidade.

$$Fr = \frac{\omega^2 R}{g} \quad 2.1$$

Onde  $R$  é o raio do cilindro,  $g$  é a aceleração da gravidade e  $\omega$  é a velocidade angular. A velocidade angular ( $\omega$ ) se calcula por meio da frequência ou velocidade de rotação,  $F$ .

$$\omega = 2\pi F \quad 2.2$$

O grau de enchimento ( $f$ ) é definido como a razão entre a seção transversal do cilindro ocupada pelas partículas e o cilindro, como se ilustra na Figura 2.6.

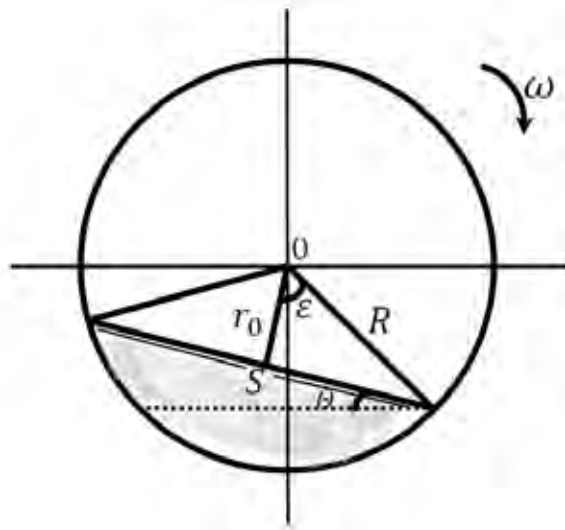


Figura 2.6. Diagrama esquemático da seção transversal do cilindro.

Então,

$$f = \frac{\text{área das partículas}}{\text{área do cilindro}} \quad 2.3$$

Portanto:

$$f = \frac{\text{Segmento circular} - \text{área do triângulo}}{\text{área do cilindro}} \quad 2.4$$

$$f = \frac{1/2 R^2 (2\varepsilon) - r_0 S / 2}{\pi R^2} \quad 2.5$$

Da geometria do ângulo  $\varepsilon$ :

$$f = \frac{R^2(\varepsilon) - R \cos(\varepsilon) \times 2^{R \sin(\varepsilon)} / 2}{\pi R^2} \quad 2.6$$

$$f = \frac{R^2(\varepsilon - \cos(\varepsilon) \times \sin(\varepsilon))}{\pi R^2} \quad 2.7$$

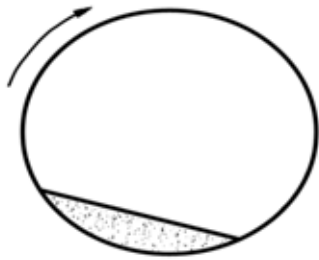
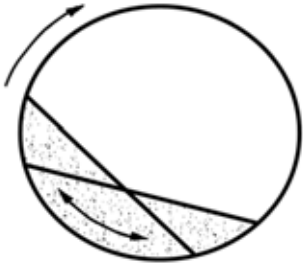
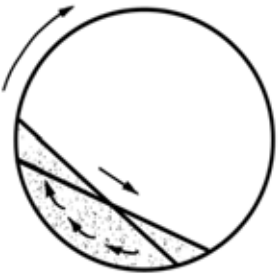
$$f = \frac{(\varepsilon - \cos(\varepsilon) \times \sin(\varepsilon))}{\pi} \quad 2.8$$

A corda do cilindro define a trajetória linear que descreve cada partícula:

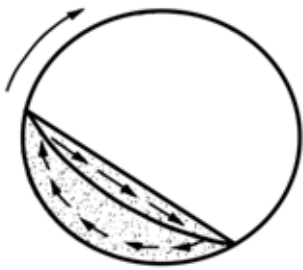
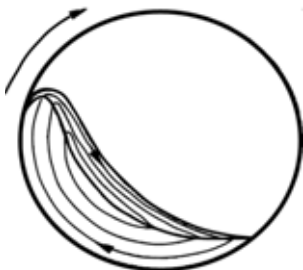
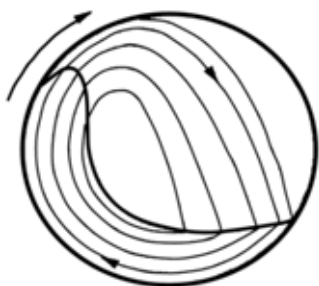
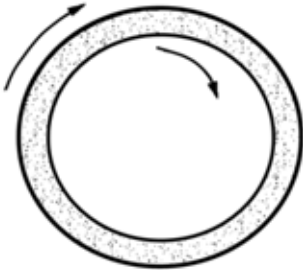
$$S = 2R \times \text{sen}(\varepsilon) \quad 2.9$$

O movimento de alguns materiais particulados em cilindros de tambor rotativo, como esferas de vidro (1, 2 e 3 mm de diâmetro), grãos de areia, esferas de aço, cilindros de aço, carvão ativado (0,55, 0,75 e 8 mm de diâmetro), pellets de fertilizante (HENEIN et al., 1983; MELLMANN, 2004), quartzo (MELLMANN, 2001), grãos de café (CRISTO, 2006), pellets de polietileno (BOATENG, 1996), entre outros materiais, pode ser classificado de acordo o Quadro 2.1.

Quadro 2.1. Formas do movimento transversal de partículas sólidas em cilindros rotativos.

CARACTERÍSTICAS	ESQUEMA
<b>Forma básica:</b> Movimento deslizante (slipping motion) <b>Subtipo:</b> Deslizante (sliding) <b>Número de Froude:</b> $0 < Fr < 10^{-4}$ <b>Grau de enchimento:</b> $f < 0,1$	
<b>Forma básica:</b> Movimento deslizante (slipping motion) <b>Subtipo:</b> Oscilatório (surging) <b>Número de Froude:</b> $0 < Fr < 10^{-4}$ <b>Grau de enchimento:</b> $f > 0,1$	
<b>Forma básica:</b> Movimento em cascata (cascading motion) <b>Subtipo:</b> Queda (slumping) <b>Número de Froude:</b> $10^{-5} < Fr < 10^{-3}$ <b>Grau de enchimento:</b> $f < 0,1$	

Quadro 2.1. Continuação.

CARACTERÍSTICAS	ESQUEMA
<b>Forma básica:</b> Movimento em cascata (cascading motion) <b>Subtipo:</b> Rolante (rolling) <b>Número de Froude:</b> $10^{-4} < Fr < 10^{-2}$ <b>Grau de enchimento:</b> $f > 0,1$	
<b>Forma básica:</b> Movimento em cascata (cascading motion) <b>Subtipo:</b> Cascata (Cascading) <b>Número de Froude:</b> $10^{-3} < Fr < 10^{-1}$ <b>Grau de enchimento:</b> $f > 0,1$	
<b>Forma básica:</b> Movimento catarata (catarating) <b>Subtipo:</b> Catarata (Catarating) <b>Número de Froude:</b> $0,1 < Fr < 1$ <b>Grau de enchimento:</b> $f > 0,2$	
<b>Forma básica:</b> Movimento catarata (catarating) <b>Subtipo:</b> Centrífuga (centrifuging) <b>Número de Froude:</b> $Fr \geq 1$ <b>Grau de enchimento:</b> $f > 0,2$	

Fonte: Mellmann, 2001.

Movimento deslizante (slipping motion).

As condições de fricção entre a parede do cilindro e o leito de partículas sólidas não são suficientemente favoráveis para promover uma mistura. Deste modo, este regime é

pouco prático para aplicações industriais. Nestes casos é recomendável fazer uso de chicanas ou defletores que contribuam para a movimentação das partículas.

As duas principais formas de movimentação neste regime são deslizante (sliding) e oscilatória (surging). O movimento deslizante (sliding) ocorre quando as paredes do biorreator são muito lisas e os sólidos patinam continuamente. Geralmente as partículas estão sob um pequeno ângulo de deflexão e permanecem em repouso. Aumentando atrito entre a parede e as partículas, o movimento pode ser convertido em oscilatório (surging), onde a movimentação é caracterizada pela alternância periódica do atrito entre o leito e a parede.

#### Movimento em cascata (cascading motion).

Existe atrito suficiente entre a parede e as partículas para manter a circulação contínua das partículas no leito e, dependendo da velocidade de rotação e do tamanho das partículas, pode-se observar os movimentos de partículas em queda (slumping), partículas rolante (rolling) e partículas em cascata (cascading).

O movimento de partículas em queda (slumping) acontece para baixas velocidades de rotação, para as quais o corpo sólido se movimenta junto com a parede, graças à rotação, e as partículas começam a se elevar até terem energia potencial suficiente para que a camada superficial mova-se como um bloco em forma de cunha, ocorrendo periodicamente.

Na medida em que aumenta a frequência de rotação obtém-se o movimento de partículas rolante (rolling), o qual é caracterizado por uma camada de partículas com fluxo uniforme e contínuo na superfície, enquanto que a camada espessa, denominada camada de fluxo-pistão, é transportada à parte de cima devido à rotação. Devido à agitação, as partículas têm uma boa mistura, e este regime é ideal para aplicações industriais, como fornos, reatores rotativos e tambores de mistura.

O incremento do tamanho das partículas favorece a separação das mesmas em altas velocidades de rotação, começando a se formar um arco com um pequeno espaço de ar no interior, obtendo-se o movimento de partículas em cascata (cascading). A cascata é diretamente proporcional ao tamanho de partícula e o arco à velocidade rotacional. Orpe (2001) indicou que para baixos números de Froude o perfil de velocidade de partículas na

camada superficial é simétrico para o movimento de partículas rolante. A espessura dessa camada incrementa com o número de Froude e com o incremento da relação  $d/D$  (diâmetro de partícula/ diâmetro do cilindro).

No interior de um biorreator de leito móvel, as partículas sólidas criam um ponto frio onde a posição e a temperatura não podem ser medidas com precisão devido ao movimento transversal dos sólidos, conseqüentemente, é difícil estudar a transferência de calor nos cilindros rotativos. O transporte de calor através das partículas do leito ocorre, principalmente, através da absorção de calor do lado da superfície que esta em contato com o gás, chamada camada cascada, até se misturar com as partículas frias das camadas que estão no interior do leito; neste caso, a distribuição de temperatura terá o ponto frio localizado quase no centro geométrico do leito agitado (MELLMANN, 2001).

Comumente, os secadores rotativos são operados a baixas velocidades de rotação, mas, a mistura das partículas permite melhorar a transferência de calor, massa e sua homogeneidade graças aos movimentos de partículas em queda (slumping) e partículas rolante (rolling) do regime em cascata (MELLMANN, 2004). Kelbert et al. (1991) estudou a mistura das partículas e a transferência de calor em um leito no regime de partículas rolante, demonstrando que a mistura tem uma grande influência na distribuição de temperatura dentro do leito de sólidos. Boateng et al. (1996) encontraram que o movimento de partículas rolante era melhor do que o movimento de partículas em queda (slumping) porque a superfície podia ser renovada constantemente e como consequência, melhorava a taxa de transferência de calor.

#### Movimento catarata (catarating).

As velocidades de rotação são altamente pronunciadas e as partículas começam a se separar individualmente do leito formando um espaço livre dentro do cilindro. Este tipo de movimento é subdividido em movimento em catarata (catarating) e centrífugo (centrifuging). O movimento em catarata (catarating) é diferenciado pelo espaço de gás que se forma entre as partículas aderidas ao leito e as que estão sendo separadas devido à alta rotação. Quando a velocidade de rotação aumenta, as partículas vão descrevendo uma trajetória que se aproxima do raio do cilindro, onde  $r \sim R$  aderindo-se à parede do tambor para alcançar o movimento centrífugo (centrifuging).



### 2.5.2 Ângulo de repouso dinâmico

Além do número de Froude e do grau de enchimento das partículas sólidas dentro do cilindro, sua forma de movimentação varia geometricamente segundo o valor do ângulo de repouso dinâmico ( $\Theta$ ). O ângulo repouso dinâmico ( $\Theta$ ) é calculado pela geometria do sistema segundo a Figura 2.6.

Os materiais com superfícies lisas, altos valores de esfericidade e formas e tamanhos definidos possuem menores ângulos de repouso dinâmico (McCABE, 1991), fazendo com que o fluxo de partículas se comporte de acordo com a região 2 da Figura 2.7. Isto afeta a distribuição radial das partículas sólidas assim, a zona alta toma um valor menos elevado do que a mesma zona para partículas com maior ângulo de repouso, conseqüentemente, a zona baixa apresenta o comportamento inverso (SANTOMASO, 2004).

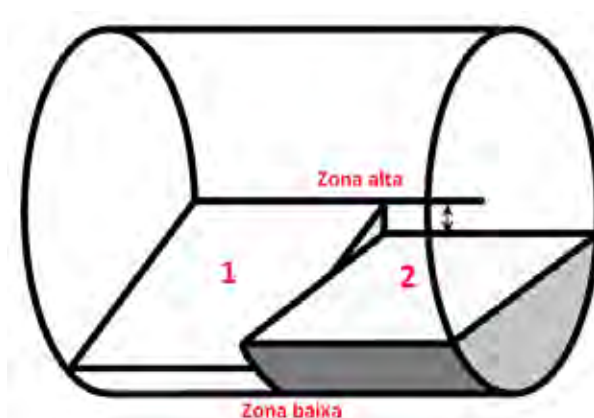


Figura 2.7. Efeito geométrico da diferença no ângulo de repouso dinâmico.

Fonte: SANTOMASO, 2004.

## Capítulo 3

# Materiais e Métodos

O trabalho experimental desta dissertação de Mestrado foi desenvolvido nos laboratórios do Departamento de Engenharia e Tecnologia de Alimentos do IBILCE – UNESP.

### 3.1 MATERIAIS

#### 3.1.1 Partículas

Na avaliação da homogeneidade de mistura e na movimentação das partículas dentro do cilindro rotativo de acrílico utilizou-se arroz comercial Tipo 1, adquirido no comércio local, já que é o substrato industrialmente usado para a produção de *M. anisopliae*. Nos experimentos de molhabilidade do leito sólido foram usadas partículas de sílica gel, cujas principais características foram especificadas pela empresa fornecedora Synth, sendo estas apresentadas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1. Propriedades físicas da sílica gel\*.

Característica	Quantidade
Densidade aparente	0,779 g/cm <sup>3</sup>
Diâmetro médio	6 mm ± 2 mm
Absorção mínima água	20 %
Máximo de impurezas	2 %
Peso molecular do SiO <sub>2</sub>	60

\*Fonte: Dados especificados pela empresa Synth, fornecedora do material.

*Lina María Grajales Agudelo*

Os experimentos de homogeneidade térmica e distribuição de temperatura foram realizados com esferas de vidro, já que o vidro é amplamente empregado em ensaios de transferência de calor para diversos tipos de leito, e permite uma comparação mais direta com a literatura. Na Tabela 3.2 são apresentadas as propriedades das esferas de vidro.

Tabela 3.2. Propriedades físicas das esferas de vidro.

Característica	Quantidade
Densidade aparente **	1,435 g/cm <sup>3</sup>
Diâmetro médio **	0,3 cm
Absorção mínima de água *	0
Gravidade específica a 25°C *	2,23
Calor específico médio *	0,9755 KJ/Kg × K
Condutividade térmica *	1,0817 W/m × K

\*Fonte: PERRY, 1973.

\*\*Fonte: Dados especificados pela empresa fornecedora Polo Ar Jateamento.

### 3.1.2 Equipamentos

Em todos os ensaios realizados neste trabalho foram empregados tambores rotativos de 30 cm de diâmetro interno por 60 cm de comprimento, totalizando aproximadamente 42,4L de volume.

#### 3.1.2.1 Protótipo de acrílico

Um protótipo construído em acrílico nas dimensões mencionadas foi empregado nos experimentos de movimentação e distribuição de partículas de arroz, como também na avaliação da molhabilidade do leito de sílica gel. Este equipamento contou com quatro defletores longitudinais retos, que forneceram uma boa mistura, e dois tubos de acrílico de 2 cm de diâmetro externo que simularam a alimentação de ar, vapor e água do biorreator rotativo para fermentação, construído em aço inoxidável, conforme descrição adiante.

O material de construção do equipamento, em acrílico transparente, permitiu a filmagem das partículas em seu interior e a captura de imagens para sua posterior análise. Na Figura 3.1 mostra-se o diagrama esquemático do tambor de acrílico e na Figura 3.2 é apresentada uma fotografia do mesmo.

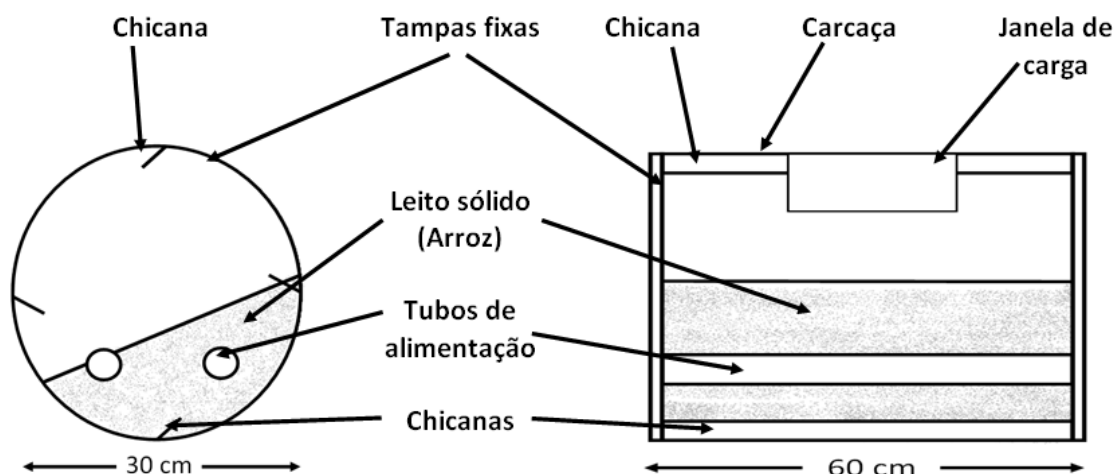


Figura 3.1. Diagrama esquemático do protótipo construído em acrílico (a. Corte transversal; b. Corte longitudinal).



Figura 3.2. Fotografia do sistema de acrílico.

O equipamento permaneceu suportado em uma estrutura metálica, a qual contou com dois roletes que foram movimentados através de um motor elétrico. Este, por sua vez, estava conectado a uma fonte de corrente contínua que foi a responsável pela variação na frequência de rotação do tambor, desde 0 até 7 RPM. O volume total do tambor, de 42,4 L, fez com que o cilindro possuísse uma capacidade de armazenamento máxima de 28 Kg de arroz cozido, com 40% de umidade (b.u), permitindo também, utilizar a carga como variável controlada.

Além disso, foi adaptado um tubo dotado de 3 aspersores agrícolas de cone cheio, identificados como 1, 2 e 3 na Figura 3.3. Através do tubo, água foi bombeada por uma bomba de engrenagens MICROPUMP COLE-PARMER, até ser aspergida ao leito.

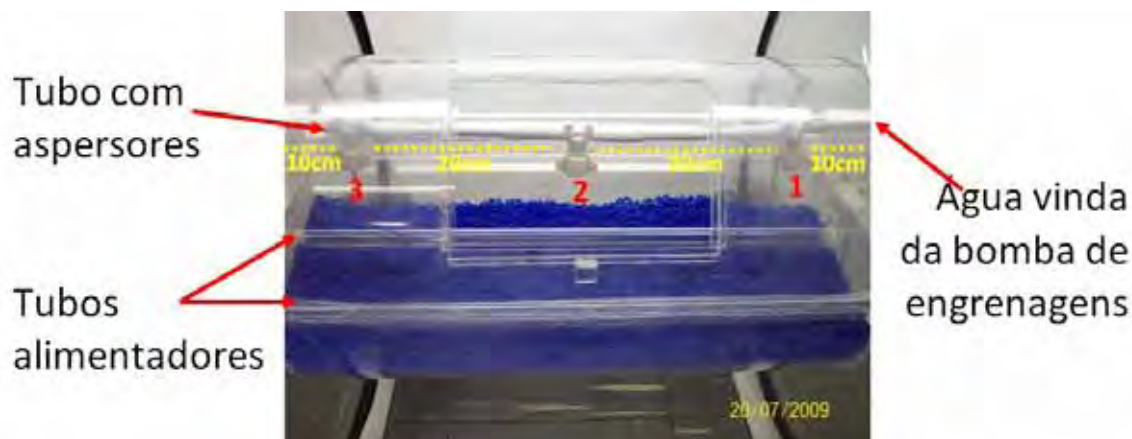


Figura 3.3. Sistema de aspersão de água.

### 3.1.2.2 Biorreator

Quando aplicado a ensaios de fermentação para produzir esporos do fungo *M. anisopliae*, o equipamento construído em aço inoxidável, deve ter a capacidade de cozinhar, esterilizar e inocular o substrato, aerar o sistema durante o desenvolvimento do fungo e secar o meio reacional ao final do processo. No presente trabalho, o reator foi empregado apenas para os estudos de transferência de calor. Portanto, foi necessário avaliar a capacidade de manter as condições exigidas de temperatura, empregando-se partículas inertes. Na Figura 3.4 é apresentado o diagrama esquemático para todo o sistema de ensaios térmicos, incluindo o biorreator e os periféricos e na Figura 3.5 uma fotografia do mesmo. Na Figura 3.4, os itens de 1 a 4 foram responsáveis pelo controle do ar fornecido ao reator, mantendo temperatura e vazão constantes. O ar, fornecido por um compressor (1) teve a vazão regulada por uma válvula de agulha (2). Antes da entrada no fermentador, a vazão do ar foi medida com um rotâmetro (3) e o gás passou por uma resistência elétrica (4) que, através do ajuste da temperatura, garantiu as condições desejadas para o processo. No fermentador (5) foi possível monitorar as mudanças na temperatura através de sensores (6) que permaneceram conectados a um indicador de temperaturas (7). A temperatura da camisa de refrigeração foi controlada e mantida constante por meio de um banho termostático (9) e sua circulação foi realizada através de uma bomba centrífuga (8).

