

RESSALVA

Atendendo solicitação da autora,
o texto completo desta tese será
disponibilizado somente a partir
de 04/11/2022



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
Câmpus de São José do Rio Preto

Marianny Silva Canedo

**Propriedades estruturais em meios porosos para cultivo em estado
sólido**

São José do Rio Preto

2020

Marianny Silva Canedo

Propriedades estruturais em meios porosos para cultivo em estado sólido

Tese apresentada como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutora em Engenharia e Ciência de Alimentos, junto ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência de Alimentos, do Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Câmpus de São José do Rio Preto.

Financiadora: CAPES/DS

Orientador: Prof. Dr. João Cláudio Thoméo

São José do Rio Preto

2020

C221p

Canedo, Marianny Silva

Propriedades estruturais em meios porosos para cultivo em estado sólido / Marianny Silva Canedo. -- São José do Rio Preto, 2020
112 f.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp),
Instituto de Biociências Letras e Ciências Exatas, São José do Rio
Preto

Orientador: João Cláudio Thoméo

1. Cultivo em estado sólido. 2. Biorreator de tambor rotativo. 3.
Reologia de sólidos. 4. Análise de perfil de textura. 5. Processamento
digital de imagem. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca do Instituto de
Biociências Letras e Ciências Exatas, São José do Rio Preto. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

Marianny Silva Canedo

Propriedades estruturais em meios porosos para cultivo em estado sólido

Tese apresentada como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutora em Engenharia e Ciência de Alimentos, junto ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência de Alimentos, do Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Câmpus de São José do Rio Preto.

Financiadora: CAPES/DS

Comissão examinadora

Prof. Dr. João Cláudio Thoméo
UNESP – Câmpus de São José do Rio Preto
Orientador

Prof. Dr. Javier Telis Romero
UNESP – Câmpus de São José do Rio Preto

Profª. Dra. Raquel Guttierres Gomes
UEM – Câmpus Sede Maringá

Profª. Dra. Lina María Grajales Agudelo
UFT – Câmpus de Palmas

Prof. Dr. Tiago Carregari Polachini
UNESP – Câmpus de São José do Rio Preto

São José do Rio Preto

04 de novembro de 2020

AGRADECIMENTOS

A Deus por ter guiado meus passos todos os dias, pela proteção, força e sabedoria para a realização deste trabalho. Agradeço também a Nossa Senhora por receber minhas orações, pela intercessão, passar na frente e resolver aquilo que sou incapaz de resolver.

Aos meus pais, Ana Maria e Francisco, e toda minha família pelo apoio, por acreditarem e ajudarem a realizar os meus sonhos. Apesar da distância, se fizeram presentes em todos os momentos.

Ao meu orientador Prof. Dr. João Cláudio Thoméo, por me acolher, pelo apoio, orientação e confiança na realização deste trabalho.

À UNESP/IBILCE pela oportunidade de cursar o doutorado.

Aos membros da Comissão Examinadora do Exame Geral de Qualificação desta Tese, Prof.^a Dr.^a Vânia Regina Nicoletti e Prof. Dr. Gustavo Nakamura Alves Vieira, pelas sugestões para este trabalho.

À Prof.^a Dr.^a Ana Carolina Conti e Silva pela atenção e ensinamentos.

Aos membros desta banca, Prof. Dr. Javier Telis Romero, Prof.^a Dr.^a Raquel Guttierrez Gomes, Prof.^a Dr.^a Lina Maria Grajales Agudelo e Prof. Dr. Tiago Carregari Polachini por aceitarem o convite em contribuir com este trabalho.

Aos técnicos do Departamento de Engenharia e Tecnologia de Alimentos por todo auxílio e esclarecimentos.

Aos meus colegas que passaram pelo Laboratório de Engenharia de Processos e Biorreatores, em especial à Érika, Antéia, Priscila e João Paulo pela amizade e auxílio durante o desenvolvimento deste trabalho. As alunas de graduação Amanda Velone e Maria Fernanda pela colaboração nos experimentos.

Aos meus colegas de pós-graduação e às pessoas que tive a oportunidade de conhecer em São José do Rio Preto, pelo acolhimento, pelos ensinamentos, pela companhia e momentos de descontração.

A todos aqueles que não foram mencionados, mas que, de certa forma, contribuíram na realização deste trabalho. Muito obrigada!

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

RESUMO

Uma melhor compreensão das propriedades estruturais e reológicas dos substratos empregados no cultivo em estado sólido (CES) é fundamental para a simulação realista de processos de transferência de calor e massa em biorreatores. Nesta tese, foram realizadas quatro etapas com o objetivo de obter parâmetros estruturais de um meio composto por bagaço de cana-de-açúcar (BC) e farelo de trigo (FT), antes e após o cultivo pelo fungo *Myceliophthora thermophila* I-1D3b, visando obter parâmetros que auxiliem na simulação de biorreatores durante o CES. Na primeira etapa, avaliou-se a influência do traçador colorido Rodamina B sobre o crescimento do fungo em misturas de BC:FT na proporção 7:3, estimado pela técnica de respiração e pela técnica de processamento digital de imagem (PDI) acoplada à fotografia. Realizou-se cultivos por 96 horas em meios com e sem traçador, medindo-se a produção de CO₂ em biorreator de leito empacotado e analisando-se amostras cultivadas em placas de Petri por PDI. Diante dos resultados apresentados pela técnica PDI, não se observou diferença no crescimento do micélio no substrato sem e com coloração por Rodamina B, porém as concentrações de CO₂ observadas indicam que o corante pode interferir na atividade metabólica do microrganismo. Em seguida, avaliou as propriedades reológicas de BC, FT e de misturas entre eles. Foram realizadas análises para determinar o perfil de textura (TPA) para amostras sem e com cultivo, empacotadas em tubos de PVC. Ensaios para a determinação da resistência à tração de uma mistura BC:FT ao longo do tempo de cultivo foram realizados utilizando-se caixas de acrílico, enquanto que a resistência à tração das hifas aéreas foi determinada cultivando-se o fungo em dois discos de farelo de trigo, separados por uma distância determinada. Nos ensaios de TPA foram realizados e parâmetros como dureza, coesão e elasticidade foram determinados, variando a umidade e proporção BC:FT antes e ao longo do cultivo. Os resultados de TPA mostraram que umedecer as amostras com muita antecedência do experimento produz amostras mais duras do que umidificando as amostras no momento do ensaio. Também se constatou que há uma tendência de diminuição da força de compressão com o aumento do tempo de cultivo, indicando degradação física do material sólido. A maior tensão de ruptura do micélio aéreo e do meio cultivado ocorreu às 24 horas de cultivo, coincidindo com a máxima atividade respirométrica do fungo. Na terceira etapa avaliou a movimentação dos substratos em ensaios sem e com cultivo microbiano por filmagem da tampa frontal de tambores rotativos de 9,4 e 30,0 cm de diâmetro, sem e com aletas internas. Nos ensaios sem cultivo, as variáveis foram os tipos de partículas (BC ou BC:FT), a umidade e o grau de enchimento. Nos ensaios com cultivo, a variável foi o tempo

de cultivo, utilizando como substrato a mistura BC:FT na proporção 7:3 a 75% de umidade inicial. No tambor de maior dimensão não foi observado diferença no padrão de movimentação das partículas para as umidades de 10% e 75% para leitos de BC ou com a adição de 30% de FT em 10% de umidade. No tambor de menor dimensão, em sistemas irreacionais, a movimentação ocorreu mais no centro do tambor, devido à ausência de defletores na parede, observando-se três blocos de tamanhos e periodicidade irregulares. Nos ensaios com cultivo, observou-se padrão de movimentação similar aos ensaios sem cultivo para tempos de cultivo inferiores a 9 horas. Após, o micélio ocupa os espaços intersticiais, não se observando nenhuma movimentação a partir de 12 horas de cultivo. Na quarta etapa, ainda por análise de imagens, foram determinados a porosidade, o tamanho dos poros e a distribuição de tamanho de poros em leitos empacotados antes e ao longo do CES. A técnica fotográfica 2D auxiliada por computador foi utilizada para avaliar as mudanças na porosidade em amostras sem cultivo, empacotada em tubos de PVC e imobilizadas com ágar, e amostras durante o CES, em biorreator de leito empacotado. As amostras foram fatiadas e a superfície das fatias fotografadas para a análise digital das imagens. A técnica de microtomografia computadorizada de raios-X (μ -CT) foi usada para avaliar a estrutura 3D de leitos sem cultivo. Os resultados de porosidade e tamanho de poro não apresentaram variação quanto à umidade e substrato utilizado. Uma complexa rede de vazios foi encontrada, em estrutura 3D, com uma porosidade média bastante próxima à obtida usando a análise de imagens 2D na superfície do leito. Ao longo do CES, a porosidade diminuiu em aproximadamente 50% do valor inicial após 48 h de cultivo. Os resultados aqui obtidos serão relevantes para a previsão da força necessária para girar um tambor ao longo do cultivo e a altura máxima permitida da coluna em biorreatores de leito compactado e para simulação realista de fenômenos de transferência de calor e massa.