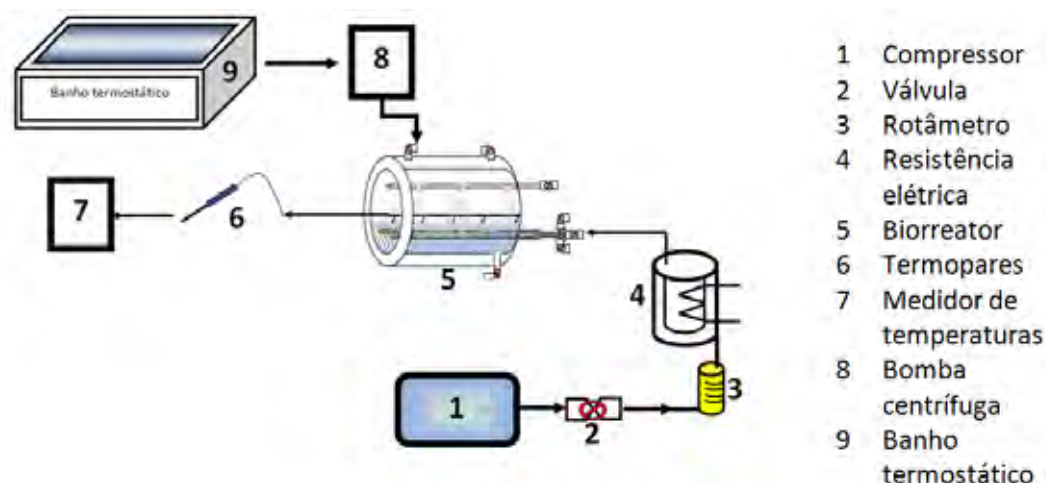


Figura 3.4. Diagrama esquemático do conjunto para os ensaios térmicos.



Figura 3.5. Fotografia do biorreator para FES.

Na Figura 3.6 é esquematizado o biorreator, o qual, contou com uma tubulação para suprimento de ar (6) e tubulações auxiliares que forneceram água de resfriamento e solução inoculante ao meio (3), necessários para o crescimento do microrganismo. O tambor foi encamisado (8), para melhorar a uniformidade térmica do sistema. As temperaturas de entrada (1) e de saída (2) da água da camisa foram medidas. A aeração do leito aconteceu graças a duas tubulações perfuradas (6) no interior do reator. Deste modo, o escoamento do ar ocorreu preferencialmente de forma radial, percorrendo uma curta distância entre o tubo e a parede. Além disso, o equipamento continha um tubo com três atomizadores (4) que foram utilizados para aspergir a água ao meio de partículas sólidas.

Finalmente, as medidas de temperatura foram tomadas na superfície das partículas (5), na interfase com o ar, e no fundo das mesmas (7), perto da parede da camisa, através de termopares fixos inseridos no leito. Dentro do poço térmico foram colocados 5 termopares e foram dispostos longitudinalmente a 10, 20, 30, 40 e 50 cm do comprimento



total do tambor e, foram identificados como 1, 2, 3, 4 e 5, desde a alimentação de ar até o extremo oposto do reator. Devido ao grau de enchimento e ao arranjo mecânico do tubo, os termopares permanecem sempre na mesma posição no leito de partículas sólidas. Na figura 3.7 é apresentado uma fotografia do interior do biorreator.

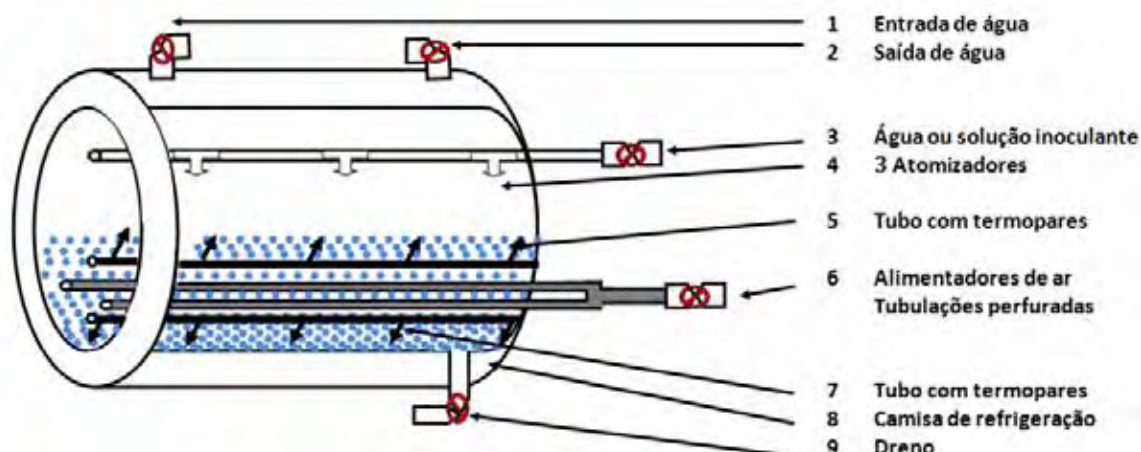


Figura 3.6. Diagrama esquemático do biorreator.

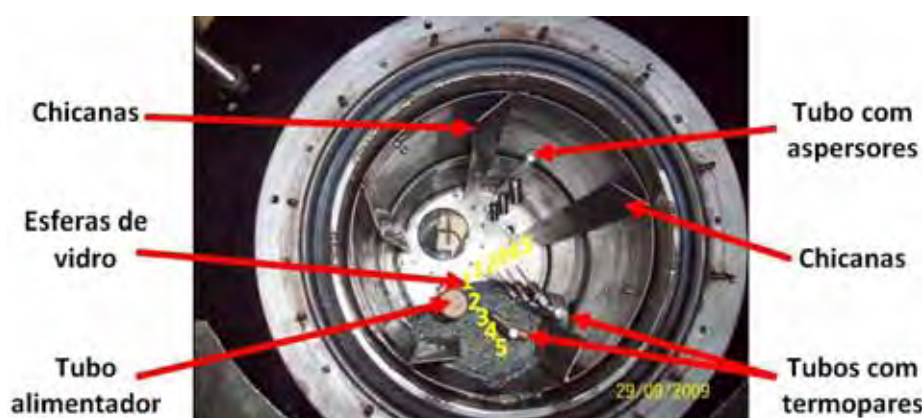


Figura 3.7. Fotografia interna do biorreator.

O reator foi suportado por dois roletes de metal. O movimento rotacional foi dado por um sistema de correntes e engrenagens conectadas a um motor elétrico acionado por um variador de frequências, de modo que a rotação foi uma variável controlada. Ademais, o tambor contou com cinco chicanas, que ajudaram na mistura das partículas e, adicionalmente, serviram como área estendida da parede, provocando um efeito de transferência de calor tipo aleta.

## 3.2 MÉTODO EXPERIMENTAL

### 3.2.1 Caracterização das partículas de arroz

O material utilizado nos ensaios de mistura das partículas foi arroz comercial tipo 1, cozido por imersão em água a 80°C durante 4 minutos. O objetivo principal deste cozimento foi simular as atuais condições da produção do fungo *M. anisopliae* encontradas na indústria *MethaVida*, de Catanduva (SP), um produtor de esporos deste fungo. Posterior à cocção, o arroz foi seco ao ambiente durante 2 horas, para retirar o excesso de umidade da superfície das partículas. Na Tabela 3.3 são apresentadas as condições de processamento. O arroz tingido de preto, necessário na aplicação da técnica de traçadores coloridos, foi submetido às mesmas condições de cozimento e secagem do que o arroz branco. A tintura empregada para tingir o arroz foi corante para tecidos de algodão, marca Guaraní, adquirida no comércio local, na qual um pacote de 40 g foi diluído em 1 L de água, como indicado nas instruções. Esta quantidade de água foi suficiente para tingir e cozinhar 500 g de arroz.

Tabela 3.3. Condições de processamento do arroz branco e o arroz tingido de preto.

Característica	Quantidade
Tempo de cozimento	4 minutos
Temperatura de cozimento	80 °C
Tipo de cozimento	por imersão
Secagem ao ambiente	2 horas
Umidade após a cocção*	40%

\*Fonte: ROVEDA JUNIOR, 2008.

Para efeitos da caracterização, foi contada a quantidade de grãos de arroz contida em aproximadamente 2 g do material. Destes dados foi possível determinar a quantidade de sementes por cada grama, a quantidade de sementes por cada libra e o peso médio de cada partícula. O volume médio dos grãos foi determinado por contagem do número de grãos contidos em um recipiente de volume conhecido. A densidade aparente foi definida pela Equação 3.1 e foi medida por pesagem da massa contida em um beaker de 500 mL. Este procedimento foi realizado 5 vezes para ambos os tipos de arroz.

$$\rho_{ap} = m/V_{ap} \quad 3.1$$



onde  $m$  é a massa total de sólidos,  $\nabla_{ap}$  o volume aparente e  $\rho_{ap}$  a densidade aparente das partículas.

### 3.2.2 Mistura das partículas

#### 3.2.2.1 Técnica de traçadores

A finalidade deste procedimento metodológico foi avaliar se a arquitetura do reator favorece a circulação das partículas e detectar a existência de pontos de estagnação. Ao mesmo tempo, procurou-se verificar as melhores condições que fornecem uma boa mistura das partículas em virtude dos elementos construtivos do tambor.

A técnica de traçadores coloridos consistiu em colocar uma quantidade de arroz com duas concentrações conhecidas, uma de arroz tingido de preto e a outra de arroz branco, na seção longitudinal do tambor, conforme pode ser visto na Figura 3.8. Neste trabalho empregou-se 10% de arroz tingido de preto e 90% de arroz branco (em massa), a menos de alguns ensaios em que foram empregadas concentrações de 50% de cada material.



Figura 3.8. Condição inicial da técnica de traçadores coloridos (a. Vista frontal; b. Vista lateral).

Imediatamente após colocar o arroz na posição indicada, o tambor de acrílico foi posto a girar. Depois de cada giro, o cilindro foi imobilizado e, através da janela de carga, sob condições de iluminação controladas, a parte média da superfície das partículas foi fotografada no centro geométrico do leito. Cada fotografia foi digitalizada no formato de imagem *bmp* e analisada mediante o *software* de análise de imagem *Lenseye* (*E&CS Programs, EUA*) para determinar a concentração de traçador em cada amostra. Simultaneamente, com uma pá plana foram tomadas amostras da superfície das partículas

*Lina María Grajales Agudelo*

de arroz, retirando-se aproximadamente 1 g. As amostras foram separadas manualmente e pesadas para o cálculo da porcentagem de traçador. O tambor foi girado até obter-se mistura homogênea. O critério de homogeneidade adotado foi de  $10\% \pm 3\%$  de concentração do traçador, dado que a curva de calibração realizada com o *software Lenseye* estabeleceu uma margem de erro de 3%.

Os experimentos de homogeneidade de partículas foram avaliados em função da quantidade de carga dentro do cilindro (5, 10 e 15 Kg), velocidade de rotação (1, 4 e 7 RPM) e a presença e ausência de tubos internos. Na Tabela 3.4 são apresentadas estas variáveis com seus respectivos níveis. A variável de resposta foi o número de giros necessários à homogeneização das partículas.

Tabela 3.4. Variáveis independentes nos testes de homogeneidade de partículas.

Variável	Níveis		
Frequência (RPM)	1	4	7
Carga (Kg)	5	10	15
Tubos	com	sem	

### 3.2.2.2 Calibração do *software Lenseye*

Para análise dos resultados dos ensaios de mistura foi necessário calibrar-se o *software Lenseye*. Assim, amostras de aproximadamente 10 g de arroz foram preparadas nas concentrações de traçador mostradas na Tabela 3.5. Estas amostras foram colocadas em placas de petri, e sob condições de iluminação controladas, foram fotografadas e digitalizadas no formato de imagem *bmp* para serem carregadas no *software*. Porém, no sistema real de análise, o tambor rotativo, existe uma alta probabilidade de encontrar partículas de arroz na posição em pé e na posição deitada, por esta razão, além de avaliar concentrações de traçador, também foram avaliadas diferentes porcentagens de arroz preto em pé (0, 25, 50, 75 e 100%) para cada concentração de traçador, como mostrado no exemplo da Figura 3.9.

Tabela 3.5. Concentrações de traçador avaliadas na curva de calibração do *Lenseye*.

Concentração de traçador (% em massa)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100



Figura 3.9. Amostra preparada de 1% de traçador para 0% (a), 25% (b), 50% (c), 75% (d) e 100% (e) de traçador em pé.

A avaliação de cada imagem foi realizada pelo *software* de duas formas diferentes. A primeira consistiu em que o *Lenseye* forneceu uma contagem das partículas pretas e esse valor foi relacionado diretamente com a concentração correspondente. Na segunda forma, o *software* fez uma contagem da área preta, e assumiu-se que essa área correspondeu à concentração de traçador.

### 3.2.3 Visualização do movimento das partículas

A parte final dos experimentos de mistura de partículas constituiu o ponto de partida para os testes de movimentação. No momento em que a homogeneidade foi atingida começaram a se realizar filmagens do cilindro de acrílico pela parte frontal, empregando-se uma filmadora digital SONY, modelo DCR-DVD408. Estes testes foram feitos em duas etapas. A primeira etapa, completamente qualitativa, na qual o registro de imagens permitiu detectar e verificar os pontos de estagnação em virtude dos elementos internos do tambor e, a segunda etapa, quantitativa, permitiu calcular as velocidades das partículas, em três diferentes regiões do leite, como é mostrado na Figura 3.10.

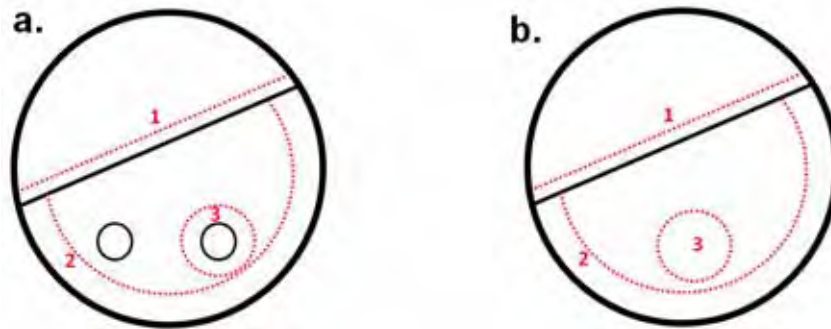


Figura 3.10. Regiões de velocidades avaliadas (a. Testes com tubos internos; b. Testes sem tubos internos).

As velocidades dos ensaios realizados com tubos internos, Figura 3.10a, foram calculadas em: superfície livre do leito (1), desde que as partículas entram na superfície livre e descem, até o momento em que atingem o fundo; do lado da parede do cilindro (2), desde que as partículas deixam a superfície livre e começam a subir do lado da parede, até que alcançam a superfície livre; em torno dos tubos alimentadores (3), delimitando uma área circular com diâmetro de 4 cm, ou seja, 2 cm de distância do diâmetro externo dos tubos. Nos ensaios sem tubos, Figura 3.10b, as velocidades nas áreas 1 e 2 foram calculadas como descrito anteriormente e, na posição média entre os dois tubos (3), para uma área circular com diâmetro de 4 cm. Segundo as Figuras 3.10a e 3.10b, as velocidades das partículas na região 2 correspondem à velocidade rotacional do tambor, fornecidas por:

$$v = R \times \omega \quad 3.2$$

onde  $v$  é a velocidade da partícula ao lado da parede,  $\omega$  é a velocidade angular, a qual foi determinada pela Equação 2.2, e  $R = 0,30 \text{ m}$ . Nas regiões 1 e 3, as velocidades foram calculadas por:

$$v = \frac{S}{t} \quad 3.3$$

onde  $v$  é a velocidade da partícula e  $S$  é a distância percorrida pela mesma partícula durante o tempo  $t$ .

A distância  $S$  foi medida para as regiões 1 e 3 de duas formas diferentes. Para a região 1, na superfície livre do leito, a distância  $S$  foi medida através da Equação 2.9. Esta Equação 2.9 requer do ângulo médio do segmento circular ocupado pelos sólidos dentro do cilindro,  $\varepsilon$ , para ser determinada; neste caso, o ângulo  $\varepsilon$  foi calculado por geometria como se

ilustra na Figura 2.6, empregando-se o *software* gráfico *Corel Draw X3 versão 13* (Corel Co.). Na região 3, em torno dos tubos alimentadores (Figura 3.10a) e na posição média entre os dois tubos (Figura 3.10b), a distância  $S$ , correspondeu ao perímetro de um círculo de 4 cm para uma partícula qualquer da região, ou seja:

$$S = \pi \times D_{do\ lado\ do\ TUBO} = \pi \times 0,04\ m = 0,1256\ m \quad 3.4$$

O tempo,  $t$ , que demoram as partículas para percorrer a distância  $S$ , nas regiões 1 e 3 da Figura mencionada foi determinado através do *software* *Picture Motion Browser* (Sony Co.) de edição de vídeo. O *software* forneceu as ferramentas necessárias para fazer medições de tempo na faixa de milissegundos.

Assume-se que as velocidades determinadas nas três regiões de análise são próximas às velocidades que levam as partículas, nas mesmas regiões, no interior do leito.

### 3.2.4 Grau de enchimento e regime de escoamento

#### 3.2.4.1 Grau de enchimento

Com a finalidade de reproduzir de maneira confiável os experimentos de movimentação e distribuição de partículas, molhabilidade e homogeneidade térmica para os diferentes materiais empregados, foi necessário padronizar a quantidade de material carregado em todos os níveis avaliados. Para tal efeito, foram calculados os graus de enchimento,  $f$ , para 5, 10 e 15 Kg de arroz cozido através da Equação 2.8. Onde os ângulos de enchimento,  $\varepsilon$ , foram determinados conforme descrição da Seção 3.2.4.1 do presente trabalho. Posteriormente, procedeu-se ao cálculo do volume total de material necessário de cada grau de enchimento.

O volume total de material particulado conseguiu-se multiplicando a área dos sólidos pelo comprimento do cilindro, ou seja:

$$V_{ap} = \text{área}_{sólidos} \times \text{Comprimento}_{cilindro} \quad 3.5$$

onde  $\forall_{ap}$  é o volume das partículas e a  $\text{área}_{\text{sólidos}}$  segundo a definição do grau de enchimento:

$$\text{área}_{\text{sólidos}} = \text{Grau de enchimento} \times \text{área}_{\text{cilindro}} \quad 3.6$$

Substituindo a Equação 3.6 na Equação 3.5:

$$\forall_{ap} = f \times \pi R^2 \times L \quad 3.7$$

Substituindo a Equação 2.8 na Equação 3.7:

$$\forall_{ap} = (\varepsilon - \cos(\varepsilon) \times \text{sen}(\varepsilon)) \times R^2 \times L \quad 3.8$$

Uma vez calculado o volume de cada nível, por meio do valor da densidade aparente, determinou-se a massa dos materiais particulados, ou seja, das esferas de sílica gel e das esferas de vidro, mediante:

$$m = \forall_{ap} \times \rho_{ap} \quad 3.9$$

#### 3.2.4.2 Regime de escoamento

Os regimes e sub-regimes de escoamento de partículas sólidas foram classificados através do Quadro 2.1 e dos vídeos analisados na Seção 3.2.3 do presente trabalho. O Quadro 2.1 mostra que os modelos físicos de movimentação provêm do número de Froude,  $Fr$ , e do grau de enchimento,  $f$ . O grau de enchimento foi determinado na seção anterior e o valor de  $Fr$  foi calculado pela Equação 2.1. O ângulo de repouso dinâmico ( $\Theta$ ) para arroz branco e para o arroz misturado nas concentrações de 10 e 50% de traçador foi determinado, com o objetivo de eliminar as suspeitas de que as características de escoamento do arroz branco e o arroz tingido afetam a movimentação das partículas. Também, o ângulo de repouso dinâmico foi determinado para as esferas de sílica gel e as esferas de vidro com a finalidade de comparar o comportamento dos materiais. Esse ângulo de repouso dinâmico foi medido geometricamente como se ilustra na Figura 2.6, com ajuda do software de gráfico *Corel Draw X3 versão 13*.

### 3.2.5 Molhabilidade

No início do processo fermentativo é necessário inocular o leito de substrato (arroz) com uma suspensão fúngica. Outras vezes se faz necessário molhar o meio de cultura com água estéril visando à diminuição da temperatura do meio fermentativo ao longo do processo. Assim, foi indispensável conhecer como é a distribuição de umidade no leito em função da carga de partículas, da vazão de atomização de água e da quantidade de água aspergida.

#### 3.2.5.1 Área de molhabilidade dos aspersores

Uma quantidade de sílica gel foi colocada dentro do cilindro de acrílico. Depois foi bombeada e aspergida água a diferentes vazões, através dos atomizadores agrícolas. O sistema, sob condições de iluminação controladas, foi fotografado, digitalizado e analisado, com o *software* de gráfico *Corel Draw X3 versão 13*. A avaliação de cada imagem consistiu em medir o diâmetro da seção molhada e, posteriormente, calcular a área total circular aspergida por cada atomizador em função da vazão. Isto com a finalidade de determinar as vazões que foram utilizadas nos experimentos de molhabilidade, como descrito adiante.

#### 3.2.5.2 Quantidade de água aspergida

Nos processos de FES o meio sólido atua como suporte físico para os microrganismos, mas, se a quantidade de água dentro do meio excede a capacidade máxima de retenção, este se pode aglomerar alterando negativamente sua estrutura e diminuindo as atividades metabólicas das células. Por outro lado, se o sistema possui pouca quantidade de água, o desenvolvimento dos microrganismos será afetado negativamente. Para evitar esta situação é recomendável fixar o valor máximo de retenção de água e, o valor mínimo para inocular, determinando a faixa de operação do sistema.

O valor máximo de retenção de água do arroz cozido foi determinado mediante o seguinte procedimento: amostras de aproximadamente 2 g de arroz foram cozidas a 80°C durante 4 minutos, segundo as condições estabelecidas na Tabela 3.3. Estas amostras

*Lina María Grajales Agudelo*

foram colocadas em placas de petri e, depois de maneira controlada, com uma bureta, foram adicionadas gotas de água até observar que a água não fosse mais absorvida pelos grãos e começasse a percolar o leito. Este procedimento durou cerca de 2 minutos e foi reproduzido 5 vezes para ter maior confiabilidade nos resultados. Na Figura 3.11 se apresenta uma fotografia do sistema.



Figura 3.11. Sistema empregado na determinação da capacidade de absorção máxima de água no arroz cozido.

Do valor máximo de retenção de água no leito obtido, foi escolhida a metade como o maior nível da variável quantidade de água aspergida nos experimentos de molhabilidade, de modo a não ultrapassar a capacidade máxima de retenção da matriz porosa.

De acordo com a literatura (BATISTA-FILHO et al., 2004; LACEY et al., 1996; LEITE et al., 2003, PAMPHILE, 1992) para inocular alguns microrganismos entomopatogênicos é necessário aplicar 0,05 mL de solução inoculante por cada grama de substrato, fixando-se assim, o menor nível da variável quantidade de água aspergida nos experimentos de molhabilidade.

### **3.2.5.3 Experimentos de molhabilidade**

Nesta etapa, colocou-se sílica gel dentro do cilindro de acrílico, que foi posto a girar. Alguns testes preliminares mostraram que a sílica gel possui resistência mecânica baixa, observando-se perdas de até 20% do material a cada ensaio. Consequentemente, para minimizar este tipo de perdas decidiu-se fixar a velocidade de rotação do tambor a 1 RPM.