Palavras-chaves: Cultivo em estado sólido. Crescimento fúngico. Biorreator de tambor rotativo. Reologia de sólidos. Análise de perfil de textura.

ABSTRACT

The realistic simulation of heat and mass transfer processes in solid-state cultivation (SSC) bioreactors requires a better understanding of the structural properties of the solid substrates. In this thesis was split in four steps in order to provide structural parameters of a medium composed by sugarcane bagasse (SCB) and wheat bran (WB) for the cultivation of the fungus *Myceliophthora thermophila* I-1D3b. In the first stage the influence of the dye Rhodamine B on the microbial growth was assessed in mixture SCB:WB using the weight proportion 7:3; the growth was determined by respirometry and by digital image processing (DIP) coupled with photography. The cultivation took place along 96 h in media with and without color tracer, measuring the outlet CO₂ concentration in a packed-bed bioreactor and taking pictures from the surface Petri dishes, following by DIP analysis. The image analysis did not show any influence of the color dye on the fungal growth, although the CO₂ concentration was remarkably influenced, demonstrating that the tracer modified the fungal metabolic activity. In the second stage, rheological properties of SCB, WB and mixtures of them were measured. The texture profile analysis (TPA) was applied to samples with and without cultivation, which were packed in a PVC tube. Experiments for the determination of the maximum strength of a mixture SCB:WB along the cultivation were carried out using Plexiglas boxes while the maximum strength of the aerial hyphae was determined cultivating the fungus in two discs of wheat bran separated by a specific void. From the experiments of TPA the parameters hardness, cohesiveness and springiness were determined as a function of the moisture content and the proportion SCB:WB before and along the cultivation. The results of the TPA experiments showed that moistening the samples well in advance of the experiment produced harder samples than moistening the samples at the moment of the assay; besides, the compression force decreased with the increase of the cultivation time, indicating the physical degradation of the medium. The maximum strength of the aerial mycelium was noticed at 24 h of cultivation, which was coincident with the maximum respirometric activity of the microbe. In the third stage, particle movement of a mixture SCB:WB prior and along the fungal growth was observed by filming the front lid of rotating drums of 9.4 and 30.0 cm diameter, with and without flyers. For experiments without cultivation, the variables were the nature of the particles (SCB or SCB:WB), the moisture content and the filling degree. For the experiments with fungal growth, the mixture SCB:WB 7:3 at 75% moisture content was used. In the larger drum, the pattern of particle movement was not influenced by the SCB moisture content (10% and 75%) or by the addition of WB (mixture SCB:WB 7:3) at 10% moisture

content. For the narrower drum, particle movement was concentrated at the drum core, since this drum did not have flyers, and three blocks of irregular shape and periodicity moved. For the experiments along the cultivation, the same pattern observed without cultivation as notice up to 9h, when the fungal mycelium visibly occupied the voids and no movement was observed if the drum was let still up to 12 h. In the fourth stage, the bed porosity and the pore size distribution were determined by DIP, prior and along the cultivation. Uncultivated samples were packed in PVC tubes and were immobilized with agar and inoculated samples were cultivated in a packed-bed bioreactor. The samples were sliced and the surface of the slices were photographed for further DIP. The X-ray microtomography technique (μ -CT) was used to provide 3D images of beds of SCB:WB without cultivation. The bed porosity and the pore size distribution were not affected by the initial moisture content of the solids. A complex network of voids was noticed by the 3D analysis, with average porosity very close to the one obtained with the 2D analysis. During the SSC, the bed porosity decreased 50% from its original value at 48 h of cultivation. The results obtained in this thesis will be of relevance to the forecast of the strength required to spin a drum during the cultivation and the maximum height allowed for packed columns, as well as for a more realistic simulation of heat and mass transfer processes in SSC.