*Lina María Grajales Agudelo*



Simultaneamente, a quantidade de água selecionada como variável foi aspergida sobre as partículas. Depois, ao observar a alteração da cor nas esferas de sílica foram coletadas amostras em três posições longitudinais do cilindro, 1, 2 e 3 conforme a Figura 3.3. Suas umidades foram determinadas através de secagem em estufa a  $105\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$  até obtenção de peso constante.

Nos experimentos de molhabilidade foram empregadas duas cargas de sílica (5,8, e 12,6 Kg), massas que correspondem ao primeiro e segundo grau de enchimento, duas quantidades de água aspergida por unidade de massa (0,1 e 0,05 mL/g<sub>arroz</sub>), obtidas como resultado dos ensaios descritos na Seção 3.2.5.2 e, três vazões de água (1600, 2000 e 2400 mL/min), escolhidas pela observação da área de molhabilidade dos aspersores como apresentado na Seção 3.2.5.1. Na Tabela 3.6 são apresentadas estas variáveis com seus respectivos níveis. A variável de resposta é a maior homogeneidade na umidade das partículas.

Tabela 3.6. Variáveis controladas nos testes de umidade.

Variável	Níveis		
Vazão (mL/min)	1600	2000	2400
Quantidade de água (mL/g <sub>arroz</sub> )	0,1	0,05	
Carga (Kg)	5,8	12,6	

### 3.2.6 Análise térmica

Particularmente, para o caso FES, é de vital importância conhecer o comportamento térmico do reator, dado que gradientes de temperatura no interior do leito podem prejudicar o metabolismo microbiano. Na avaliação de um novo equipamento se faz necessário analisar a capacidade de remoção do calor e a homogeneidade térmica do meio, para que possam ser realizados processos fermentativos de maneira eficiente, nos quais a uniformidade e integridade do substrato e do produto final sejam mantidas. Todos os experimentos que envolvem transferência de calor foram realizados no equipamento de aço inoxidável, empregando como material particulado esferas de vidro.

### **3.2.6.1 Ensaios preliminares**

Primeiramente, no reator sem carga e na posição imóvel, água foi posta a circular pela camisa, onde sua temperatura foi incrementada a uma taxa constante, desde 26 °C até 35 °C, durante 270 minutos. O objetivo principal foi analisar a resposta dos sensores de temperatura em um ambiente sem esferas de vidro, em ausência de escoamentos de ar e observar a influência da temperatura ambiente sob a temperatura da camisa.

Posteriormente, com uma carga de 27,6 Kg de esferas de vidro, quantidade de carga que corresponde ao primeiro grau de enchimento definido na Seção 3.2.4.1 e com o reator imóvel, água foi posta a circular pela camisa, onde sua temperatura foi incrementada a uma taxa constante, desde 26 °C até 35 °C, durante 570 minutos. O objetivo principal foi observar a transferência de calor no leito de esferas, em condições de estagnação. As condições do experimento anterior foram reproduzidas para 37 Kg de esferas de vidro, massa que obedece ao segundo grau de enchimento.

Um ensaio com o leito fixo, para o primeiro grau de enchimento, água de circulação aquecida a uma taxa contínua de 26 °C a 35 °C, durante 360 minutos e escoamento de ar no interior do reator a 60 °C e a três diferentes vazões (15, 90 e 150 L/min) foi realizado para observar a influência do ar no meio das esferas de vidro.

Sob as condições anteriores foi conduzido um experimento, porém o leito de partículas foi submetido a rotação, a uma frequência de 1,5 RPM, para avaliar o efeito das rotações sobre a homogeneidade térmica do sistema.

Um experimento com mudança súbita da temperatura do ar, de 27 °C a 60 °C, sem carga e com os três graus de enchimento e temperatura da camisa constante a 28 °C foi realizado para avaliar a resposta térmica do meio frente às alterações bruscas do sistema. A vazão de ar empregada foi 150 L/min.

Um experimento sem carga de partículas, com ar nas condições mencionadas e com mudança súbita da temperatura da camisa de 40 °C para 20 °C foi realizado com o objetivo de conhecer o tempo que o sistema demora em estabilizar à nova temperatura.

Com a finalidade de aplicar os resultados obtidos na seção de molhabilidade aos experimentos térmicos, foi realizado um teste de transferência de calor com aspersão de

*Lina María Grajales Agudelo*

água. Para tal efeito foi realizado um experimento até estado estacionário, para o terceiro grau de enchimento, em ausência de ar e temperatura da água de circulação a 28 °C. Posteriormente, de acordo com os resultados da Seção 3.2.5.2 foram aspergidos 1500 mL de água a 40 °C e a uma vazão de 2000 mL/min visando o aumento da temperatura no meio.

Todos os experimentos preliminares foram realizados em duplicata.

### 3.2.6.2 Ensaio térmico

Nesta etapa colocou-se uma quantidade de esferas de vidro dentro do reator, como se ilustra na fotografia da Figura 3.7, até completar a carga necessária para o grau de enchimento indicado (1). Depois, o tambor foi fechado (2), a válvula do ar à temperatura de 60 °C e 150 L/min de vazão foi aberta (3) e, a bomba responsável pela circulação da água na camisa foi ligada (4). A vazão de ar foi escolhida devido aos resultados obtidos nos ensaios preliminares, os quais indicaram que vazões como 15 e 90 L/min mostraram influência térmica desprezível no meio, enquanto que só se observaram mudanças de temperatura nas esferas de vidro a 150 L/min. A temperatura na camisa foi mantida a 28 °C dado que é a temperatura ótima para o crescimento do fungo *M. anisopliae*. O arranjo mecânico do reator não permitiu a circulação de água simultaneamente à rotação, razão pela qual nos experimentos que foram submetidos à rotação foi necessário desligar a bomba de circulação de água e fechar as válvulas, enquanto que o tambor girava a 1,5 RPM (5). Posteriormente foram registradas as medidas de temperatura a intervalos de 15 minutos entre cada medida (6). Nos experimentos realizados em ausência de ar se omitiu o passo (3) e os realizados sem rotação excluiu-se o passo (5).

As condições de operação dos experimentos realizados na avaliação térmica do reator são apresentadas na Tabela 3.7. Foram analisadas três cargas de esferas de vidro (27,6, 37 e 46 Kg), massas que correspondem ao primeiro, segundo e terceiro grau de enchimento. Também foi avaliada a presença e ausência de ar no sistema. Quando os experimentos foram realizados em presença de ar, a temperatura e a vazão deste foram mantidas constantes a 60 °C e 150 L/min, respectivamente. Além disso, foi estudada a posição fixa e móvel do leito, de forma que, para o leito móvel a frequência de rotação permaneceu constante a 1,5 RPM e, foram realizados 5, 9 e 11 giros para o primeiro, segundo e terceiro grau de enchimento, respectivamente, segundo os resultados obtidos na

*Lina María Grajales Agudelo*

seção de homogeneidade das partículas da seção 4.2.2. A temperatura da camisa foi mantida constante a 28 °C durante todos os processos. A variável de resposta foi a distribuição e o perfil de temperatura obtido às diferentes condições de operação.

Tabela 3.7. Condições de processo nos experimentos de transferência de calor.

Variável	Níveis		
Carga (Kg)	27,6	37	46
Ar $\begin{cases} T = 60^{\circ}\text{C} \\ \bar{V} = 150 \text{ L/min} \end{cases}$	Com	Sem	
Posição do leito	Fixo	Móvel	

### 3.2.7 Planejamento experimental

Na avaliação da mistura das partículas utilizou-se um planejamento estatístico fatorial para 3 fatores com 2 e 3 níveis, conforme à Tabela 3.8. As variáveis controladas foram a presença e ausência de tubos simuladores dentro do cilindro, a frequência de rotação cujos níveis foram 1, 4 e 7 RPM e a quantidade de material carregado avaliado para 5, 10 e 15 Kg. A variável de resposta, neste caso, foi o número de rotações necessárias para obter uma mistura homogênea, obtendo um total de 18 experimentos.

Tabela 3.8. Planejamento fatorial para os experimentos de mistura e distribuição das partículas de arroz.

Experimento	Tubos	Frequência (RPM)	Carga (Kg)	Ordem aleatorizada
1	Sem	1	5	6
2			10	11
3			15	17
4		4	5	1
5			10	15
6			15	7
7		7	5	10
8			10	13
9			15	2
10	Com	1	5	9
11			10	18
12			15	3
13		4	5	14
14			10	5
15			15	16
16		7	5	12
17			10	4
18			15	8

Na estimativa da molhabilidade empregou-se um planejamento estatístico fatorial para 3 fatores com 3 e 2 níveis, conforme à Tabela 3.9. As variáveis analisadas foram vazão de água a 1600, 2000 e 2400 mL/min, quantidade de água aspergida por unidade de massa cujos níveis foram 0,1 e 0,05 mL/g<sub>arroz</sub>, e quantidade de sílica gel avaliada para 5,8 e 16,4 Kg, para um total de 12 experimentos. A variável de resposta foi a maior homogeneidade na umidade das partículas. Os resultados de umidade das partículas foram comparados por uma análise de variância, ANOVA, para detectar diferenças estatisticamente significativas.

Tabela 3.9. Planejamento fatorial para os experimentos de molhabilidade.

Experimento	Vazão (mL/min)	Quantidade de água (mL/g)	Carga (Kg)	Ordem aleatorizada
1	1600	0,1	5,8	5
2			16,4	10
3		0,05	5,8	1
4			16,4	12
5	2000	0,1	5,8	2
6			16,4	8
7		0,05	5,8	9
8			16,4	4
9	2400	0,1	5,8	11
10			16,4	3
11		0,05	5,8	7
12			16,4	6

Na Tabela 3.10 é apresentada a matriz do planejamento estatístico fatorial utilizado na homogeneidade térmica para 3 fatores com 3 e 2 níveis. As variáveis analisadas foram carga total de esferas de vidro 27,6, 37 e 46 Kg, presença e ausência de ar no meio, e operação do leito classificado como fixo e móvel. Totalizando 12 experimentos. A variável de resposta foi o perfil de temperatura obtido às diferentes condições de operação.

Tabela 3.10. Planejamento fatorial nos experimentos de transferência de calor.

Experimento	Carga (Kg)	Posição do leito	Ar	Ordem aleatorizada
1	27,6	Fixo	Com	3
2			Sem	10
3		Móvel	Com	7
4			Sem	4
5	37	Fixo	Com	2
6			Sem	9
7		Móvel	Com	11
8			Sem	1
9	46	Fixo	Com	8
10			Sem	12
11		Móvel	Com	6
12			Sem	5

## Capítulo 4

# Resultados e Discussão

### 4.1 Caracterização das partículas de arroz

Os resultados da caracterização das partículas de arroz branco e preto são apresentados na Tabela 4.1. Através do *software* estatístico *Minitab 15 versão 1.0.0*, foi feita uma avaliação da diferença das médias mediante o teste *t* student, para um nível de significância de 5%. Neste caso, encontrou-se que todos os parâmetros avaliados aceitaram a hipótese nula, onde a diferença de médias é igual a zero, ou seja, não existe diferença estatística significativa entre o número de sementes por grama, o volume de cada partícula, o peso de cada grão e a densidade aparente do arroz branco e o arroz tingido de preto.

Tabela 4.1. Características físicas do arroz tipo 1, cozido por imersão em água a 80 °C durante 4 minutos e seco ao ambiente por 2 horas.

Característica	Quantidade
<i>Arroz branco</i>	
Sementes por cada g	$43,6227 \pm 0,703$
Sementes por cada 450g	$19,63 \times 10^3 \pm 316$
Volume de partícula	$(0,0286 \pm 0,006) \text{cm}^3$
Peso de partícula	$(2,2928 \times 10^{-2} \pm 0,0004) \text{g}$
Densidade aparente	$(0,8296 \pm 0,173) \text{g}/\text{cm}^3$
<i>Arroz tingido de preto</i>	
Sementes por cada g	$41,045 \pm 2,318$
Sementes por cada 450g	$18,63 \times 10^3 \pm 1043$
Volume de partícula	$(0,0292 \pm 0,007) \text{cm}^3$
Peso de partícula	$(2,2421 \times 10^{-2} \pm 0,0014) \text{g}$
Densidade aparente	$(0,8582 \pm 0,183) \text{g}/\text{cm}^3$

*Lina María Grajales Agudelo*

Mohsenin (1986) reportou valores de algumas propriedades físicas para o arroz *Calrose*, dentre as quais estão peso de cada partícula de  $2,4875 \times 10^{-2} g \pm 0,072$ , número de sementes de  $18,2 \times 10^3 \pm 480$  por cada libra, volume de  $0,0179 \text{ cm}^3$  para cada partícula e densidade aparente de  $0,667 \text{ g/cm}^3$ . Apesar de que as medidas realizadas por Mohsenin (1986) correspondem a partículas de arroz seco, e a caracterização das partículas empregadas neste trabalho, foi determinada para o arroz cozido a  $80^\circ\text{C}$  durante 4 minutos, as medidas foram muito próximas.

## 4.2 Mistura de partículas

Santomaso et al. (2004) questionam que os trabalhos publicados sobre mistura de partículas têm sido realizados com partículas ideais, ou seja, alta esfericidade, baixa aspereza superficial e distribuição do tamanho de partícula mono-dispersa, portanto as aplicações industriais estão sendo muito discutidas. Assim, o presente trabalho apresenta uma aplicação direta com partículas de arroz, com aplicação FES na produção do fungo *M. anisopliae*, no qual as partículas são angulares, aderentes e possuem forma irregular.

### 4.2.1 Calibração com o software Lenseye (E&CS Programs)

Marsh et al. (2000) afirmaram que a técnica de traçadores coloridos avaliada com ajuda do olho humano, dificulta o processamento de um grande número de partículas. De acordo com isto, foi conveniente empregar uma técnica mais sofisticada que minimize erros e aumente a eficiência na medição, aplicando um *software* de análise de imagem como o *Lenseye*. Atualmente, tem-se informações do uso do *Lenseye* apenas para a análise de imagem no cálculo do volume das células de *S. aureus* e *E. coli* por Pilavtepe-Çelik (2008) e na quantificação da não homogeneidade nas cores de alguns materiais agrícolas como manga, carne de coelho e banana durante o amadurecimento por Balaban (2008). Não foram encontrados registros de sua aplicação na determinação de concentrações em uma mistura de partículas, por este motivo, neste trabalho se apresentam duas formas de calibração e sua aplicação no processo. A Figura 4.1 ilustra a digitalização de uma fotografia para um experimento, no qual as partículas pretas são identificadas pelo *software Lenseye*.





Figura 4.1. Imagem submetida à análise no *software Lenseye*. (a. Fotografia antes da análise; b. Fotografia depois da análise).

Houve uma preocupação inicial quanto à posição relativa das partículas em relação ao observador externo, posicionado perpendicularmente à amostra. As partículas podem estar em pé (menor dimensão totalmente visível), deitadas (maior dimensão totalmente visível) e assumir infinitas possibilidades entre estas duas posições. Assim, cada amostra padrão preparada no laboratório foi avaliada pelo *software* para 0, 25, 50, 75 e 100% na posição das partículas em pé. Essas amostras continham um número exato de partículas pretas que corresponderam a uma concentração específica de traçador. O *software Lenseye* fez uma contagem da área e do número de partículas pretas presentes em cada amostra. Na Figura 4.2 apresenta-se uma amostra com 1% de concentração do traçador (em massa), analisada pelo *software* para 0, 25, 50, 75 e 100% do traçador em pé e na Figura 4.3 é apresentada uma amostra com 30% de traçador, também analisada pelo *software*. Observe-se que para a concentração de 1% é fácil identificar e contar o número de partículas pretas (8), em qualquer posição do traçador (deitados ou em pé), enquanto que para a concentração de 30% ocorre um agrupamento das partículas pretas, onde se dificulta processar esta informação, mesmo para 100% do traçador em pé. Este fenômeno ocorreu para todas as amostras acima de 20% de concentração.

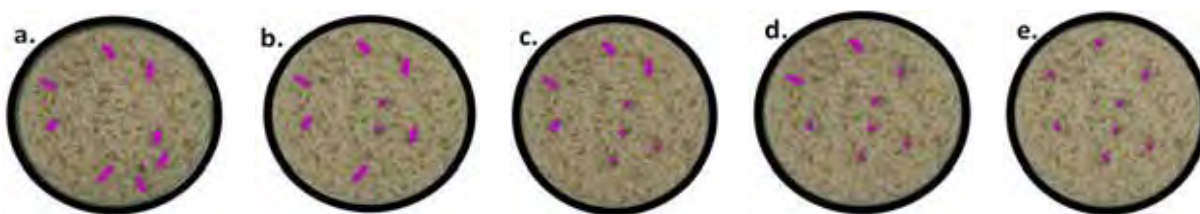


Figura 4.2. Amostra de 1% de traçador analisada pelo *software Lenseye* para 0% (a), 25% (b), 50% (c), 75% (d) e 100% (e) de traçador em pé.

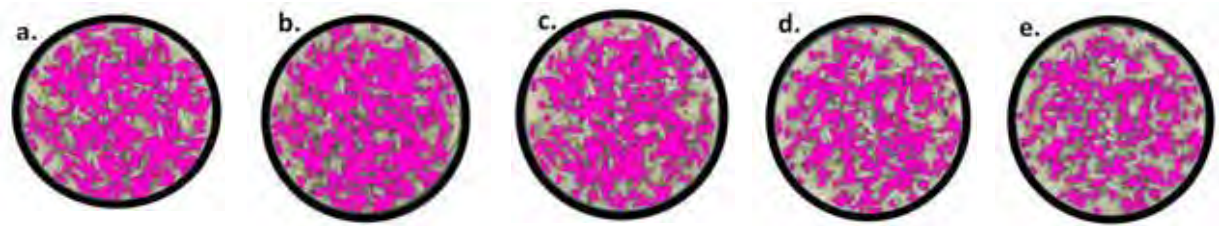


Figura 4.3. Amostra de 30% de traçador analisada pelo *software Lenseye* para 0% (a), 25% (b), 50% (c), 75% (d) e 100% (e) de traçador em pé.

Na Tabela 4.2 são apresentadas, detalhadamente, as contagens fornecidas pelo *software Lenseye* para as concentrações de traçador definidas na Tabela 3.5 com 0, 25, 50, 75 e 100% de traçador em pé. Note-se que independente da posição do traçador, a contagem fornecida pelo *software* para concentrações maiores de 30% começa a diminuir notavelmente.

Tabela 4.2. Contagem das unidades de traçador em pé realizada pelo *software Lenseye*.

Porcentagem de traçador	Contagem (unidades)					Média
	0%	25%	50%	75%	100%	
0	0	0	0	0	0	0
1	8	6	4	2	0	4
2	11	8	7	5	2	6,6
3	17	15	10	7	3	10,4
4	21	19	15	8	4	13,4
5	26	21	17	9	5	15,6
6	30	25	21	11	6	18,6
7	35	28	22	15	7	21,4
8	40	34	23	16	8	24,2
9	49	39	25	18	9	28
10	58	44	30	19	10	32,2
20	80	51	36	23	11	48,2
30	56	40	28	15	8	29,4
40	32	20	10	7	6	15
50	21	10	8	5	4	9,6
60	1	2	2	2	1	1,6
70	1	1	1	1	1	1
80	1	1	1	1	1	1
90	1	1	1	1	1	1
100	1	1	1	1	1	1

Na mesma Tabela 4.2 encontra-se o valor da média aritmética para as unidades pretas contadas pelo *software*. Com estas médias foi realizada a primeira curva de calibração válida para concentrações de até 10%, e o ajuste dos dados, das unidades contadas versus a concentração de traçador, é mostrado na Figura 4.4. Através de uma regressão linear obteve-se o ajuste dos dados segundo a equação:

$$P = 0,325 \times C - 0,157 \quad 4.1$$

Onde  $C$  é contagem de unidades pretas e  $P$  é porcentagem correspondente a estas unidades. O coeficiente de regressão deste ajuste foi igual a  $R^2 = 0,996$  podendo ser considerado satisfatório.

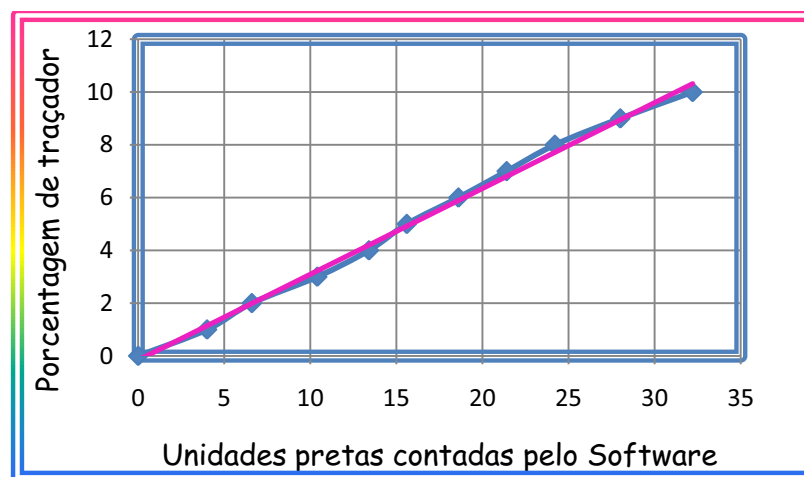


Figura 4.4. Linha de tendência na curva de calibração do *software* *Lenseye*.

Alternativamente, foi empregada uma segunda opção de calibração, que acreditava-se poderia permitir o emprego das análises de imagem para concentrações maiores de traçadores. Desta forma, foi empregada a ferramenta de análise de área do *software*, que forneceu a área preta apresentada na Tabela 4.3.

Tabela 4.3. Contagem da área de traçador em pé realizada pelo *software* Lenseye.

Porcentagem de traçador	Porcentagem de traçador (em massa)					
	0%	25%	50%	75%	100%	média
0	0	0	0	0	0	0,00
1	2,29	1,3	1,18	1,06	0,67	1,30
2	2,51	2,06	1,88	1,53	1,25	1,85
3	3,44	3,11	2,88	2,65	2,09	2,83
4	4,94	4,21	3,82	3,56	3,01	3,91
5	5,37	4,98	4,66	4,38	4,22	4,72
6	6,54	6,24	6,02	5,87	5,43	6,02
7	7,52	7,13	6,88	6,53	6,11	6,83
8	8,37	7,97	7,87	7,45	7,22	7,78
9	9,55	8,68	8,46	8,23	8,01	8,59
10	10,38	9,75	8,87	7,92	6,61	8,65
20	22,84	19,57	18,15	16,49	14,73	18,36
30	43,24	40,7	38,56	36,12	35,01	38,73
40	54,13	50,36	47,88	45,21	43,12	48,14
50	81,94	79,24	75,76	72,29	70,09	75,86
60	89,66	83,36	81,02	79,74	79,61	82,68
70	90,21	87,26	84,64	84,57	83,52	86,04
80	96,72	96,66	95,78	95,44	93,35	95,59
90	97,49	97,49	97,49	97,49	97,49	97,49
100	100	100	100	100	100	100,00

Observe-se que para estes dados não ocorre diminuição dos valores da área para concentrações maiores do que 30%, pelo contrário, começam a aumentar significativamente. Note-se que a área obtida para 25% de arroz em pé (75% deitado) e a média foi muito similar à concentração das amostras criadas manualmente, desde 0 até 10%. O cálculo do erro entre a área calculada pelo *software* para as concentrações de traçador (25% em pé) e a área média das concentrações de traçador em pé é apresentado na Tabela 4.4. Note-se que os valores das concentrações são comparados diretamente com as áreas identificadas pelo *software*, onde se assume que essa área corresponde à porcentagem de traçador.

Tabela 4.4. Comparação das amostras padrão e as áreas obtidas com o *software* Lenseye para 25% de arroz em pé.

Porcentagem de arroz preto (em massa)	Porcentagem de arroz preto (em área do <i>software</i> )		% erro	
	25% de traçador em pé	média	25% de traçador em pé	média
0	0	0,00	0,00	0,00
1	1,3	1,30	-30,00	-30,00
2	2,06	1,85	-3,00	7,70
3	3,11	2,83	-3,67	5,53
4	4,21	3,91	-5,25	2,30
5	4,98	4,72	0,40	5,56
6	6,24	6,02	-4,00	-0,33
7	7,13	6,83	-1,86	2,37
8	7,97	7,78	0,38	2,80
9	8,68	8,59	3,56	4,60
10	9,75	8,65	2,50	13,54
20	19,57	18,36	2,15	8,22
30	40,7	38,73	-35,67	-29,09
40	50,36	48,14	-25,90	-20,35
50	79,24	75,86	-58,48	-51,73
60	83,36	82,68	-38,93	-37,80
70	87,26	86,04	-24,66	-22,91
80	96,66	95,59	-20,83	-19,49
90	97,49	97,49	-8,32	-8,32
100	100	100,00	0,00	0,00

É de ressaltar que para a análise de área, entre as concentrações 0 e 10%, há um comportamento oscilatório do erro, que apresentou valores aceitáveis para todas as concentrações, exceto para 1%. De um modo geral, os grãos de arroz não são homogêneos, têm tamanhos e massas distintas. A massa adotada nos testes (10g) compreende cerca de 425 grãos de arroz. Assim, ao adotar baixas concentrações de traçador, pode-se estar particularizando um conjunto de grãos muito distinto da média dos

*Lina María Grajales Agudelo*

grãos. Desta forma, o acréscimo da concentração favorece obter uma área média mais representativa da amostra utilizada. Por outro lado, altas concentrações são desfavoráveis devido à ocorrência de sombras que o *software* interpreta como partículas, aumentando o erro na análise. O erro de 30% para concentração de 1% deve-se à maior área dos grãos pretos com respeito à área dos grãos brancos. As demais concentrações avaliadas acima de 20% apresentaram erros pouco satisfatórios para o objetivo do trabalho. Concluindo, pode-se dizer que o emprego deste método na determinação de concentrações pela técnica de traçadores coloridos resulta mais satisfatório, do que o método anterior, para avaliar misturas com baixas concentrações de traçador, preferivelmente menores de 10%.

#### **4.2.2 Técnica de traçadores coloridos**

A coleta manual de amostras nos experimentos de homogeneidade das partículas, mediante técnica de traçadores, mostrou que, segundo a Tabela 4.5, os ensaios com 5 Kg de arroz alcançaram homogeneidade satisfatória depois de 5 giros, já que os resultados apresentaram homogeneidades aceitáveis. Observe-se que esta homogeneidade foi independente da velocidade de rotação na qual foram realizados os experimentos e que a presença de tubos alimentadores não influenciou na mistura das partículas. Os experimentos realizados com 10 Kg de carga mostraram boa homogeneidade após 9 giros, e para a carga de 15 Kg o número de giros necessários para obter uma mistura homogênea foi igual a 11. Todas as amostras de 15 Kg de arroz apresentaram uma clara não homogeneidade depois de 5 giros, portanto foi omitida a coleta de amostras para alguns destes pontos.

Tabela 4.5. Resultados de homogeneidade na mistura das partículas para 10% de traçador (Coleta manual).

Experimento	Frequência (RPM)	Carga (Kg)	Tubos	Resultados da porcentagem em massa de arroz preto		
				5 giros	9 giros	11 giros
1	1	5	com	9,67	-	-
2	4	5	com	11,53	-	-
3	7	5	com	9,40	-	-
4	1	5	sem	9,13	-	-
5	4	5	sem	10,69	9,93	-
6	7	5	sem	9,95	10,47	-
7	1	10	com	16,91	12,97	12,87
8	4	10	com	30,97	10,62	10,91
9	7	10	com	30,97	10,78	10,34
10	1	10	sem	24,84	12,35	12,27
11	4	10	sem	5,41	12,74	12,95
12	7	10	sem	12,36	12,56	12,11
13	1	15	com	*	5,79	10,63
14	4	15	com	*	16,58	11,84
15	7	15	com	*	16,51	9,53
16	1	15	sem	50,29	23,78	10,96
17	4	15	sem	2,30	10,15	11,04
18	7	15	sem	*	16,82	10,92

\* Ensaios onde, visualmente, foi possível observar não homogeneidade.

Um resultado típico de um experimento de mistura de partículas de arroz realizado mediante a técnica de traçadores coloridos é mostrado nas Figuras 4.5a e 4.5b.



Figura 4.5. Experimento de mistura das partículas de arroz para 10 Kg de material carregado, 1RPM de frequência de rotação, em presença de tubos alimentadores e 10% de traçador (a. Fotografia do sistema depois de 9 giros; b. Vista da superfície das partículas).

Segundo o método descrito, podem-se obter perfis de concentrações de traçador conforme varia o número de giros do tambor, como os apresentados na Figura 4.6. A análise dos perfis indicou que na medida em que o número de giros aumenta o valor da concentração tende a se estabilizar até alcançar o estado estacionário. O experimento da série A mostrado na figura corresponde a uma amostra de 15 Kg de arroz a 4 RPM, sem tubos alimentadores, a qual apresentou uma concentração de 2,3% para os primeiros 5 giros, passando por 7,39% para 7 giros, depois tem uma aparente homogeneidade de 10,15% aos 9 giros, seguido de 11,04% aos 11 giros e finalmente, 11,50% após 25 giros. O experimento da série B da mesma figura foi realizado com 15 Kg de arroz a 1 RPM, sem tubos alimentadores, o qual apresentou comportamento contrário ao experimento anterior. Ele mostra como a concentração varia de 50,29% nos primeiros 5 giros a 31,60% aos 7 giros, e continua diminuindo a 23,78% (9 giros), depois estabiliza a 10,96% (11 giros) até alcançar o estado estacionário com 10,56% de traçador.

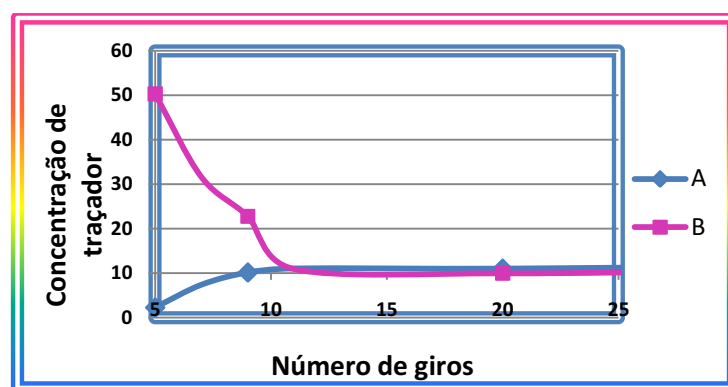


Figura 4.6. Concentração de traçador em função do número de rotações para um experimento com 15 Kg de arroz, sem tubos alimentadores e 10% de traçador (a. 4 RPM; b. 1 RPM).

Uma vez que os resultados da homogeneidade de partículas da coleta manual foram satisfatórios para o propósito, as fotografias digitalizadas foram analisadas pelo *software*. Na Tabela 4.6 são apresentados os resultados de mistura fornecidos pelos dois métodos; além disso, a diferença de médias foi comparada com o teste t para um nível de significância de 5%. Esta análise foi feita a través do *software* estatístico *Minitab 15 versão 1.0.0*, onde a hipótese nula foi aceita, ou seja, a diferença das médias foi igual a zero. Portanto, não existe diferença estatisticamente significativa na aplicação dos dois métodos para avaliar concentrações, de modo que se assume que a determinação de concentração por análise de imagem pelo *software Lenseye* foi aceitável para este sistema.



Tabela 4.6. Diferença das medidas de concentração do traçador por análise de imagem (área) e coleta manual.

Experimento	Condições de operação			Porcentagem de traçador		Diferença
	Carga (Kg)	Frequência (RPM)	Tubos	Massa	Área	
1	5	1	com	9,67	11,52	-1,85
2	5	4	com	11,53	10,15	1,38
3	5	7	com	9,40	9,62	1,11
4	5	1	sem	9,13	10,47	-1,34
5	5	4	sem	10,69	9,75	0,94
6	5	7	sem	9,95	9,5	0,45
7	10	1	com	12,97	11,92	1,05
8	10	4	com	10,62	11,05	-0,43
9	10	7	com	10,78	10,26	0,52
10	10	1	sem	12,35	12,2	0,15
11	10	4	sem	12,74	10,42	2,32
12	10	7	sem	12,56	9,01	3,55
13	15	1	com	10,63	10,55	0,08
14	15	4	com	11,84	12,86	-1,02
15	15	7	com	9,53	10,97	-1,44
16	15	1	sem	10,96	9,92	1,04
17	15	4	sem	11,04	11,99	-0,95
18	15	7	sem	10,92	9,5	1,42

Na Tabela 4.7 são mostrados os resultados de mistura para os experimentos com 50% de traçador. Neste caso os experimentos foram realizados a 1 RPM, já que foi comprovado que a velocidade de rotação do tambor e a presença dos tubos alimentadores não influenciou no tempo de mistura das partículas, sendo a coleta das amostras realizada manualmente. Os dados da Tabela mostram que o número de giros necessários para obter uma mistura homogênea foi igual àquele obtido nos experimentos realizados com 10% de traçador, ou seja, para 5 Kg precisam-se 5 giros, para 10 Kg, 9 giros e para 15 Kg, 11 giros. Ou seja, a concentração de traçadores não influenciou no tempo mistura. Note-se que o

comportamento da concentração do traçador para a carga de 15 Kg pode ser explicado pela Figura 4.6, mas, a flutuação no valor das concentrações é menor devido ao fato das partículas estarem em proporções iguais. Ademais, observe-se que as concentrações finais foram de  $50 \% \pm 1 \%$ , podendo ser considerados como valores mais exatos do que aqueles obtidos com 10% de concentração.

Tabela 4.7. Giros necessários para alcançar 50% de homogeneidade (coleta manual).

Experimento	Carga (Kg)	Tubos	Resultados da porcentagem de arroz preto (em massa)		
			5 giros	9 giros	11 giros
1	5	com	49,91	-	-
2	10	com	58,45	49,26	-
3	15	com	59,07	65,79	50,14

Marsh et al. (2000) empregaram a técnica de traçadores coloridos para caracterizar a mistura das partículas em um tambor rotativo de 200 L, para aplicação em FES. O material sólido foi farelo de trigo e os traçadores também foram partículas de farelo de trigo tingidas com solução de Rodamina – WT. Eles afirmaram que a maior vantagem de empregar partículas tingidas é que as propriedades físicas de escoamento são as mesmas para ambos os materiais, evitando assim problemas de segregação de partículas. Encontraram que a concentração homogênea foi alcançada depois de 180 minutos de experimento, com uma rotação de 5 RPM. Comparado com o reator empregado nesta pesquisa, que tem volume cerca de 80% menor, tem-se que a homogeneidade desejada é alcançada em períodos muito longos, o que não é conveniente para processos de FES onde se requer remoção rápida do calor e homogeneidade na umidade das partículas.

Em concordância com os resultados deste trabalho estão os encontrados por Schutyser et al. (2003), que verificaram que a homogeneidade de grãos de trigo misturados com grãos de trigo tingidos com Rodamina – WT foi alcançada após 4 e 8 giros, em um tambor rotativo de 28 L que girava a 1 RPM.

### **4.3 Visualização do movimento das partículas**

#### **4.3.1 Avaliação qualitativa**

Na Figura 4.7 é apresentado um experimento típico de movimentação, para um teste realizado com 15 Kg de arroz, 10% de traçador, velocidade de rotação de 4 RPM e com tubos alimentadores.



Figura 4.7. Fotografia de um experimento de movimentação de partículas.

Nos vídeos analisados observou-se que, independentemente da velocidade de rotação, os experimentos realizados em presença de tubos alimentadores apresentaram regiões de arroz branco ao lado dos tubos, mostrando má circulação das partículas, o qual significa que existem pontos de baixa movimentação de partículas nesta zona. Obviamente, o tempo de residência das partículas no ponto de estagnação foi contrário à velocidade de rotação, mostrando que o menor tempo foi dado à frequência de 7 RPM, o intermediário a 4 RPM e o mais lento a 1 RPM. Os experimentos realizados em ausência de tubos alimentadores apresentaram boa movimentação em todas as regiões do leito, incluindo a região central. No DVD em anexo (Pasta: avaliação qualitativa) é apresentado um exemplo de movimentação para um experimento em ausência de tubos e outro em presença de tubos simuladores, onde é possível observar o comportamento anteriormente descrito.

#### **4.3.2 Avaliação quantitativa: Cálculo das velocidades**

As regiões delimitadas para o cálculo das velocidades, nos experimentos realizados em presença e ausência de tubos alimentadores estão indicadas na Figura 4.8, onde 1 indica a região denominada com queda, 2 centro e 3 subida.



Figura 4.8. Regiões de cálculo das velocidades para experimentos de 10 Kg e 7 RPM (a. Com tubos; b. Sem tubos).

As velocidades das partículas de arroz submetidas às diferentes condições do processo são apresentadas na Tabela 4.8. Observe-se de maneira geral que, as maiores velocidades foram alcançadas nas altas frequências de rotação e, conseqüentemente, as menores velocidades foram obtidas em baixas frequências, isto ocorre nas três regiões de análise (queda, centro e subida), um comportamento esperado para este tipo de experimento. Note-se que nas regiões 2 das Figuras 4.8a e 4.8b, a velocidade para 5, 10 e 15 Kg de arroz a 1 RPM foi  $0,0304 \text{ m/s}$ , ou seja, foram iguais para todas as cargas; o fenômeno se atribui ao fato de que as partículas localizadas do lado da parede do cilindro levam a mesma velocidade rotacional do tambor, devido à presença de chicanas. O mesmo acontece para 4 e 7 RPM, apresentando  $0,1215 \text{ m/s}$  e  $0,2126 \text{ m/s}$ , respectivamente em todas as cargas de arroz. Nas regiões 1 (Figura 4.7), observou-se que a 1 RPM de frequência, as velocidades foram próximas para 5, 10 e 15 Kg de arroz, obtendo uma média de  $0,0651 \text{ m/s} \pm 0,008$  e, para 4 e 7 RPM, obteve-se  $0,2027 \text{ m/s} \pm 0,045$  e  $0,5205 \text{ m/s} \pm 0,035$ , respectivamente. Este comportamento parece estar mais relacionado à velocidade do tambor do que com a inclinação da superfície das partículas. Neste sentido, possivelmente a presença das chicanas pode ter tido um papel importante, pois estes defletores lançam as partículas sobre a superfície do leito cada uma à velocidade angular do tambor. As menores velocidades foram detectadas nas regiões 3 (Figura 4.8). O padrão de comportamento observado foi uma menor velocidade de partícula às maiores quantidades de carga; para 15 Kg se notou o movimento mais lento, para 10 Kg um movimento intermediário e para 5 Kg o mais rápido. Também se observou que as amostras da região analisada para a Figura 4.8a são mais lentas ao lado dos tubos alimentadores do que as que foram realizadas em ausência de tubos, só na região central (Figura 4.8b). Em processos FES, a baixa circulação das partículas nesta região evita a aeração eficiente ao meio, o que impede o transporte de oxigênio aos organismos e a remoção de calor metabólico gerado pelos mesmos.

Tabela 4.8. Velocidades das partículas de arroz nas três regiões de análise.

Experimento	Frequência (RPM)	Carga (Kg)	Tubos	$\varepsilon$ (Graus)	Velocidade (m/s)		
					queda	centro	subida
1	1	5	com	68	0,0557	0,0012	0,0304
2	4	5	com	63	0,2067	0,0030	0,1215
3	7	5	com	69	0,5361	0,0086	0,2126
4	1	5	sem	62	0,0607	0,0039	0,0304
5	4	5	sem	65	0,1905	0,0060	0,1215
6	7	5	sem	62	0,4831	0,1013	0,2126
7	1	10	com	80	0,0579	0,0006	0,0304
8	4	10	com	85	0,1685	0,0013	0,1215
9	7	10	com	86	0,5617	0,0074	0,2126
10	1	10	sem	87	0,0723	0,0185	0,0304
11	4	10	sem	83	0,2303	0,0646	0,1215
12	7	10	sem	83	0,5094	0,1178	0,2126
13	1	15	com	80	0,0680	0,0006	0,0304
14	4	15	com	80	0,1465	0,0010	0,1215
15	7	15	com	79	0,5528	0,0056	0,2126
16	1	15	sem	81	0,0758	0,0191	0,0304
17	4	15	sem	83	0,2741	0,0449	0,1215
18	7	15	sem	83	0,4797	0,0982	0,2126

Orpe (2001) indicou que para baixos números de Froude o perfil de velocidade de partículas na camada superficial é simétrico para o movimento de partículas rolante. E que a espessura dessa camada aumenta com o número de Froude e com o aumento da relação  $d/D$  (diâmetro de partícula/ diâmetro do cilindro).

Na Figura 4.9 é apresentada uma amostra de cálculo, do tempo empregado para uma partícula de arroz avançar a distância  $S$  (Figura 2.6) desde o ponto 1 até o ponto 2, na região de queda, cálculo realizado com o *software Picture Motion Browser*.



Figura 4.9. Determinação do tempo com o software *Picture Motion Browser*.

#### 4.4 Grau de enchimento e regime de movimentação

##### 4.4.1 Grau de enchimento

Na Figura 4.10 são apresentadas as imagens empregadas para os cálculos geométricos dos ângulos de enchimento e de repouso dinâmico para o primeiro grau de enchimento de arroz, sílica gel e esferas de vidro. Estes ângulos foram determinados com o auxílio do software gráfico *Corel Draw X3 versão 13*.



Figura 4.10. Imagens utilizadas no cálculo geométrico do ângulo de enchimento e do ângulo de repouso dinâmico para arroz (a), sílica gel (b) e esferas de vidro (c), a 1 RPM.

Na Tabela 4.9 são apresentados os ângulos e os graus de enchimento para os materiais empregados no desenvolvimento da pesquisa, quais sejam: arroz branco, arroz com 10% de traçador, arroz com 50% de traçador, esferas de vidro e esferas de sílica gel. A média do ângulo de enchimento,  $\varepsilon$ , correspondente ao primeiro grau de enchimento para arroz misturado com 10% foi  $64,83^\circ \pm 3,06$ , este valor é próximo ao obtido para arroz com 50% de traçador ( $64^\circ$ ), e também para as amostras de arroz branco ( $60^\circ$ ), às de esferas de

*Lina María Grajales Agudelo*

vidro ( $61^\circ$ ) e às esferas de sílica gel ( $62^\circ$ ). A média aritmética e o desvio padrão para o ângulo de enchimento de todos os materiais foi de  $62,37^\circ \pm 2,02$ . Consequentemente, o primeiro grau de enchimento trabalhado,  $f$ , foi  $0,23 \pm 0,028$ . A média do ângulo de enchimento,  $\varepsilon$ , do segundo grau de enchimento,  $f$ , para arroz misturado com 10% de traçador foi  $84^\circ \pm 2,53$ , o ângulo de enchimento para arroz com 50% de traçador foi de  $85^\circ$ , para arroz branco  $84^\circ$ , para esferas de vidro  $84^\circ$  e para esferas de sílica gel  $82^\circ$ . O ângulo de enchimento médio,  $\varepsilon$ , foi de  $83,8^\circ \pm 1,09$  e o segundo grau de enchimento,  $f$ , foi de  $0,43 \pm 0,012$ . Fazendo a mesma análise, por analogia, para o terceiro grau de enchimento, correspondem os seguintes ângulos de enchimento: média de  $81^\circ \pm 1,67$  para arroz com 10% de traçador,  $76^\circ$  para arroz com 50% de traçador,  $80^\circ$  para arroz branco e,  $80^\circ$  para esferas de vidro, de modo que o ângulo de enchimento médio,  $\varepsilon$ , foi de  $79,25^\circ \pm 2,22$ . O último ângulo de enchimento para sílica gel não foi calculado devido à falta de material. O último grau de enchimento,  $f$ , é de  $0,60^\circ \pm 0,018$ . Resumindo, os três graus de enchimento,  $f$ , empregados nesta pesquisa foram 0,23, 0,43 e 0,60 para todos os materiais; assegurando que o nível de material carregado em todos os experimentos foi sempre o mesmo. Alguns autores (RODRÍGUEZ et al., 2006; SANTOMASO, 2004) recomendam trabalhar no máximo com um grau de enchimento de 0,30 para processos FES, já que consideram que a mistura das partículas em um tambor horizontal é ineficiente para valores por cima dessa capacidade do volume total de armazenamento. Porém, os experimentos realizados com 10 e 15 Kg de arroz correspondem a graus de enchimento de 0,43 e 0,53 e observou-se dos resultados obtidos na seção de mistura de partículas que a homogeneidade foi bastante satisfatória. Outros autores como Schutyser et al. (2003) trabalharam com graus de enchimento de 0,33 e 0,40 obtendo bons resultados de mistura de partículas.

Calculando a média aritmética e o desvio padrão para o ângulo de repouso dinâmico,  $\theta$ , do arroz branco, do arroz misturado nas proporções de 10 e 50% de traçador, tem-se que  $\theta = 42,58^\circ \pm 3,73$ . Para as esferas de vidro tem-se uma média de  $22,67^\circ \pm 1,53$  e para as esferas de sílica gel o ângulo de repouso dinâmico foi  $25^\circ$ . O fato de as partículas de arroz ter ângulo de repouso dinâmico maior do que as esferas de vidro e as de sílica gel deve-se à forma das partículas. Segundo McCabe (1991) as partículas mais lisas e arredondadas possuem um menor ângulo de repouso, tal é o caso das esferas de vidro, que têm 3 mm de diâmetro e são mais uniformes. No caso de partículas angulares, aderentes e de forma irregular, como o arroz, existe maior probabilidade de ter um ângulo de repouso maior. As partículas de sílica gel possuem forma arredondada e têm diâmetro médio de  $6 \text{ mm} \pm 2$ , razão pela qual apresentam mais aderência do que as esferas de vidro, mas, têm menos adesão do que as partículas de arroz.