Keywords: Solid-state cultivation. Fungal growth. Rotating drum bioreactor. Solid rheology. Texture profile analysis.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO GERAL E JUSTIFICATIVA	10
CAPÍTULO 2. OBJETIVOS GERAIS.....	12
CAPÍTULO 3. REVISÃO DA LITERATURA	13
3.1 Produção de etanol de segunda geração	13
3.2 Cultivo em estado sólido.....	14
3.3 Biorreatores para cultivo em estado sólido	16
3.4 Propriedades estruturais e reológicas de materiais sólidos	19
CAPÍTULO 4. INFLUÊNCIA DO USO DE TRAÇADOR COLORIDO NO CULTIVO EM ESTADO SÓLIDO EM MISTURA DE BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR E FARELO DE TRIGO	24
4.1 Introdução	25
4.2 Material e Métodos	26
4.2.1 Substrato	26
4.2.2 Cultivo em estado sólido	26
4.2.3 Determinação indireta do crescimento fúngico	27
4.2.3.1 Técnica de processamento digital de imagem.....	27
4.2.3.2 Produção de gás carbônico (CO ₂)	28
4.3 Resultados e Discussão	28
4.4 Conclusão.....	31
CAPÍTULO 5. PROPRIEDADES REOLÓGICAS DE MISTURAS DE BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR E FARELO DE TRIGO DURANTE O CULTIVO EM ESTADO SÓLIDO	32
5.1 Introdução	34
5.2 Análise de Perfil de Textura	35
5.3 Material e Métodos	37
5.3.1 Substratos.....	38
5.3.2 Microrganismo.....	38
5.3.3 Análise do perfil de textura.....	38
5.3.4 Resistência do substrato a resistência à tração	40
5.3.5 Resistência do micélio aéreo a resistência à tração	41
5.3.6 Estimativa da biomassa fúngica por respirometria.....	43
5.3.7 Análises estatísticas	44
5.4 Resultados e Discussão	45
5.4.1 Análise do perfil de textura.....	45
5.4.2 Resistência à tração dos substratos cultivados e do micélio aéreo	55
5.4.3 Estimativa da biomassa fúngica por respirometria.....	57
5.5 Conclusão.....	59

CAPÍTULO 6. MOVIMENTAÇÃO E MISTURA DE PARTÍCULAS DE BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR E DE FARELO DE TRIGO EM TAMBOR ROTATIVO DURANTE O CULTIVO EM ESTADO SÓLIDO POR <i>Myceliophthora thermophila</i> I-1D3B.....	60
6.1 Introdução	62
6.2 Material e Métodos	65
6.2.1 Partículas sólidas	65
6.2.2 Microrganismo.....	65
6.2.3 Movimentação radial do substrato em tambor rotativo sem cultivo.....	66
6.2.4 Movimentação radial do substrato em tambor rotativo com cultivo em estado sólido	67
6.2.5 Avaliação da geração de calor metabólico durante o cultivo em estado sólido	68
6.2.6 Determinação da atividade de endoglucanase	68
6.3 Resultados e Discussão	69
6.3.1 Movimentação radial do substrato em tambor rotativo sem cultivo.....	69
6.3.2 Movimentação radial do substrato em tambor rotativo com cultivo em estado sólido	76
6.3.3 Avaliação da geração de calor metabólico durante o cultivo em estado sólido	78
6.4 Conclusão.....	80
 CAPÍTULO 7. POROSIDADE E DISTRIBUIÇÃO DO TAMANHO DOS POROS EM LEITOS EMPACOTADOS DE BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR E FARELO DE TRIGO PARA CULTIVO EM ESTADO SÓLIDO	 81
7.1 Introdução	82
7.2 Material e Métodos	86
7.2.1 Substratos.....	86
7.2.2 Microrganismo.....	86
7.2.3 Determinação da porosidade e do tamanho dos poros em leitos sem cultivo usando fotografia e PDI	86
7.2.4 Determinação da porosidade e do tamanho dos poros em leitos com cultivo usando fotografia e PDI	87
7.2.5 Determinação da porosidade por microtomografia computadorizada (μ -CT) em leitos sem cultivo.....	88
7.2.6 Análises estatísticas	89
7.3 Resultados e Discussão	90
7.3.1 Determinação da porosidade e tamanho dos poros por fotografia e PDI antes do cultivo	90
7.3.2 Determinação da porosidade e tamanho dos poros por fotografia e PDI após o cultivo..	94
7.3.3 Análise estrutural por tomografia micro computadorizada (μ -CT) sem cultivo	97
7.4 Conclusão.....	99
 CAPÍTULO 8. CONCLUSÃO GERAL	 100
 CAPÍTULO 9. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	 102
 REFERÊNCIAS	 103

CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO GERAL E JUSTIFICATIVA

O Brasil atualmente é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar e, no setor sucroalcooleiro, o principal resíduo gerado é o bagaço de cana-de-açúcar, destinado principalmente como fonte de energia elétrica para o próprio setor. No entanto, devido à grande quantidade do resíduo produzido, esse pode ser utilizado para a produção de etanol de segunda geração (CASTRO; CASTRO, 2012). A produção de etanol de segunda geração é uma alternativa para aumentar o rendimento da produção de álcool combustível sem a necessidade de expansão da área cultivada. Porém, a viabilidade deste biocombustível ainda enfrenta vários desafios, como os altos custos de produção das enzimas empregadas na hidrólise do bagaço de cana-de-açúcar a açúcares fermentescíveis (MENDES; ATALA; THOMÉO, 2017).

Resíduos agroindustriais, como bagaço de cana-de-açúcar, farelo de trigo; casca de laranja, dentre outros, são disponíveis em grandes quantidades e possuem grande potencial para o cultivo em estado sólido (CES) para a produção de enzimas de interesse da indústria de biocombustível (CASCIATORI; THOMÉO, 2018; FARINAS, 2015;). Para a produção industrial de enzimas microbianas alguns fatores influenciam o processo de CES e precisam ser considerados no desenvolvimento de biorreatores, como por exemplo, composição e propriedades físicas do substrato, transferência de oxigênio, temperatura e capacidade de retenção de água, assim como a morfologia do microrganismo utilizado (DURAND, 2003; FARINAS, 2015; GRAJALES, 2014; TADA et al., 2019).

Para o controle automático do processo e a ampliação de escala de biorreatores de CES, a simulação é uma ferramenta importante (CASCIATORI; THOMÉO, 2018). No entanto, as predições dos modelos só serão próximas à realidade se as propriedades físicas do meio de cultivo forem fornecidas. De um modo geral, os valores destas propriedades são escassos na literatura, principalmente quando há presença de micélio.

As propriedades físicas do substrato como resistência, dureza, plasticidade, elasticidade e viscosidade, assim como a porosidade, distribuição do tamanho dos poros e a permeabilidade, são fatores que influenciam as propriedades físicas, mecânicas, térmicas e elétricas de materiais porosos (KACZMAREK; GOUEYGOU, 2006). Durante o CES, tais propriedades se alteram em decorrência da decomposição do substrato e do aumento da concentração de biomassa microbiana, de modo a poder afetar as condições necessárias ao crescimento microbiano, os mecanismos de transferência de calor e massa, a resistência do meio ao escoamento do ar e as trocas gasosas (CASCIATORI et al., 2014). Dessa forma, uma

melhor compreensão dessas características do substrato é importante para aumentar a produtividade, devido a melhores condições de processo, e projetos de biorreatores para o aumento de escala industrial (OSADOLOR et al., 2018; ZHANG; WANG; CHEN, 2017).

Assim, esta tese se propôs a avaliar as propriedades reológicas e estruturais de meios de cultivo compostos por bagaço de cana-de-açúcar e farelo de trigo para o cultivo do fungo filamentoso *Myceliophthora thermophila* I-1D3b, já empregado para a síntese de celulases pelo Grupo de Bioenergia do IBILCE/UNESP. O texto desta tese está estruturado em capítulos, onde os primeiros capítulos apresentam os objetivos gerais da tese e a revisão geral da literatura. Os quatro capítulos seguintes foram organizados na forma artigos e apresentam revisão, metodologia e resultados específicos.