Tabela 4.9. Ângulos de enchimento, ângulos de repouso dinâmico e graus de enchimento.

Experimento	frequência (RPM)	Carga (Kg)	Tubos	$\varepsilon$ (Graus)	$f$	$\theta$
<i>Arroz com 10% de traçador preto</i>						
1	1	5	com	68	0,27	45
2	4	5	com	63	0,22	46
3	7	5	com	69	0,28	42
4	1	5	sem	62	0,21	40
5	4	5	sem	65	0,24	45
6	7	5	sem	62	0,21	45
7	1	10	com	80	0,39	40
8	4	10	com	85	0,44	36
9	7	10	com	86	0,46	34
10	1	10	sem	87	0,47	48
11	4	10	sem	83	0,42	42
12	7	10	sem	83	0,42	42
13	1	15	com	80	0,61	46
14	4	15	com	80	0,61	38
15	7	15	com	79	0,62	38
16	1	15	sem	81	0,60	50
17	4	15	sem	83	0,58	45
18	7	15	sem	83	0,58	42
<i>Arroz com 50% de traçador preto</i>						
1	1	5	com	64	0,23	42
2	1	10	com	85	0,44	45
3	1	15	com	76	0,65	43
<i>Arroz com 0% de traçador preto</i>						
1	1	5	com	60	0,20	41
2	1	10	com	84	0,43	42
3	1	15	com	80	0,61	45
<i>Vidro</i>						
1	1	10,8	com	61	0,20	23
2	1	21,6	com	84	0,43	21
3	1	32,5	com	80	0,61	24
<i>Sílica</i>						
1	1	5.8	sem	62	0,21	25
2	1	11.6	sem	82	0,41	25



#### **4.4.2 Regime de escoamento**

De acordo com a informação fornecida no Quadro 2.1 e por observação dos vídeos foi fácil identificar e classificar o regime e os sub-regimes de escoamento das partículas. No DVD em anexo (Pasta: regimes de escoamento) são apresentados alguns vídeos de movimentação selecionados, para os três sub-regimes de movimentação encontrados. É de ressaltar que os vídeos analisados facilitaram a classificação do regime de escoamento das partículas.

Na Tabela 4.10 são mostrados os valores calculados da frequência, em revoluções por segundo, velocidade angular ( $\omega$ ), em radianos por segundo, e o número adimensional de Froude ( $Fr$ ) para cada experimento. Nas três quantidades de carga empregadas nos experimentos de movimentação (5, 10 e 15 Kg) observou-se um comportamento similar para 1 RPM de frequência. Eles apresentaram o movimento em queda, caracterizado pela queda das partículas em blocos de forma de cunha. Isto acontece graças à baixa velocidade de rotação do tambor. Similarmente, da observação das filmagens dos testes realizados a 4 RPM notou-se que para as três quantidades de carga o movimento acontece de forma que as partículas que estão na camada superficial caem de forma contínua e uniforme, enquanto que a camada do fundo é transportada à parte de cima pelo movimento rotativo do tambor. Isto significa que os testes levados a cabo a 4 RPM correspondem ao sub-regime rolante. Os experimentos realizados a 7 RPM também concordaram na forma de movimentação. Todos eles mostraram uma boa mistura das partículas e a formação de um pequeno arco na superfície, o que caracteriza a movimentação conhecida como cascata. Portanto, as três velocidades de rotação utilizadas nestes experimentos (1, 4 e 7 RPM), identificam os sub-regimes de escoamento queda, rolante e cascata, os quais pertenceram à forma básica de movimentação em cascata.

Tabela 4.10. Sub-regimes de escoamento para todos os níveis de experimentação nos testes de movimentação de arroz com 10% de traçador.

Experimento	Carga (Kg)	Tubos	frequência (RPM)	frequência (RPS)	$\omega$ (rad/s)	$Fr$	Sub-Regime
1	5	com	1	0,02	0,10	0,0003	Queda (slumping)
2	5	com	4	0,07	0,42	0,0052	Rolante(rolling)
3	5	com	7	0,12	0,73	0,0159	Cascata (Cascading)
4	5	sem	1	0,02	0,10	0,0003	Queda (slumping)
5	5	sem	4	0,07	0,42	0,0052	Rolante(rolling)
6	5	sem	7	0,12	0,73	0,0159	Cascata (Cascading)
7	10	com	1	0,02	0,10	0,0003	Queda (slumping)
8	10	com	4	0,07	0,42	0,0052	Rolante(rolling)
9	10	com	7	0,12	0,73	0,0159	Cascata (Cascading)
10	10	sem	1	0,02	0,10	0,0003	Queda (slumping)
11	10	sem	4	0,07	0,42	0,0052	Rolante(rolling)
12	10	sem	7	0,12	0,73	0,0159	Cascata (Cascading)
13	15	com	1	0,02	0,10	0,0003	Queda (slumping)
14	15	com	4	0,07	0,42	0,0052	Rolante(rolling)
15	15	com	7	0,12	0,73	0,0159	Cascata (Cascading)
16	15	sem	1	0,02	0,10	0,0003	Queda (slumping)
17	15	sem	4	0,07	0,42	0,0052	Rolante(rolling)
18	15	sem	7	0,12	0,73	0,0159	Cascata (Cascading)

## 4.5 Molhabilidade

A evaporação e a incorporação de água no citoplasma dos microrganismos causam ressecamento do substrato, o qual é um efeito adverso no crescimento microbiano. Os leitos fixos, apesar de serem mais facilmente operados e mais baratos que os móveis, têm como inconveniente o ressecamento do meio, comprometendo a produtividade do sistema (LAURENTINO, 2007; UMSZA, 2009). Em leitos móveis é possível fazer-se a inoculação da cultura fúngica no próprio equipamento e adicionar-se água ao sistema para repor a água perdida para o ar e para os próprios microrganismos. Esta água aspergida sobre as partículas funciona como um eficiente método de controle de temperatura, pois permite a remoção de calor do sistema através do calor necessário à evaporação da água (NAGEL, 2001; SCHUTYSER et al., 2003). Nagel (2001) e Schutyser et al. (2003) observaram que a presença de água não influenciava visivelmente o comportamento do leito, pois, as pequenas gotas de água não influenciam o movimento das partículas individualmente.

### 4.5.1 Área de molhabilidade dos aspersores

Na Figura 4.11 apresenta-se uma fotografia obtida durante a aspersão de água a 1500 mL/min de um bico atomizador sobre partículas de sílica gel. O aspersor está na posição central e é o padrão de medida no cálculo da área de molhabilidade.



Figura 4.11. Área molhada da superfície do leito de sílica gel, para vazão de aspersão de 1500 mL/min.

Os resultados da avaliação das imagens no cálculo da área de molhabilidade às diferentes vazões de água são apresentados na Tabela 4.11. Observe-se que o diâmetro molhado apresentou uma relação linear em relação à vazão de água aspergida, como pode

ser comprovado pela Equação 4.2, obtida por regressão linear cujo coeficiente de correlação  $R^2$  foi 0,991.

Tabela 4.11. Área total aspergida pelo atomizador central em função da vazão de água.

Vazão (mL/min)	Diâmetro molhado (cm)	Área molhada (cm <sup>2</sup> )
1500	10	78,54
1600	11	95,03
1700	12	113,10
1800	13	132,73
1900	14	153,94
2000	15	176,71
2100	16	201,06
2200	17	226,98
2300	18	254,47
2400	19	283,53
2500	20	314,16

$$\varphi_M = 0,01 \bar{V} - 5 \quad 4.2$$

Onde  $\varphi_M$  é o diâmetro molhado e  $\bar{V}$  é a vazão de água aspergida.

#### 4.5.2 Quantidade de água aspergida

Os resultados de retenção de água no leito de arroz cozido a 80°C durante 4 minutos são apresentados na Tabela 4.12. Note-se que, sob estas condições, a retenção máxima média foi  $0,2371 \frac{mL_{\text{água}}}{g_{\text{arroz}}} \pm 0,0424 \frac{mL_{\text{água}}}{g_{\text{arroz}}}$ . Assim, o nível máximo trabalhado nos experimentos de molhabilidade foi  $0,1 \frac{mL_{\text{água}}}{g_{\text{arroz}}}$ , para evitar a saturação da matriz de arroz.

Tabela 4.12. Quantidade máxima de absorção de água no leito de arroz.

<i>Água absorvida (mL)</i> <i>massa de arroz (g)</i>	
0,2062	
0,1685	
0,2673	
0,2744	
0,2690	
<b>Média</b>	0,2371
<b>Desvio padrão</b>	0,0424

#### 4.5.3 Experimentos de molhabilidade

Schutyser et al. (2003) avaliaram a distribuição de umidade em partículas de trigo, para aplicar a um sistema FES. Os perfis de umidade foram obtidos graças à aspersão de água com uma substância luminescente Rodamina WT, através de um sistema de dois aspersores. O equipamento empregado foi um tambor rotativo horizontal de 30 cm de diâmetro interno e 40 cm de comprimento. Estes autores afirmaram que a melhor distribuição foi obtida quando a água não ligada presente na superfície dos grãos foi rapidamente distribuída no meio, ou seja, houve um curto período de aspersão seguido de um período de mistura sem adição de água, a uma frequência de rotação de 1 RPM. Ademais, encontraram que para os graus de enchimento de 0,33 e 0,40 a homogeneidade de umidade foi alcançada aos 4 e 8 giros, respectivamente. Nagel et al. (2001) e Schutyser et al. (2002) afirmaram que o ressecamento do substrato durante o processo FES foi reduzido notavelmente quando as partículas no interior do reator foram misturadas com agitadores acoplados a um eixo central móvel, postado longitudinalmente dentro do tambor, o qual estava dotado de pás, sendo que sobre as partículas foi aspergida uma fina camada de água, compensando a perda de calor por evaporação.

Neste trabalho, as amostras de umidade foram obtidas em três pontos longitudinais do cilindro, numeradas como 1, 2 e 3, que correspondem às posições imediatamente abaixo dos três atomizadores como descrito na Figura 3.3. Os perfis de umidade são apresentados

nas Figuras 4.12 e 4.13 para o primeiro e o segundo grau de enchimento. Note-se que, a menos dos resultados para a vazão de 2000 mL/min há uma certa heterogeneidade nas quantidades de umidade absorvida pelas partículas. Isso pode estar relacionado com as diferenças próprias dos 3 aspersores, mas não chegaram a ser diferenças expressivas.

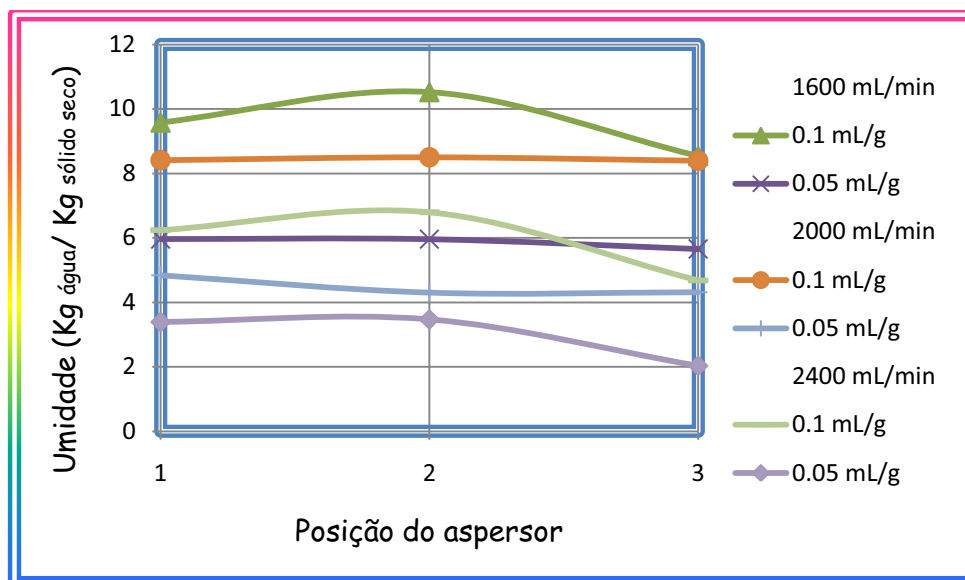


Figura 4.12. Umidade em função do comprimento do cilindro para um experimento com 5,8Kg de esferas de sílica gel após 5 giros a 1 RPM.

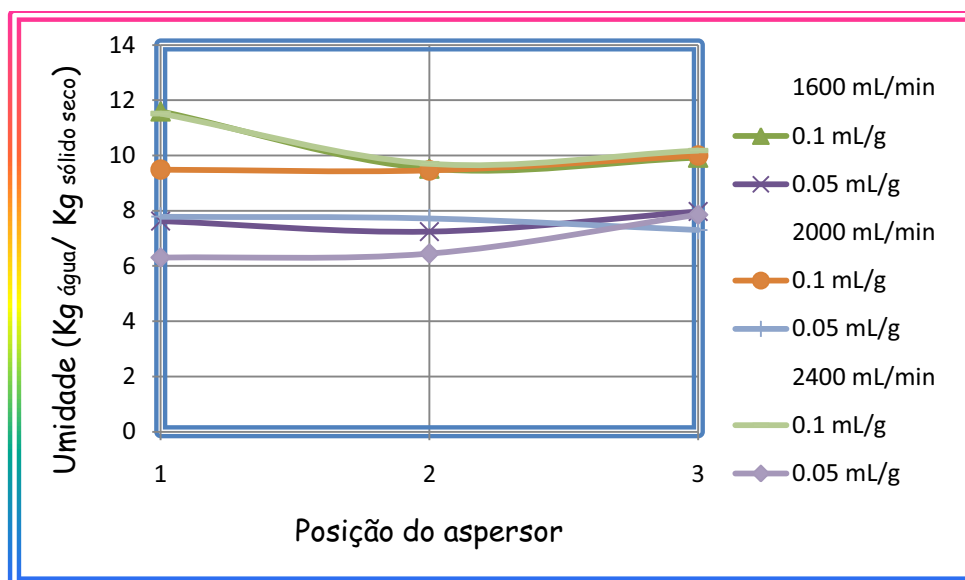


Figura 4.13. Umidade em função do comprimento do cilindro para um experimento com 12,6Kg de esferas de sílica gel após 9 giros a 1 RPM.

Para tal efeito, uma análise de variância foi realizada com os dados mostrados na Tabela 4.13, onde se apresenta a quantidade de umidade absorvida pelo leito de sílica gel.

Note-se que estatisticamente, com 5% de significância, os resultados foram estatisticamente iguais nas três posições do cilindro. Da análise de variância (ANOVA) realizada através do *software Minitab 15 versão 1.0.0*, obteve-se que o valor da distribuição de Fisher,  $F_0$ , calculado foi 0,12 e o valor do  $F_{crítico} = 3,2927$ . Portanto foi aceita a hipótese nula, onde com uma confiabilidade de 95% se sugere que as médias das umidades avaliadas nas três posições do tambor não tiveram diferença estatisticamente significativa.

Tabela 4.13. Umidade no leito de sílica gel em três posições do cilindro.

Carga (Kg)	Vazão (mL/min)	Quantidade de água (mL)	Umidade (BU)		
			Aspersor 1	Aspersor 2	Aspersor 3
5,8	1600	580	9,5789	10,5205	8,5434
		290	5,9652	5,9603	5,6566
	2000	580	8,4121	8,5007	8,3961
		290	4,8437	4,3022	4,3132
	2400	580	6,2364	6,7932	4,6789
		290	3,3895	3,4691	2,0272
12,6	1600	1260	11,6009	9,5238	9,9228
		630	7,6286	7,2457	7,9742
	2000	1260	9,4868	9,4618	9,9979
		630	7,7855	7,7242	7,3057
	2400	1260	11,5128	9,7044	10,1785
		630	6,3083	6,4529	7,8585

Segundo Schutyser et al. (2003) o processo de captura da água aspergida em um leito de partículas sólidas misturadas se dá em três etapas principalmente. Adição externa de água às partículas, absorção de água pelas partículas individuais e transferência de água entre as partículas vizinhas. Em este caso, em que as partículas sólidas foram esferas de sílica gel, pode-se dizer que a água absorvida por cada partícula não foi transferida às partículas vizinhas a menos que a água estivesse presente na forma de água livre na superfície das mesmas.

#### 4.6 Análise térmica

Visando a melhor compressão dos resultados, na Figura 4.14 é apresentado o esquema do biorreator com a nomenclatura dos sensores de temperatura.

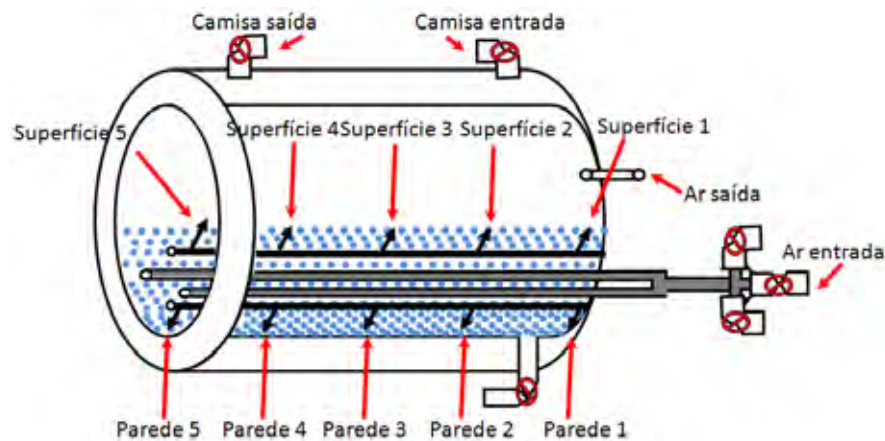


Figura 4.14. Diagrama esquemático do biorreator com os sensores de temperatura.

##### 4.6.1 Ensaios preliminares

Do primeiro experimento realizado, sem carga, em ausência de ar e na posição imóvel pode-se dizer que o sistema estava funcionando corretamente, pois os sensores de temperatura marcaram as medidas em diferentes posições durante os 270 minutos do ensaio. A temperatura da camisa foi elevada continuamente de 29 °C até 38 °C, onde se constatou que transferência de calor ocorre por convecção natural devido à diferença de temperatura entre a camisa e o ar. As perdas de calor da camisa para o ambiente puderam ser consideradas desprezíveis, pois as temperaturas de entrada e saída de água foram sempre muito próximas, apresentando diferenças inferiores a 1 °C. As temperaturas, tanto perto da camisa quanto na superfície foram muito próximas. A Figura 4.15 apresenta os resultados das condições mencionadas.



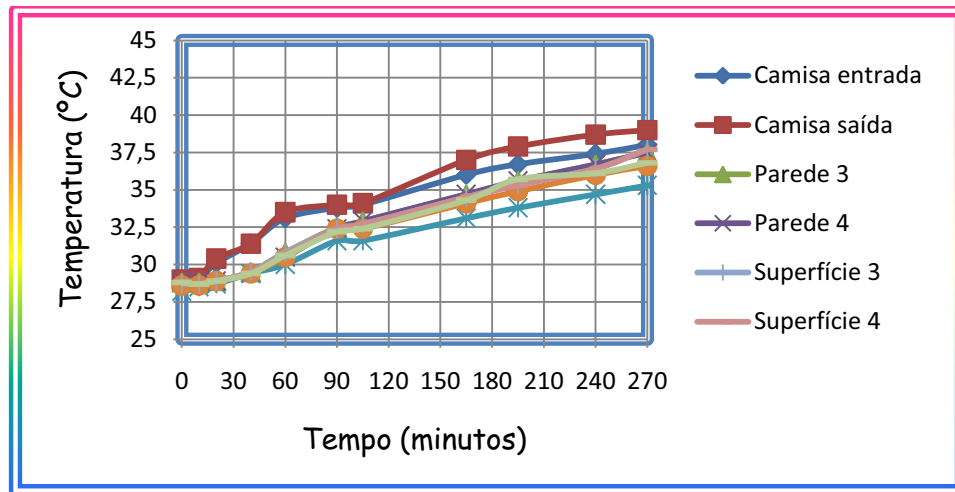


Figura 4.15. Temperatura em função do tempo para um experimento sem carga, em ausência de ar e elevação constante da temperatura da camisa.

Na Figura 4.16 apresenta-se um experimento preliminar para o primeiro grau de enchimento, com o reator imóvel, onde água foi posta a circular pela camisa, com elevação constante da temperatura de 27 °C até 34 °C, durante 300 minutos. Pode-se observar que, para o mesmo tempo de experimentação, a média das temperaturas no reator para o ensaio anterior foi de 37 °C, enquanto que neste ensaio a média foi de 32,2 °C, o que significa que o leito de esferas de vidro é uma resistência a mais à transferência de calor. Observe-se que no experimento anterior as temperaturas medidas no interior do tambor seguiram fielmente a tendência da temperatura da parede, enquanto que, no experimento com carga as variações de temperatura da parede foram amortecidas pelo leito de esferas de vidro.

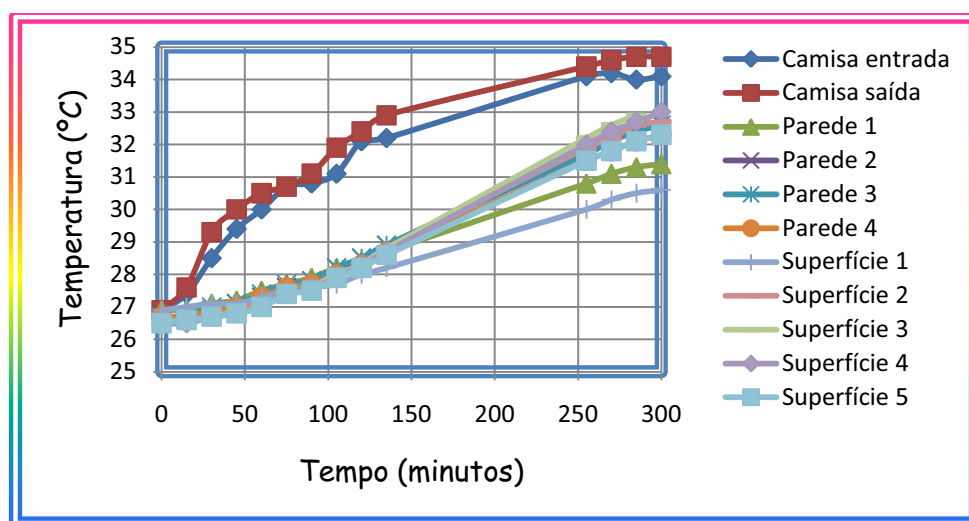


Figura 4.16. Temperatura em função do tempo para um experimento com o primeiro grau de enchimento, em ausência de ar e elevação constante da temperatura da camisa.

Na Figura 4.17 é apresentado o resultado para um experimento similar ao anterior, mas para 37 Kg de esferas de vidro, massa que obedece ao segundo grau de enchimento, com elevação continua da temperatura de 23 °C a 38 °C durante 570 minutos. Observe-se que, na Figura 4.17b, no tempo zero a temperatura em qualquer posição do cilindro é maior do que a temperatura aos 90 minutos, pois, inicialmente, a temperatura da camisa era menor do que das esferas de vidro. Note-se que o perfil apresentou uma forma parabólica, que caracteriza o efeito das extremidades, para o qual o centro geométrico do leito possuiu uma temperatura maior do que nos extremos do reator. Este fenômeno ocorreu porque as tampas do tambor eram de aço-inoxidável, sem isolamento, favorecendo a perda de calor para o ambiente, razão pela qual foram colocados isolantes de isopor de 2 cm de espessura para minimizar as perdas.

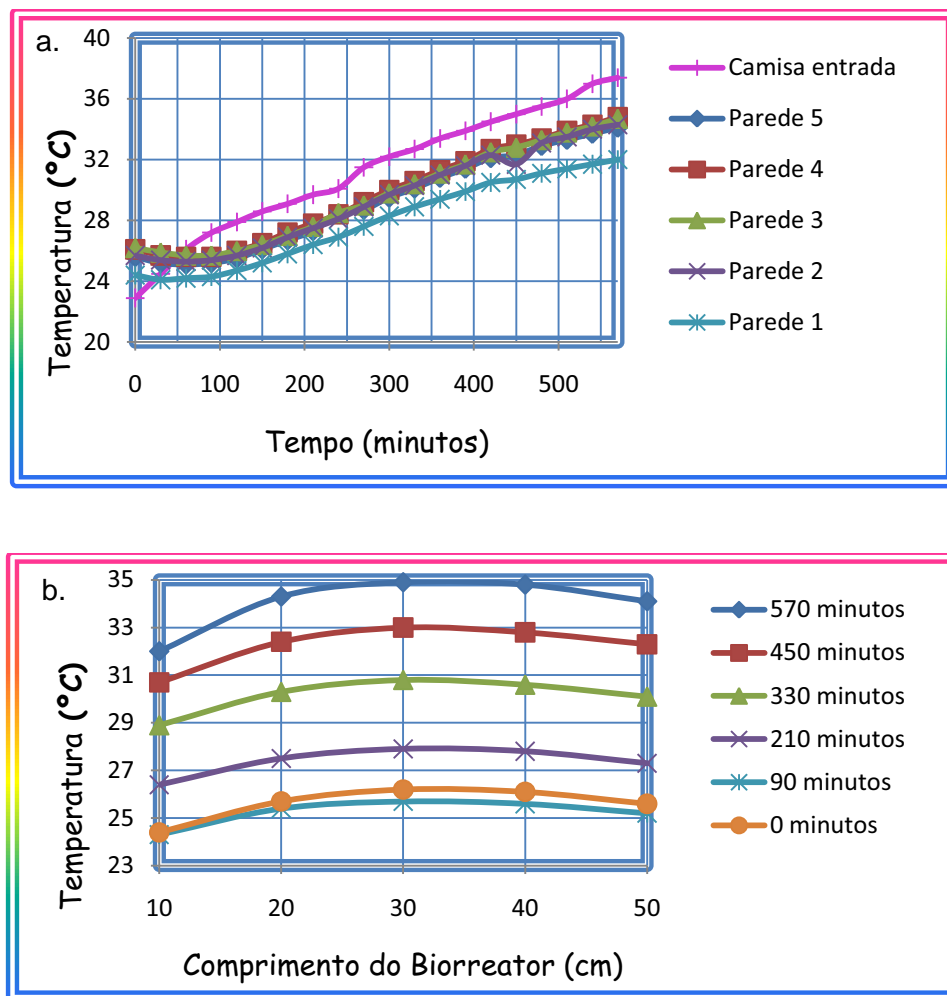


Figura 4.17. Temperatura em um experimento para o segundo grau de enchimento, em ausência de ar e elevação continua da temperatura da camisa de 23 °C a 38 °C. (a. Em função do tempo; b. Em função do comprimento do biorreator).

Observe, na distribuição de temperaturas da Figura 4.18, que o efeito das extremidades foi notavelmente reduzido com a adição das tampas de isopor para as mesmas condições de operação do experimento anterior. No experimento anterior a diferença máxima entre as temperaturas médias das esferas de vidro foi de 2,7 °C enquanto que, neste experimento a diferença entre essas temperaturas médias foi de 0,5 °C.

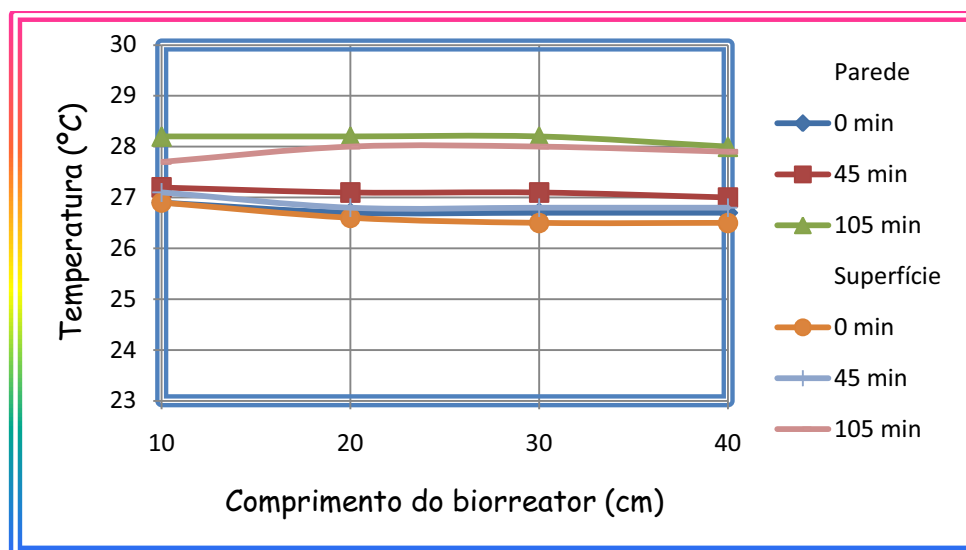


Figura 4.18. Temperatura em um experimento para o segundo grau de enchimento, em ausência de ar e elevação contínua da camisa de 27 °C a 34 °C, com isolamento térmico nas tampas, em função do comprimento do biorreator.

Na Figura 4.19 é apresentado um experimento para o primeiro grau de enchimento, em presença de ar a 60 °C e a diferentes vazões, e elevação contínua da camisa de 28 °C a 35 °C. A Figura 4.19a corresponde a uma vazão de ar de 15 L/min, a qual claramente mostra como as temperaturas das esferas tem os mesmos valores da temperatura da camisa, estabelecendo que essa vazão tem influência desprezível sob o meio. Por esta razão decidiu-se incrementar a vazão de ar a 90 L/min, como mostrado na Figura 4.19b. Aqui se observou um aumento de temperatura máximo de 3 °C por cima da temperatura da camisa. Assim, aumentou-se a vazão do ar para 150 L/min, como apresentado na Figura 4.19c. Neste experimento se observou uma elevação significativa da temperatura. As esferas de vidro tanto da superfície quanto as perto da camisa mostraram um aumento máximo de 7 °C em relação à temperatura da camisa. A partir deste resultado, decidiu-se empregar a vazão de 150 L/min nos ensaios térmicos, embora seja uma vazão muito alta comparada com os padrões de fermentação em estado sólido.

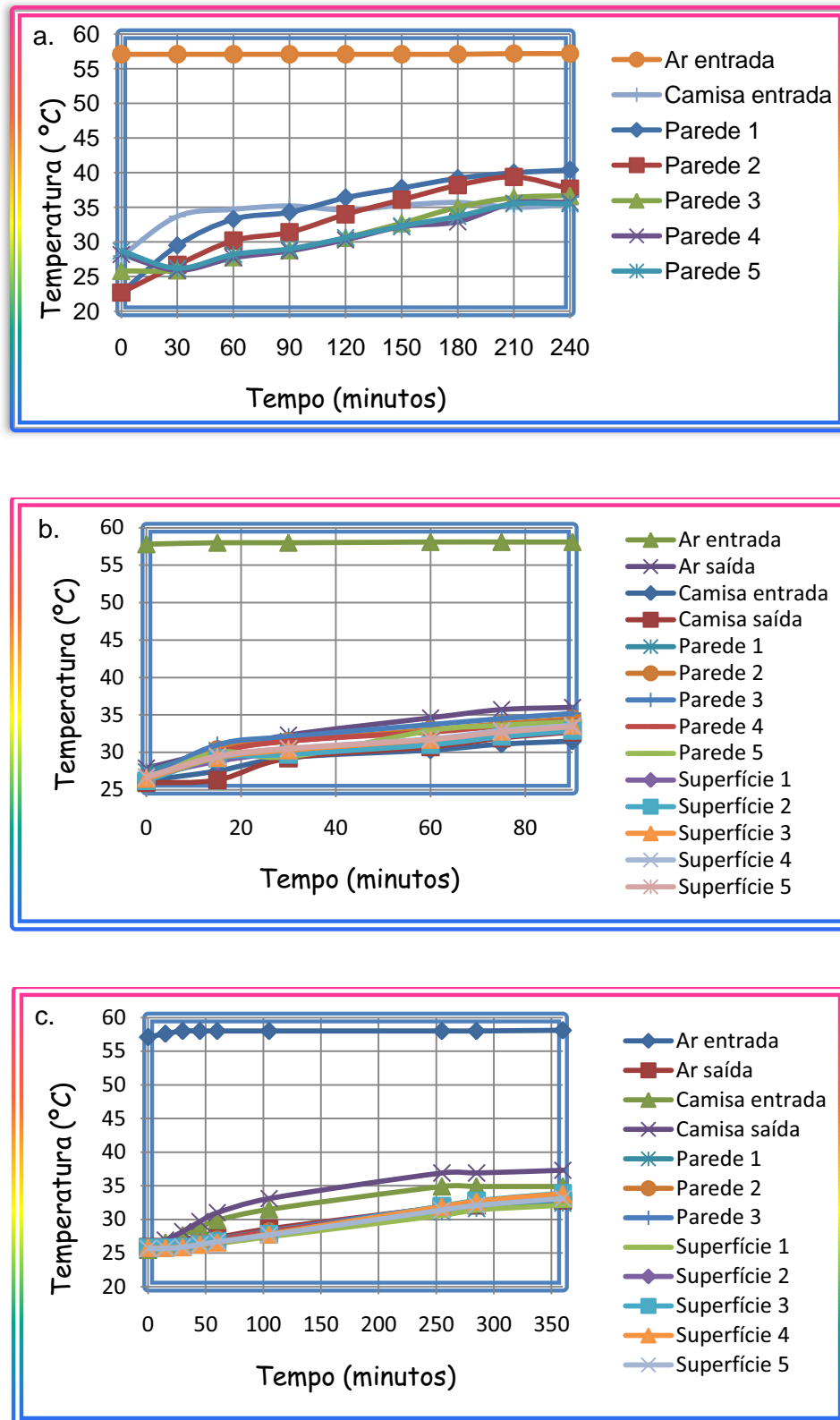


Figura 4.19. Temperatura em função do tempo de um experimento para o primeiro grau de enchimento, em presença de ar a 60 °C e elevação contínua da temperatura da camisa de 28 °C a 35 °C (a. Vazão de ar de 15 L/min, b. Vazão de ar de 90 L/min; c. Vazão de ar de 150 L/min).

Na Figura 4.20 é mostrada a resposta térmica de um experimento realizado a 1,5RPM de velocidade de rotação, para o segundo grau de enchimento, com ar a 60 °C de temperatura e vazão de 150 L/min. O arranjo mecânico do reator não permitiu a circulação da água simultaneamente à rotação, de modo que a bomba de circulação de água foi desligada e as válvulas fechadas enquanto o tambor girava 9 vezes. Posteriormente, o sistema foi acoplado novamente à circulação de água com aquecimento constante. Note-se também que as linhas que descrevem a temperatura de todos os sensores estão sobrepostas, indicando que as leituras feitas foram iguais para todas as posições do reator nos tempos em que foram coletados dados, sendo a diferença igual a 0,1 °C. Ou seja, com a rotação, as temperaturas foram notavelmente homogêneas.

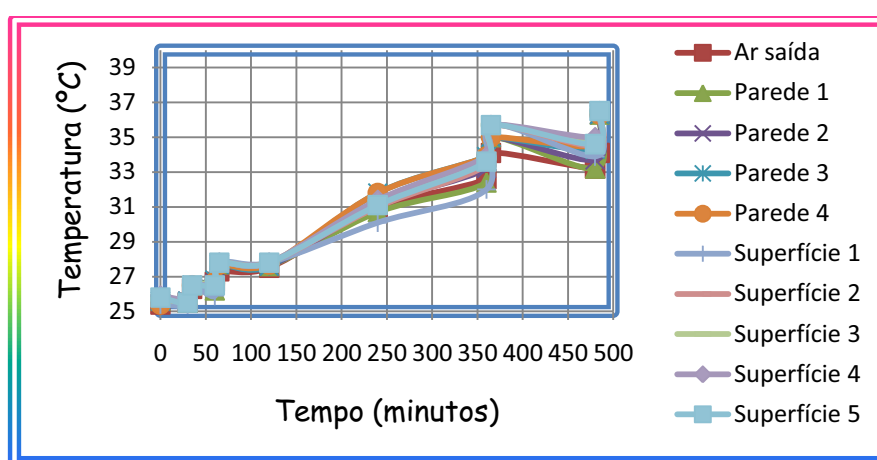


Figura 4.20. Temperatura em função do tempo de um experimento com leito móvel, em presença de ar a 60 °C e 150 L/min, para o segundo grau de enchimento com elevação de temperatura da camisa de 25 °C a 37 °C.

Na Figura 4.21 é mostrado o perfil de temperaturas para um experimento, no qual a temperatura do ar foi aumentada subitamente de 27 °C para 60 °C, à vazão constante de 150 L/min. Na Figura 4.21a o experimento foi realizado sem carga. Note-se que enquanto a temperatura do ar permaneceu a 27 °C e a temperatura da camisa a 28 °C, as temperaturas no interior do reator também permaneceram constantes em torno de 28 °C. No momento em que a temperatura do ar foi incrementada a 60 °C observou-se um aumento nas temperaturas internas do reator, tanto das que estão perto da camisa quanto as que estão mais afastadas da parede. Note-se que o sistema demorou 30 minutos para estabilizar, o que significa que frente a essa mudança de temperatura do ar, o sistema responde muito lentamente. Observe-se, demonstrando mais uma vez que a resistência à troca de calor no espaço interno do tambor é muito pequena, que todas as temperaturas (perto da camisa e na superfície) são muito próximas. Este experimento foi reproduzido para os três graus de enchimento. Na Figura 4.21b apresenta-se o resultado para o terceiro grau de enchimento,

*Lina María Grajales Agudelo*

representativo do que aconteceu com as demais cargas. Observe-se que as temperaturas das esferas de vidro que estão perto da camisa tiveram temperaturas mais próximas a esta, e que as temperaturas das partículas que se encontravam na superfície foram maiores, chegando a aumentar em quase 10 °C. O sistema não estabilizou nos 180 minutos que durou o experimento.

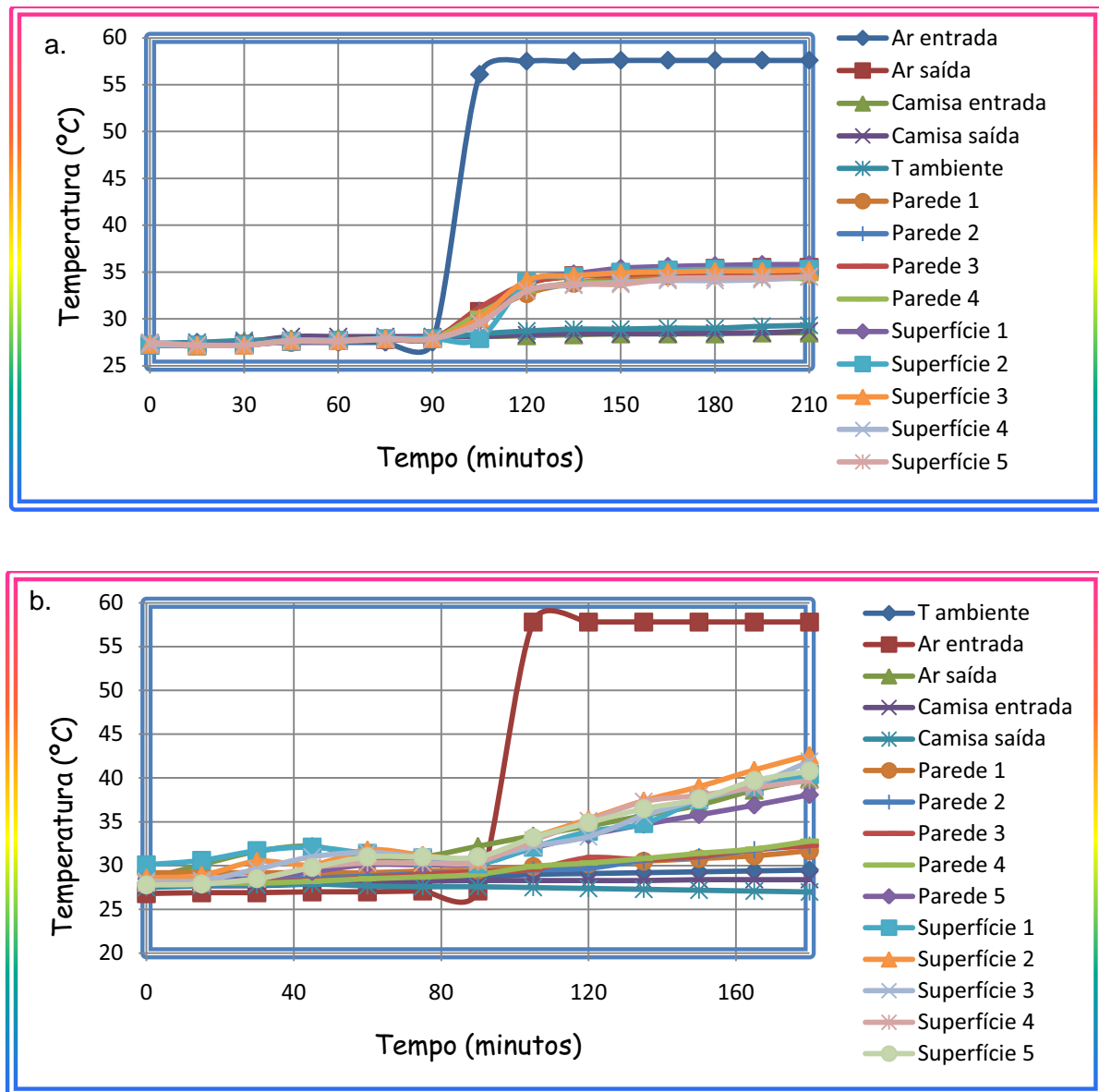
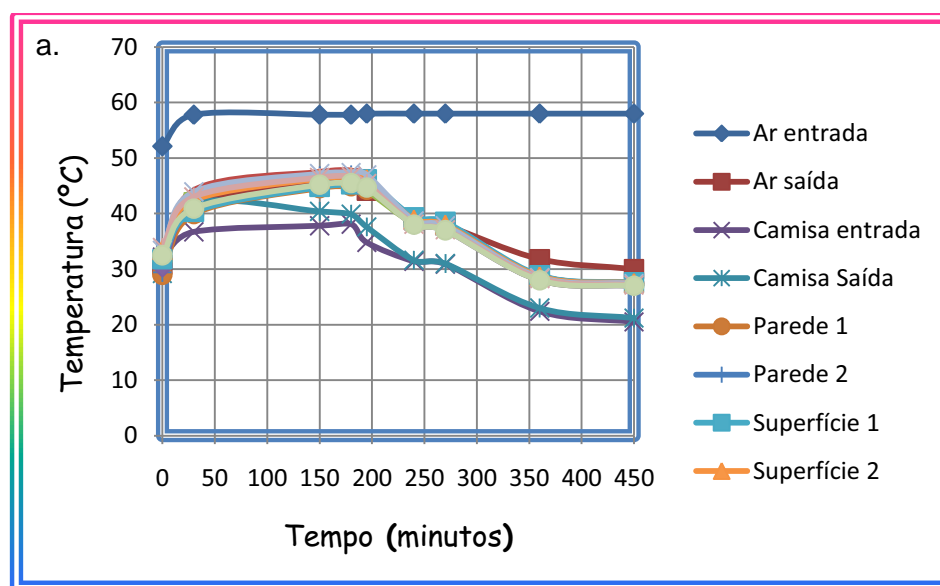


Figura 4.21. Temperatura como função do tempo no biorreator para um experimento com vazão constante de ar de 150 L/min e temperatura elevada subitamente de 27 °C para 58°C, com temperatura da camisa a 28 °C (a. Sem carga; b. Terceiro grau de enchimento).

Na Figura 4.22a é apresentada a distribuição de temperaturas para o experimento sem carga, em presença de ar a 60 °C e 150 L/min, submetido a um degrau de temperatura da camisa, de 40 °C para 20 °C. A mudança súbita de temperatura foi conseguida com ajuda de dois banhos termostáticos a temperaturas diferentes, 40 °C e 20 °C, onde os dois banhos estavam conectados ao sistema por um T e suas respectivas válvulas. No momento de fazer a mudança fechou-se a válvula do banho a 40 °C e abriu-se a válvula do banho a 20 °C. Note-se que o tempo que demora a camisa em atingir a temperatura desejada (20 °C) foi de 255 minutos, aproximadamente 4 horas. Neste caso pode-se dizer que o sistema tem um mecanismo de resposta muito lento para degraus de temperatura, sendo um problema para o controle do fermentador através desta opção de operação. Observe também que o emprego de uma vazão de ar extremadamente alta não modifica a tendência das temperaturas médias, pois estas responderam de acordo com a tendência observada para a camisa, embora o ar nesta vazão tenha conseguido aumentar as temperaturas no interior do reator em até 8 °C. A Figura 4.22b corresponde ao perfil de temperaturas do mesmo experimento, é de ressaltar que ambos os perfis de temperatura, tanto perto da camisa quanto no espaço de ar são iguais dado que não existe meio particulado e a transferência de calor ocorre diretamente com o ar.