No Capítulo 4 são apresentados os resultados dos ensaios preliminares, onde se avaliou a influência do uso do traçador colorido Rodamina B no crescimento do fungo *M. thermophila* I-1D3b. Este capítulo foi publicado como capítulo *Influência do uso de traçador colorido no cultivo em estado sólido* (CANEDO et al., 2019).

Em seguida, no Capítulo 5, são apresentados os resultados das propriedades reológicas de misturas dos substratos bagaço de cana-de-açúcar e farelo de trigo, antes e ao longo do cultivo do fungo *M. thermophila* I-1D3b. Este capítulo foi submetido à revista *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, com o título *Rheological properties of mixtures of sugarcane bagasse and wheat bran during solid-state cultivation*.

O Capítulo 6 apresenta os resultados de movimentação e mistura de bagaço de cana-de-açúcar e farelo de trigo e o efeito do micélio fúngico ao longo do cultivo em tambores rotativos. O artigo está em fase final de preparação com o título *Movimentação e mistura de partículas de bagaço de cana-de-açúcar e de farelo de trigo em tambor rotativo durante o cultivo em estado sólido por Myceliophthora thermophila I-1D3b*.

Os resultados finais de porosidade e tamanho dos poros em leitos empacotados de misturas de bagaço de cana-de-açúcar e farelo de trigo antes e ao longo do cultivo do fungo *M. thermophila* I-1D3b, empregando técnicas de processamento digital de imagens, bidimensional e tridimensional são apresentados no Capítulo 7. O artigo está em desenvolvimento. Logo após, são aprestados a Conclusão Geral dessa tese e recomendações para trabalhos futuros. As referências bibliográficas de todos os capítulos são apresentadas ao final da tese.

CAPÍTULO 8. CONCLUSÃO GERAL

Neste trabalho foram desenvolvidas técnicas experimentais inovadoras para a determinação das propriedades estruturais de meio de cultivo em estado sólido. Propriedades como distribuição do tamanho de poros, compressibilidade e resistência à tração foram obtidas para leitos de bagaço de cana-de-açúcar (BC) e para misturas de bagaço e farelo de trigo (BC:FT), misturas estas sem e com cultivo pelo fungo *Myceliophthora thermophila* I-1D3b. Os resultados obtidos serão valiosos para que a operação de biorreatores de tambor rotativo possam ser feitas com maior eficiência e para que problemas de compactação em biorreatores colunas de leito empacotado possam ser evitados.

A técnica de processamento digital de imagens não constatou influência no crescimento do fungo no substrato sem e com coloração por Rodamina B, enquanto que as concentrações de CO₂ observadas indicam que o corante pode interferir na atividade metabólica do microrganismo.

Propriedades estruturais e reológicas foram determinadas experimentalmente para bagaço de cana-de-açúcar, farelo de trigo (FT) e para misturas entre ambos, antes e ao longo do cultivo pelo fungo *M. thermophila* I-1D3b. Para a determinação dos parâmetros reológicos, foram desenvolvidos métodos de análise do perfil de textura (TPA) e de resistência à tração, inéditos para misturas BC e FT. Foram determinados os parâmetros dureza, coesividade e elasticidade, por meio de ensaios de TPA, e o parâmetro tensão de ruptura por meio de ensaios de tração. Para meios porosos não cultivados, BC e misturas BC:FT exigiram forças de compressão menores do que FT, devido à menor porosidade dos leitos de farelo. As amostras úmidas de BC apresentaram dureza menor do que as secas e, quando o BC foi umidificado com 15 dias de antecedência ao experimento de TPA, sua dureza foi maior do que quando este material foi umidificado imediatamente antes do experimento, devido à difusão de água no volume celular para a alternativa com antecedência. A dureza das misturas BC:FT sem cultivo mostrou-se similar à de BC, enquanto a dureza dessas misturas diminuiu com o aumento do tempo de cultivo devido à degradação dos substratos. A resistência à tração máxima do substrato cultivado e do micélio aéreo foram observadas às 24 horas de cultivo. A resistência máxima à tração foi coincidente com a biomassa máxima no sistema, obtida indiretamente pela medição da concentração de CO₂.