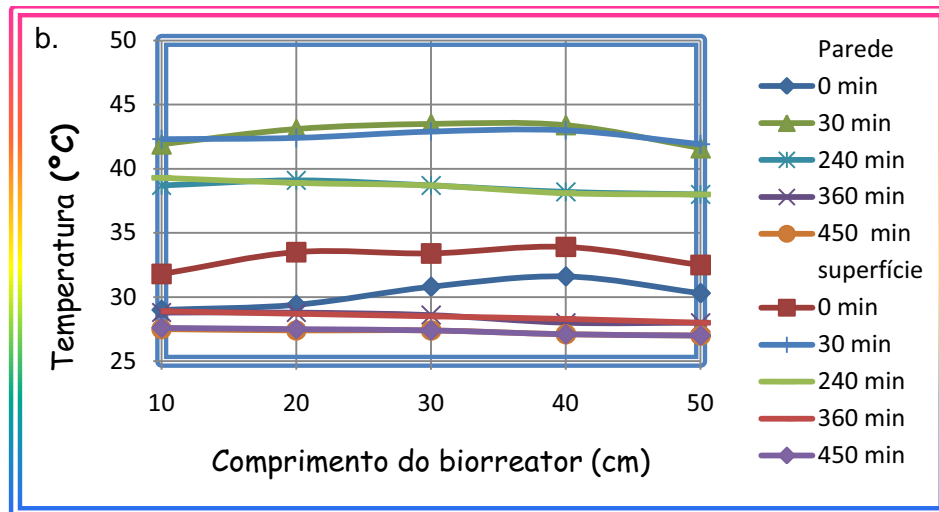


Figura 4.22. Temperatura de um experimento sem carga, em presença de ar a 60 °C e 150L/min e com mudança súbita da temperatura da camisa de 40 °C para 20 °C (a. Em função do tempo; b. Em função do comprimento do biorreator).

Na Figura 4.23 é apresentado um experimento para o terceiro grau de enchimento, em ausência de ar e temperatura da camisa controlada a 28 °C, até obter o estado estacionário, no tempo de 180 minutos. Nesse momento, foram aspergidos 1500 mL de água a 40 °C e uma vazão de 2000 mL/min. Esperava-se que a temperatura das partículas incrementaria significativamente com a aspersão da água. No entanto, deve-se considerar que a quantidade de água em relação à massa de partículas foi muito pequena. Ademais, quando houver escoamento de ar com umidade relativa baixa, haverá variação da temperatura devido à remoção do calor de vaporização, tornando este controle mais efetivo. Porém, houve um aumento de aproximadamente 2 °C na temperatura das partículas. Posterior à aspersão de água sob o sistema, aos 345 minutos do experimento, este foi submetido a rotação onde foi observada a homogeneização da temperatura das partículas a 28,2 °C, tanto perto da camisa quanto na superfície das mesmas. Note-se que dentre os experimentos avaliados anteriormente, este foi o que apresentou menor tempo de resposta, podendo ser considerado como um método eficiente de resfriamento instantâneo.



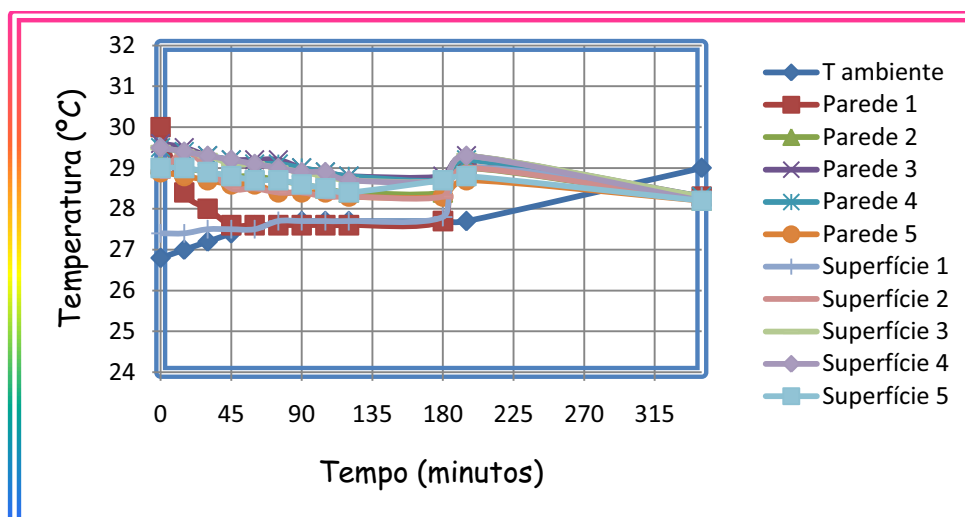


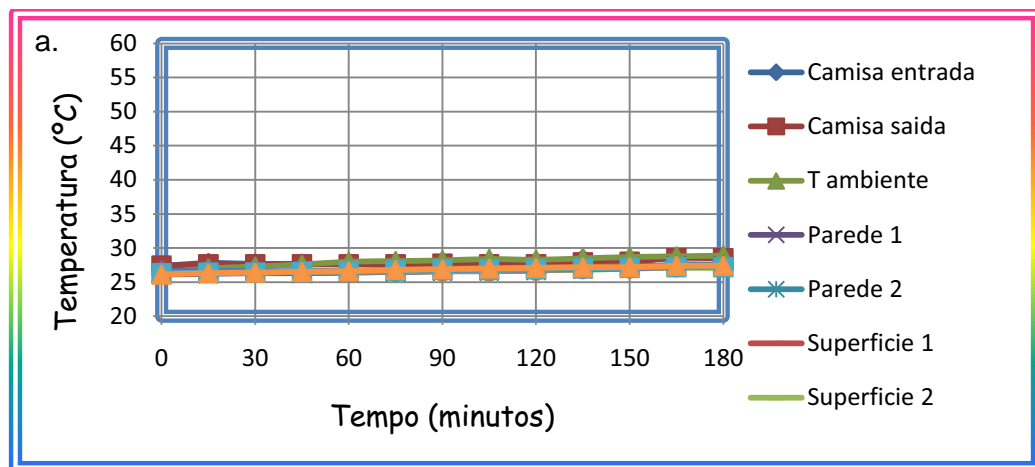
Figura 4.23. Temperatura em função do tempo para um experimento com temperatura da camisa a 28 °C, terceiro grau de enchimento, em ausência de ar, com aspersão de água a 40 °C aos 180 minutos e rotação aos 345 minutos.

#### 4.6.2 Ensaios térmicos

As dimensões do reator foram selecionadas por serem próximas às do reator do grupo da Universidade de Wageningen – Holanda (SCHUTYSER, 2002; 2003). Isto facilitou a comparação dos resultados obtidos neste trabalho com os de um grupo tradicional na área. Ademais, estas dimensões favoreceram a coleta de dados no interior do tambor, permitindo a observação de mudanças significativas nas variáveis de respostas do sistema.

Mellmam (2001, 2004) afirmou que no interior de um biorreator de leito móvel, as partículas sólidas criam um ponto frio onde a posição e a temperatura não podem ser medidas com precisão devido ao movimento transversal dos sólidos e a quantidade de material particulado dentro do reator, conseqüentemente, é difícil estudar a transferência de calor nos cilindros rotativos. Entretanto, segundo o arranjo mecânico do biorreator empregado neste trabalho, pôde-se medir as temperaturas em duas posições do leito, na superfície das partículas e perto da camisa, possibilitando sua análise. Rodríguez et al. (2005) investigaram a produção de enzimas lignolíticas por FES em 4 diferentes tipos de reatores, um dos quais foi um tambor rotativo. Eles asseguraram que é importante conhecer a resposta térmica do equipamento, em presença e ausência do ar, pois na faixa trabalhada, a condutividade térmica de ar mostrou ser menor do que a da água, diminuindo a taxa de transferência de calor.

Na Figura 4.24a é apresentado um experimento em ausência de ar e na Figura 4.24b é apresentado um experimento em presença de ar. Observe-se que para o experimento realizado em ausência de ar, a temperatura das esferas de vidro permaneceu quase constante em torno dos 28 °C, durante os 180 minutos, o que era de se esperar já que o sistema apresenta influência externa desprezível. Esta mesma resposta foi observada para os três graus de enchimento avaliados neste trabalho. O experimento em presença de ar demonstrou que a temperatura das esferas começou a aumentar desde o momento em que foram postas em contato com o ar a 60 °C e 150 L/min, como já mencionado uma vazão extremadamente alta e fora dos padrões de FES. Observe-se ademais, que o aumento da temperatura nas esferas de vidro foi significativo, tanto para as esferas que estão perto da camisa quanto para as que estão na superfície do leito. Note-se que a temperatura das partículas que estão na superfície aumentou em quase 13 °C, enquanto que a temperatura das partículas que estão perto da camisa aumentou no máximo 6 °C. Isto significa que há um perfil radial de temperaturas, o que é desvantajoso para processos FES, podendo afetar as atividades metabólicas do fungo e provocando ressecamento do substrato. Este mesmo comportamento foi observado para os três graus de enchimento analisados.



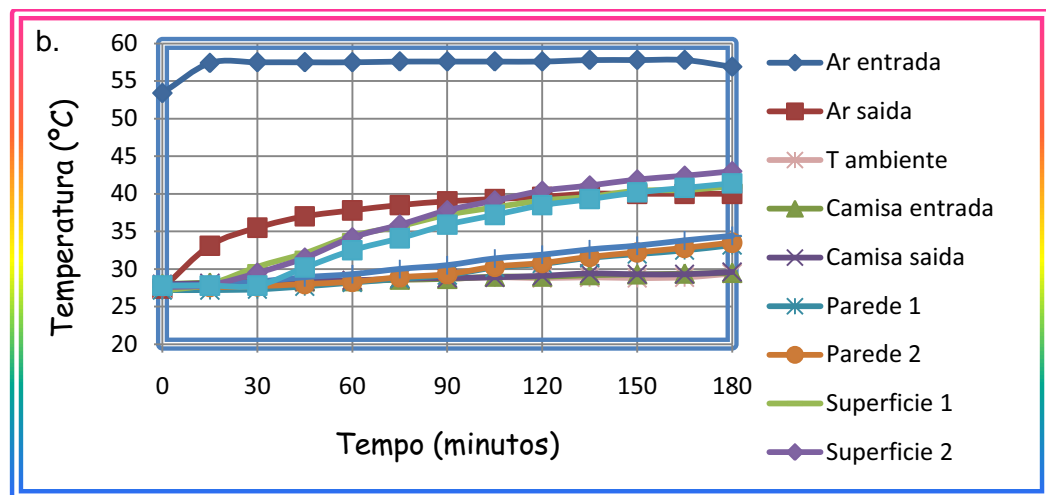


Figura 4.24. Temperatura como função do tempo de um experimento para o segundo grau de enchimento, com leito fixo, temperatura da camisa a 28 °C (a. Em ausência de ar; b. Em presença de ar a 60 °C e 150 L/min).

Em trabalho recentemente desenvolvido por Eduardo (2009), encontrou-se que, em um tambor rotativo horizontal de 40 L, misturado por pás, as temperaturas das partículas do substrato (arroz) que estão perto da camisa foram muito próximas à temperatura da camisa, concordando com o visto anteriormente na Figura 4.24. Marsh et al. (2000) encontraram que em reatores de leito fixo, como biorreatores empacotados ou de bandejas, formam-se elevados gradientes de temperatura, devido a que as propriedades térmicas dos substratos sólidos não favorecem a transferência de calor.

Na Figura 4.25a mostra-se como a temperatura na superfície das partículas é maior do que perto da camisa, para um experimento típico com leito fixo, temperatura da camisa a 28 °C e em presença de ar à vazão e temperatura constante. Na Figura 4.25b apresenta-se o perfil longitudinal de temperatura para este experimento, observe-se que a temperatura perto da entrada do ar está quase 2 °C por cima da temperatura aos 50 cm da entrada de ar, fenômeno atribuído à dissipação de calor através do tubo que contém os termopares, o que pode ser causado pela transferência de calor que se dá na forma de aleta.

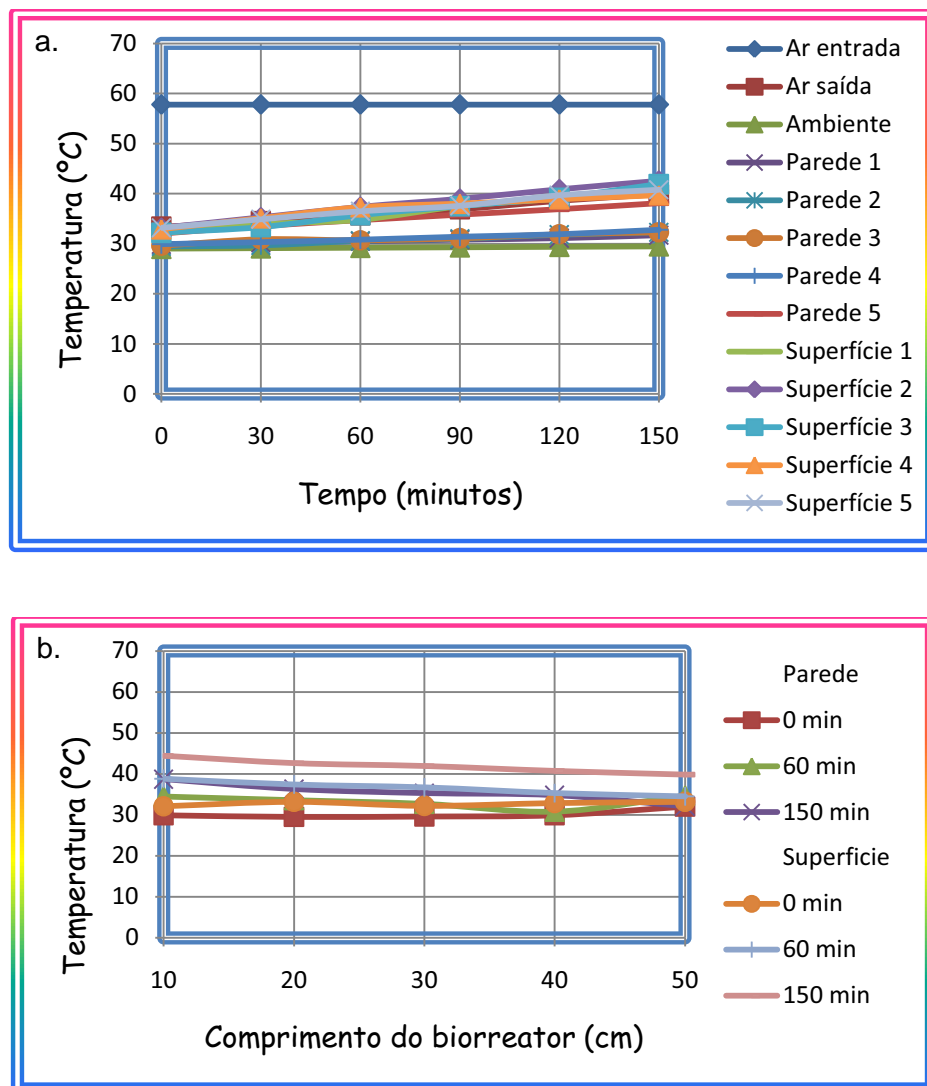


Figura 4.25. Temperatura em um experimento para o terceiro grau de enchimento, com leite fixo, temperatura da camisa a 28 °C e em presença de ar a 60 °C e 150 L/min (a. Em função do tempo; b. Em função do comprimento do biorreator).

Kelbert et al. (1991) estudaram a mistura das partículas e a transferência de calor de um leite no regime de partículas rolante (rolling), demonstrando que a mistura tem uma grande influência na distribuição de temperatura dentro do leito de sólidos. Boateng et al. (1996) afirmaram que o movimento de partículas rolante (rolling) era melhor do que o movimento de partículas em queda (slumping), já que a superfície podia ser renovada constantemente e melhorava a taxa de transferência de calor. Porém, dos resultados obtidos na seção de mistura de partículas deste trabalho, concluiu-se que para arroz cozido por imersão a 80 °C durante 4 minutos, o número de giros necessários à homogeneização das partículas foi independente do regime de escoamento. Portanto, adotou-se, para todos os graus de enchimento, a frequência de rotação de 1,5 RPM, correspondente ao sub-regime em queda (slumping) nos experimentos de transferência de calor. Segundo Marsh et

al. (2000), para qualquer tipo de material, é possível reduzir os gradientes de temperatura, pela mistura intermitente ou contínua das partículas nos tambores rotativos. No presente trabalho, graças às rotações, foram praticamente eliminadas as variações de temperatura, como se observa na Figura 2.26a e 4.26b. Note-se que para este experimento, com a rotação do tambor, a variação de temperaturas foi minimizada e se observou quase total homogeneidade. Este efeito é desejável para o caso de FES, já que o propósito é ter um equipamento que possa retirar calor do meio fermentativo rapidamente e de maneira homogênea sem inibir as atividades metabólicas do fungo por excesso na velocidade de rotação. No entanto, estudos microbiológicos específicos devem ser conduzidos para avaliar o comportamento do fungo sob agitação. Isto foi observado para os três graus de enchimento avaliados.

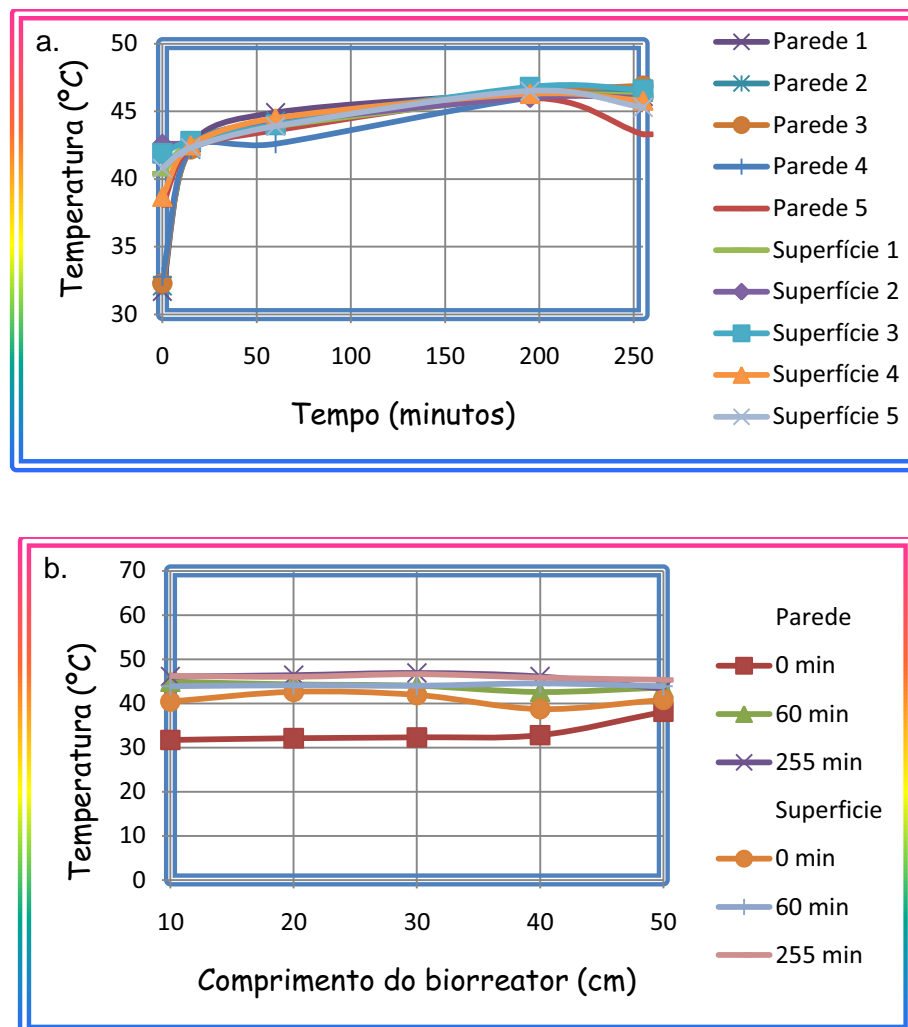
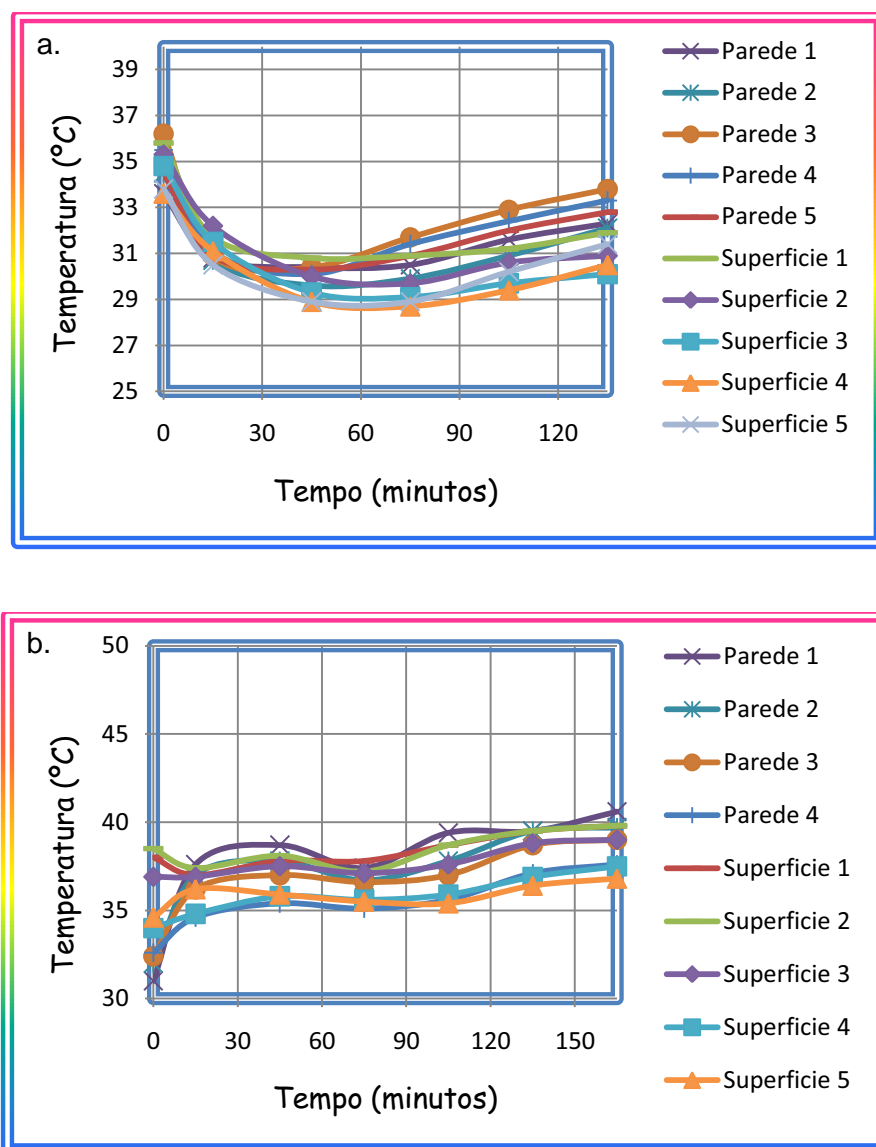


Figura 4.26. Temperatura em um experimento para o terceiro grau de enchimento, com leito móvel a 1,5 RPM, 11 giros, temperatura da camisa a 28 °C e em presença de ar 60 °C e 150L/min (a. Em função do tempo; b. Em função do comprimento do biorreator).

A Figura 4.27 a, b e c representa a variação temporal da temperatura de um experimento com temperatura da camisa a 28 °C e em presença de ar à vazão e temperatura constantes. Nesta Figura mostra-se como as partículas são misturadas à baixa velocidade de rotação, 1,5 RPM, dentro do cilindro rotativo, com uma consequente melhora na transferência de calor e na homogeneidade das temperaturas. Note-se também que o sistema necessita de um tempo de adaptação no início dos experimentos. Este tempo para todos os experimentos foi de 15 minutos. Os graus de enchimento avaliados alcançaram a homogeneidade térmica para 5, 9 e 11 giros, para o primeiro, segundo e terceiro grau de enchimento, respectivamente.



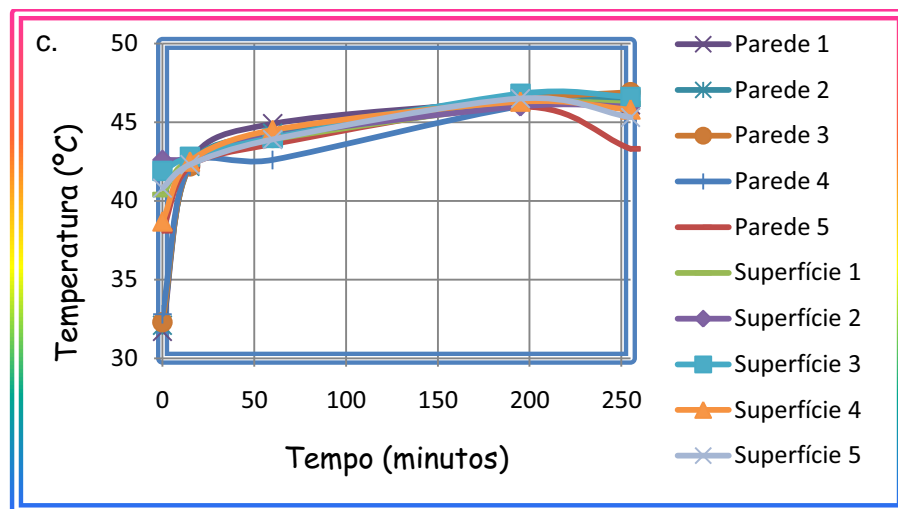


Figura 4.27. Temperatura em função do tempo de um experimento com leito móvel a 1,5RPM, temperatura da camisa a 28 °C e em presença de ar a 60 °C e 150 L/min (a. Primeiro grau de enchimento; b. Segundo grau de enchimento; c. Terceiro grau de enchimento).

Finalmente, de todas as análises térmicas realizadas nesta etapa do projeto, pode-se concluir que dos experimentos em presença de ar, a 60 °C e baixas vazões (15L/min), a influência do ar sobre a resposta térmica do sistema foi desprezível, enquanto que para altas vazões (150 L/min) houve um sensível gradiente radial de temperatura no interior do leito. Nos experimentos realizados em presença e ausência de ar submetidos à rotação do tambor, houve homogeneização das temperaturas medidas, que foram praticamente as mesmas em todas as posições de medida.



## Conclusões

Da técnica de traçadores empregada para determinar a homogeneidade das partículas de arroz, pode-se concluir que esta homogeneidade depende diretamente da quantidade de material carregado, independente da frequência de rotação na qual foram realizados os experimentos e da presença de tubos. Para cargas de 5, 10 e 15 Kg foram obtidas misturas homogêneas para 10% de traçador depois de 5, 9 e 11 giros, respectivamente. A concentração de traçadores não influenciou no tempo de mistura, já que o número de giros necessários para obter uma mistura homogênea com 50% de traçador foi igual aos obtidos nos experimentos realizados com 10%. O *software Lenseye* foi aplicado com êxito à análise da mistura de partículas.

Através da observação dos vídeos de movimentação das partículas de arroz identificou-se o regime e os sub-regimes de escoamento das partículas, obtendo-se o regime na forma básica de movimentação em cascata e os sub-regimes queda, rolante e cascata, para as velocidades de rotação 1, 4 e 7 RPM, respectivamente. Independentemente da velocidade de rotação, os vídeos analisados em presença de tubos alimentadores apresentaram regiões de má circulação ao redor dos tubos alimentadores. Os experimentos realizados em ausência de tubos alimentadores apresentaram boa mistura em todas as regiões do leito, incluindo a região central.

De maneira geral as maiores velocidades de partícula foram alcançadas nas altas frequências de rotação para as três regiões de análise (queda, centro e subida). As partículas analisadas do lado da parede do tambor apresentaram a mesma velocidade para todas as cargas, variando apenas com a frequência de rotação, pois as partículas nesta região possuem a mesma velocidade rotacional do tambor. Na superfície livre do leito, as partículas tiveram a mesma velocidade para todas as cargas, dado que na superfície livre as partículas dependem da velocidade rotacional do tambor e não dependem de sua inclinação. As menores velocidades foram detectadas nas regiões centrais do leito, onde o

*Lina María Grajales Agudelo*



padrão de escoamento observado foi uma menor velocidade de partícula às maiores quantidades de carga. Nos experimentos realizados com tubos alimentadores, as velocidades das partículas ao redor dos tubos foram mais lentas do que aquelas observadas na região próxima nos experimentos realizados sem tubos.

Foi possível padronizar o grau de enchimento para diferentes tipos de materiais padronizando-se as condições necessárias à comparação dos experimentos. Os três graus de enchimento,  $f$ , empregados nesta pesquisa foram 0,23, 0,43 e 0,60. O menor ângulo repouso dinâmico foi para as partículas mais lisas e arredondadas (esferas de vidro) de  $22,67^\circ \pm 1,5$ , o maior ângulo repouso dinâmico foi para as partículas angulares, aderentes e de forma irregular (arroz branco e arroz misturado nas proporções de 10 e 50% de traçador)  $42,58^\circ \pm 3,73$ . As esferas de sílica gel, que possuem forma arredondada e diâmetro variável tiveram um valor intermediário de  $25^\circ$ .

A área de molhabilidade do bico atomizador foi diretamente proporcional à vazão de água empregada na aspersão. Nos experimentos de molhabilidade, encontrou-se que as médias de quantidade de umidade absorvida pelo leito de sílica gel, obtidas nas três posições de coleta de amostras do tambor, para os dois graus de enchimento avaliados, não tiveram diferença estatisticamente significativa. Porém, as distribuições de umidade apresentaram forma parabólica para as vazões de 1600 e 2400 mL/min, enquanto que para a vazão de 2000 mL/min se observou completa homogeneidade, revelando diferenças construtivas dos aspersores.

Nos ensaios térmicos, em todos os níveis do grau de enchimento avaliados, em ausência de ar e com temperatura da camisa controlada a  $28^\circ\text{C}$ , as temperaturas medidas no interior do tambor foram estáveis e próximas a  $28^\circ\text{C}$ , revelando que o ambiente teve pouca influência sobre a resposta térmica do sistema. Nos experimentos em presença de ar, a  $60^\circ\text{C}$ , vazão de ar de 15L/min e elevação contínua da temperatura da camisa, constatou-se que nesta vazão o ar exerce pouca influência sobre a temperatura do leito, enquanto que para a vazão 150 L/min a temperatura foi influenciada significativamente em. Para os ensaios com temperatura da camisa  $28^\circ\text{C}$  e vazão de ar 150 L/min houve um gradiente radial de temperatura expressivo, que foi praticamente eliminado quando o tambor foi posto a girar.



## Sugestões

Sugere-se que a avaliação de concentrações por análise de imagem no *software Lenseye* seja estudada detalhadamente, onde as amostras possam ser medidas em uma faixa maior de concentração. Também, recomenda-se a aplicação a outros sistemas que empreguem misturas de partículas pela técnica de traçadores, como diferentes tipos de grãos.

Recomendam-se em experimentos futuros, ensaios térmicos nos quais seja empregada a aspersão de água sob o meio de partículas sólidas (esferas de vidro), em presença de ar, onde esteja incluída a medida de umidade do ar, visando posteriores balanços de energia para avaliar a troca de calor dentro do sistema.

Sugerem-se ensaios de produção do fungo *M. anisopliae*, por fermentação em estado sólido, onde sejam testados os resultados obtidos para a mistura de partículas e molhabilidade para os três graus de enchimento trabalhados neste estudo.

Aconselha-se fazer ensaios de esterilização com vapor e testes de cocção do arroz dentro do biorreator, já que um dos objetivos principais é reunir todas as etapas de produção do fungo em equipamento só.



## Bibliografia

AIDOO, K. E.; HENDY, R.; WOOD, J. B. Solid substrate fermentation. *Advances in Applied Microbiology*, San Diego, v. 28, p. 201 – 237, 1982.

ALVES, S. B. Controle microbiano de insetos. In COCROMO, W. B. Manejo integrado de pragas. São Paulo: Ed. UNESP, 1990. p. 147 – 176.

ALVES, S. B.; PEREIRA, R. M. Produção de fungos entomopatogênicos. In: ALVES, S. B. (Ed). Controle microbiano de insetos. Piracicaba: USP, ESALQ. 1998. p. 845 – 869.

ASAGBRA, A. E.; SANNI, A. I.; OYEWOLE, O.B. Solid-state fermentation production of tetracycline by *Streptomyces* strains using some agricultural wastes as substrate. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, Oxford, v. 21, n. 2, p. 107 – 114, 2005.

ASHLEY, V. M.; MITCHELL, D. A.; HOWES, T. Evaluating strategies for overcoming overheating problems during solid-state fermentation in packed bed bioreactors. *Biochemical Engineering Journal*, Amsterdam, v. 3, n. 2, p. 141 – 150, 1999.

BALABAN, M. O. Quantifying Nonhomogeneous Colors in Agricultural Materials Part I: Method Development. *Journal of Food Science*, Chicago, v. 73, n. 9, p. 431 – 437, 2008.

BATISTA-FILHO, A; ALMEIDA, J. E. M.; LEITE, L. G. Avaliação do uso do fungo *Metarhizium anisopliae* para controle da cigarrinha da raiz da cana de açúcar *Mahanarva fimbriolata* (STAL,1894) (Hemíptera: Cercopidae) no Estado de São Paulo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENTOMOLOGIA, 20., 2004, Gramado. Livro de resumos... Gramado: EMBRAPA, 2004. p. 277.

BOATENG, A. A.; BARR, P. V. Modelling of particle mixing and segregation in the transverse plane of a rotary kiln. *Chemical Engineering Science*, New York, v. 51, n.17, p. 4167 – 4181, 1996.

*Lina María Grajales Agudelo*

CHINN, M. S.; NOKES, S. E. Temperature control of a solid substrate cultivation deep-bed reactor using an internal heat exchanger. Transactions of the ASAE, Saint Joseph, v. 46, n. 6, p. 1741 – 1749, 2003.

CRISTO, H.; MARTINS, M.; OLIVEIRA, L.; FRANCA, A. Transverse flow of coffee beans in rotating roasters. Journal of Food Engineering, Essex, v. 75, p. 142 – 148, 2006.

DURAND, A.; DE LA BROISE, D.; BLACHERE, H. Laboratory scale bioreactor for solid state processes. Journal of Biotechnology, Amsterdam, v. 8, p. 59 – 66, 1988.

DURAND, A.; RENAUD, R.; MARATRAY, J.; ALMANZA, S. The INRA-Dijon reactors: designs and applications. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON SOLID STATE FERMENTATION, 2., 1995, Montpellier. Proceedings... Montpellier: Kluwer Academic, 1995. p. 71 – 92.

DURAND, A. Bioreactor designs for solid state fermentation. Biochemical Engineering Journal, Amsterdam, v. 13, p. 113 – 125, 2003.

EDUARDO, M. Ampliação de escala em fermentação semi sólida: balanços de massa e de energia aplicados a cultivos de *Monascus SP.* em bioreator do tipo tambor com agitação interna. 2009. 63 f. Qualificação (Mestrado em Engenharia Química) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

FERNANDEZ, M.; PEREZ-CORREA, J. R.; SOLAR, I.; AGOSIN, E. Automation of a solid substrate cultivation pilot reactor. Bioprocess Engineering, New York, v. 16, p.1– 4, 1996.

FERRON, P. Biological control of insect pests by entomogenous fungi. Annual Review of Entomology, Stanford, v. 23, p. 409 – 442, 1978.

HENEIN, H.; BRIMACOMBE, J. K.; WATKINSON, A. P. Experimental study of transverse bed motion in rotary kilns. Metallurgical and Materials Transactions, Warrendale, v. 14, n. 2, p. 191 – 205, 1983.

HESSELTINE, C. W. Solid state fermentations. Biotechnology & Bioengineering, New York, v. 14, p. 517 – 532, 1972.

IGNATIUS, N. F. J. Process control of solid-state fermentation: simultaneous control of temperature and moisture content. 2002. 192 f. Dissertação (Doutorado em Engenharia Química) – Wageningen Universiteit, Wageningen, 2002.

KALOGERIS, E.; INIOTAKI, F.; TOPAKAS, E.; CRISTAKOPOULOS, P.; KEKOS, D.; MACRIS, B. J. Performance of an intermittent agitation rotating drum type bioreactor for solid-state fermentation of wheat straw. *Bioresource Technology*, Essex, v. 86, p. 207 – 213, 2003.

KELBERT, F.; ROYERE, C. Lateral mixing and heat transfer in a rolling bed. *International Chemical Engineering*, New York, v. 31, p. 441 – 449, 1991.

LACEY, L. A.; FRANSEN, J. J.; CARRUTHERS, R. I. Global distribution of naturally occurring fungi of *Bemisia*, their biologies and use as biological control agents. In: TAXONOMY, BIOLOGY, DAMAGE, CONTROL AND MANAGEMENT, 1., 1995, Andover. Livro de resumos... Andover: Andover Intercept, 1996. p. 401 – 433.

LACEY, L. A.; KAYA, H. K. Field manual of techniques in invertebrate pathology: application and evaluation of pathogens for control of insects and other invertebrate pests. Dordrecht: Kluwer Academic. 2000. p. 870.

LAURENTINO, C. L. Transferência de calor em leitos fixos com aplicação em reatores de fermentação em estado sólido. 2007. 103 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência de Alimentos) - Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, São José do Rio Preto, 2007.

LEITE, L. G.; BATISTA-FILHO, A.; ALMEIDA, J. E. M.; ALVES, S. B. Produção de fungos entomopatogênicos. Ribeirão Preto: A. S. Pinto. 2003. p. 92.

LONSANE, B. K.; SAUCEDO-CASTANEDA, G.; RAIMBAULT, M.; ROUSSOS, S.; VINIEGRA-GONZALEZ, G.; GHILDYAL, N. P.; RAMAKRISHNA, M.; KRISHNAIAH, M. M. Scale-up strategies for solid state fermentation systems. *Process Biochemistry*, London, v. 27, p. 259 – 273, 1992.

MARQUES, E. J. Controle microbiano de cigarrinhas (Hemiptera: Cercopidae) com *Metarhizium anisopliae* (Metsch.) Sorok: eficiência e limitações,. In: SIMPÓSIO DE

CONTROLE BIOLÓGICO, 3., 1992, Jaguariúna. Livro de Resumos... Jaguariúna: Águas de Lindóia, 1992. p. 73 – 78.

MARSH, A. J.; STUART, D. M.; MITCHELL, D. A.; HOWES, T. Characterizing mixing in a rotating drum bioreactor for solid-state fermentation. *Biotechnology Letters*, Netherlands, v. 22, p. 473 – 477. 2000.

MARTIN, N.; SOUZA, S. R.; SILVA, R., GOMES, E. Pectinase production by fungal strains in solid-state fermentation using agro-industrial bioproduct. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, Curitiba, v. 47, p. 813 – 819, 2004.

McCABE, W. L.; SMITH, J. C.; HARRIOT, P. Operaciones unitarias en ingeniería química. Madrid: McGraw-Hill, 1991. p. 1112.

MELLMANN, J. The transverse motion of solids in rotating cylinders - forms of motion and transition behavior. *Powder Technology*, Lausanne, v. 118, p. 251 – 270, 2001.

MELLMANN, J.; SPECHT, E.; LIU, X. Prediction of rolling bed motion in rotating cylinders. *AIChE Journal*, New York, v. 50, n. 11, p. 2783–2793, 2004.

MILAGRES, A. M. F.; ROBERTO, E.; PIOVAN, T.; ROBERTO, I. C. Production of xylanase by *Thermoascus aurantiacus* from sugar cane bagasse in an aerated growth fermentor. *Process Biochemistry*, London, v. 39, p. 1387 – 1391, 2004.

MITCHELL, D. A.; VON MEIEN, O. F.; LUZ JR., L. F. L.; KRIEGER, N. Evaluation of productivity of Zymotis solid-state bioreactor based on total reactor volume. *Food Technology and Biotechnology*, Zagreb, v. 40, n. 2, p. 135 – 144, 2002.

MOHSENIN, N. N. Physical properties of plants and animal materials. New York: Gordon and Breach Science Publishers, 1986. p. 891.

NAGEL, F. J. I.; TRAMPER, J.; BAKKER, M. S. N.; RINZEMA, A. Model for on-line moisture content control during solid-state fermentation. *Biotechnology and Bioengineering*, New York, v. 72, p. 231 – 243, 2001.

ONOFRE, S. B.; MINUIK, C. M.; BARROS, N. M.; AZAVEDO, J. L. Growth and sporulation of *Metarhizium flavoviride* var. *Flavoviride* on culture media and lighting regimes. *Scientia Agricola*, Piracicaba, v. 58, n. 3, p. 613 – 616, 2001.

ORPE, A. V.; KHAKHAR, D. V. Scaling relations for granular flow in quasi-two-dimensional rotating cylinders. *Physical Review E: Statistical, Nonlinear and Soft Matter Physics*, New York, v. 64, n. 3, id. 031302, 2001.

PAMPHILE, J. A. Estudos genéticos no fungo entomopatogênico *Metarhizium anisopliae* var *anisopliae* (Metsch.) Sorokin. 1992. 105 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Agrárias) - Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1992.

PANDEY, A. Recent process developments in solid state fermentation. *Process Biochemistry*, London, v. 27, n. 2, p. 109 – 117, 1992.

PANDEY, A.; SOCCOL, C. R.; MITCHELL, D. New developments in solid state fermentation: I-bioprocesses and products. *Process Biochemistry*, London, v. 35, n. 10, p. 1153 – 1169, 2000.

PANDEY, A.; SOCCOL, C. R.; RODRIGUEZ-LEON, J. A.; NIGAM, P. Aspects of design of fermenter in solid state fermentation, *Solid State Fermentation in Biotechnology: fundamentals and applications*. New Delhi: Asiatech Publishers. 2001. p. 73–77.

PERES, W. B. Desenvolvimento e avaliação de equipamento destinado ao recobrimento de sementes. 2001. 128 f. Dissertação (Doutorado em Ciência e Tecnologia de Sementes) - Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2001.

PERRY, R; CHILTON, C. *Chemical engineers' handbook*. New York: McGraw – Hill, 1973.

PILAVTEPE-ÇELIK, M.; BALABAN, M. O.; ALPAS, H.; YOUSEF, A. E. Image analysis based quantification of bacterial volume change with high hydrostatic pressure. *Journal of Food Science*, Chicago, v. 73, n. 9, p. 423 – 429, 2008.

RAGHAVARAO, K. S. M. S.; RANGHANATHAN, T. V.; KARANTH, N. G. Some engineering aspects of solid state fermentation. *Biochemical Engineering Journal*, Amsterdam, v. 13, p. 127 – 135, 2002.

RANI, R.; KUMAR, A.; SOCCOL, C. R.; PANDEY, A. Recent advances in solid-state fermentation. *Biochemical Engineering Journal*, Amsterdam, v. 44, p. 13–18, 2009.

RODRIGUEZ, S.; SAROMÁN, M. Application of solid-state fermentation to ligninolytic enzyme production. *Biochemical Engineering Journal*, Amsterdam, v. 22, p. 211–219, 2005.

RODRIGUEZ, S.; SANROMAN, M. Application of solid-state fermentation to food industry: a review. *Journal of Food Engineering*, Essex, v. 76, n. 3, p. 291 – 302, 2006.

RODRIGUEZ, S.; LOPEZ, E.; SANROMAN, M. Utilisation of grape seeds for laccase production in solid-state fermentors. *Journal of Food Engineering*, Essex, v. 74, p.263– 267, 2006.

ROVEDA JUNIOR, A. C. Desenvolvimento de um bioreator rotativo para fermentação em estado sólido: Relatório final do trabalho de iniciação científica, São Paulo: FAPESP, 2008. No prelo.

SANTOMASO, A.; OLIVI, M.; CANU, P. Mechanisms of mixing of granular materials in drum mixers under rolling regime. *Chemical Engineering Science*, New York, v. 59, p. 3269 – 3280, 2004.

SANTOS, A. L. L. Influência de alguns fatores no crescimento, germinação e produção de conídios de *Metarhizium anisopliae* (Metsch.) Sorok. 1978. 74 f. Dissertação (Mestrado em Biologia de Fungos) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1978.

SCHUTYSER, M.; WEBER, F.; BRIELS, W.; BOOM, R.; RINZEMA, A. Three dimensional simulation of grain mixing in three different rotating drum designs for solid-state fermentation. *Biotechnology and Bioengineering*, New York, v. 79, n. 3, p. 284 – 294, 2002.

SCHUTYSER, M.; WEBER, F.; BRIELS, W.; BOOM, R.; RINZEMA, A. Heat and water transfer in a rotating drum containing solid substrate particles. *Biotechnology and Bioengineering*, New York, v. 82, n. 5, p. 552 – 563, 2003.

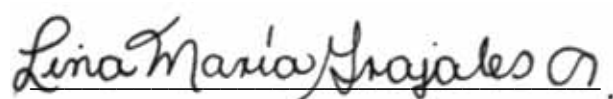
SENTHIL, C.; DAS, K. C. Converting sugar cane industry wastes into ecofriendly bioproducts. *Biocycle: Journal of Waste Recycling*, Emmaus, v. 45, p. 58 – 62, 2004.



UMSZA, M. A. Produção de poligalacturonase em fermentação em estado sólido pelo fungo *Thermomucor indicae-seudaticae* N31 em escala de frascos e biorreator de leito fixo. 2009. 106 f. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência de Alimentos) - Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, São José do Rio Preto, 2009.

Autorizo a reprodução xerográfica para fins de pesquisa.

São José do Rio Preto, 8 de Março de 2010

  
Assinatura

*Lina María Grajales Agudelo*