A movimentação de partículas de misturas BC:FT foram avaliadas qualitativamente em tambores rotativos, com e sem cultivo microbiano. A análise de imagens não indicaram diferenças no padrão de movimentação das partículas em função da umidade para leitos de

BC. Com a introdução de 30% de farelo, a variação da umidade passou a ser uma variável significativa para a movimentação. O tamanho do tambor influenciou os padrões de movimentação da mistura BC:FT. Para o tambor de maior diâmetro (30 cm) o material era elevado pelos defletores e se desprendiam ao atingirem o topo da circunferência, quando eram lançados contra a superfície do leito. Na ausência de FT, ao ser lançado na superfície do leito, o grande bloco se fragmentava em blocos menores, enquanto na presença de FT esses blocos maiores não desestruturaram, rolando sobre a camada passiva. Para o tambor de menor diâmetro (9,4 cm) a movimentação ocorre ao centro do tambor e as fibras formam três aglomerados de tamanhos e periodicidade irregulares. Esse mesmo padrão de movimentação foi observado no CES com até 9 horas de cultivo. Ao longo do tempo de cultivo, visualmente o fungo *M. thermophila* I-1D3b ocupa os espaços vazios do leito sem causar alteração do volume total, e devido à resistência do micélio, o material se fixa na parede, não se observando nenhuma movimentação a partir de 12 horas de cultivo.

Quanto às propriedades estruturais das misturas BC:FT, analisadas por processamento digital de imagens, não se observou diferença da porosidade e do tamanho do poro, quanto à variação de umidade e substrato. Ao avaliar o crescimento do fungo no substrato, a porosidade diminuiu em aproximadamente 50% do valor inicial.

REFERÊNCIAS

- AITA, B. C.; SPANNEMBERG, S. S.; SCHMALTZ, S.; ZABOT, G. L.; TRES, M. V.; KUHN, R. C.; MAZUTTI, M. A. Production of cell-wall degrading enzymes by solid-state fermentation using agroindustrial residues as substrates. **Journal Environmental Chemical Engineering**, Amsterdam, v. 7, p. 103193, 2019.
- ALAM, M. Z.; MAMUN, A. A.; QUDSIEHA, I. Y.; MUYIBI, S. A.; SALLEHA, H. M.; OMARA, N. M. Solid state bioconversion of oil palm empty fruit bunches for cellulase enzyme production using a rotary drum bioreactor. *Biochemical Engineering Journal*, Amsterdam, v. 46, p. 61-64, 2009.
- ARAMOUNIA, F. M.; ABU-GHOUSH, M. H. Physicochemical and sensory characteristics of no-bake wheat-soy snack bars. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, London, v. 91, n.1, p. 44-51, 2011.
- ARORA, S.; DUBEY, M.; SINGH, P.; RANI, R.; GHOSH, S. Effect of mixing events on the production of a thermo-tolerant and acidstable phytase in a novel solid-state fermentation bioreactor. **Process Biochemistry**, Barking, v. 61, p. 12-23, 2017.
- ARORA, S.; RANI, R.; GHOSH, S. Bioreactors in solid state fermentation technology: Design, applications and engineering aspects. **Journal of Biotechnology**, Amsterdam, v. 269, p. 16-34, 2018.
- 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, p. 141-150, 1999.
- BARGMANN, S.; KLUSEMANN, B.; MARKMANN, J.; SCHNABEL, J. E.; SCHNEIDER, K.; SOYARSLAN, C.; WILMERS, J. Generation of 3D representative volume elements for heterogeneous materials: a review. **Progress in Materials Science**, Oxford, v. 96, p. 322-384, 2018.
- BASTOS, R. G.; MOTTA, F. L.; SANTANA, M. H. A. Oxygen transfer in solid-state cultivation under controlled moisture conditions. **Applied Biochemistry and Biotechnology**, Clifton, v. 174, p. 708-718, 2014.
- BELLON-MAUREL, V.; ORLIAC, O.; CHRISTEN, P. Sensors and measurements in solid state fermentation: a review. **Process Biochemistry**, Barking, v. 38, p. 881-896, 2003.
- BENEDITO, W. M.; DUARTE, C. R.; BARROZO, M. A. S.; SANTOS, D. A. An investigation of CFD simulations capability in treating non-spherical particle dynamics in a rotary drum. **Powder Technology**, Lausanne, v. 332, n. 1, p. 171-177, 2018.
- BOATENG, A. A. Rotary kilns: transport phenomena and transport processes. Burlington: Butterworth-Heinemann, 2008.
- BOURNE, M. **Food texture and viscosity**. 2nd ed. San Diego: Associated Press, 2002.

CAMASSOLA, M.; DILLON, A. J. P. Cellulases and xylanases production by *Penicillium echinulatum* grown on sugar cane bagasse in solid-state fermentation. **Applied Biochemistry and Biotechnology**, Clifton, v. 162, p. 1889-1900, 2010.

CANEDO, M. S.; CUNHA, L. P.; HENRIQUE, J. P.; THOMÉO, J. C. Influência do uso de traçador colorido no cultivo em estado sólido. *In: As engenharias frente à sociedade, a economia e o meio ambiente*. Ponta Grossa: Atena Editora, 2019. v. 4.

CASCIATORI, F. P. **Produção de celulases fúngicas por fermentação em estado sólido: ampliação de escala de biorreatores de leito fixo**. 2015. 190 f. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência de Alimentos) - Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, São José do Rio Preto, 2015.

CASCIATORI, F. P.; BÜCK, A.; THOMÉO, J. C.; TSOTSAS, E. Two-phase and two-dimensional model describing heat and water transfer during solid-state fermentation within a packed-bed bioreactor. **Chemical Engineering Journal**, Lausanne, v. 287, p. 103-116, 2016.

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

CASCIATORI, F. P.; LAURENTINO, C. L.; TABOGA, S. R.; CASCIATORI, P. A. THOMÉO, J. C. Structural properties of beds packed with agro-industrial solid by-products applicable for solid-state fermentation: Experimental data and effects on process performance. **Chemical Engineering Journal**, Lausanne, v. 255, p. 214-224, 2014.

CASCIATORI, F. P.; LAURENTINO, C. L.; ZANELATO, A. I.; THOMÉO, J. C. Hygroscopic properties of solid agro-industrial by-products used in solid-state fermentation. **Industrial Crops and Products**, Amsterdam, v. 64, p. 114-123, 2015.

CASCIATORI, F. P.; THOMÉO, J. C. Heat transfer in packed-beds of agricultural waste with low rates of air flow applicable to solid-state fermentation. **Chemical Engineering Science**, London, v. 188, p. 97-111, 2018.

CASTRO, S. M.; CASTRO, A. M. Assessment of the Brazilian potential for the production of enzymes for biofuels from agroindustrial materials. **Biomass Conversion and Biorefinery**, Berlin, v. 2, p. 87-107, 2012.

CHEN, H.; XIAO, Y. G.; LIU, Y. L.; SHI, Y. S. Effect of Young's modulus on DEM results regarding transverse mixing of particles within a rotating drum. **Powder Technology**, Lausanne, v. 318, p. 507-517, 2017.

CHEN, H.-Z.; HE, Q. Value-added bioconversion of biomass by solid-state fermentation. Value-added bioconversion of biomass by solid-state fermentation. **Journal of Chemical Technology and Biotechnology**, Oxford, v. 87, p. 1619-1625, 2012.

CHEN, L.; OPARA, U. L. Approaches to analysis and modeling texture in fresh and processed foods – A review. **Journal of Food Engineering**, London, v. 119, p. 497-507, 2013.

COURI, S.; MERCÊS, E. P.; NEVES, B. C.; SENNA, L. F. Digital image processing as a tool to monitor biomass growth in *Aspergillus niger* 3T5B8 solid-state fermentation: preliminary results. **Journal of Microscopy**, Oxford, v. 224, p. 290-297, 2006.

CUNHA, L. P.; CASCIATORI, F. P.; VICENTE, I. V.; GARCIA, R. L.; THOMÉO, J. C. *Metarhizium anisopliae* conidia production in packed-bed bioreactor using rice as substrate in successive cultivations. **Process Biochemistry**, Barking, v. 97, p. 104-111, 2020.

DADKHAH, M.; PEGLOW, M.; TSOTSAS, E. Characterization of the internal morphology of agglomerates produced in a spray fluidized bed by X-ray tomography. **Powder Technology**, Lausanne, v. 228, p. 349-358, 2012.

DIAMANTE, L.; UMEMOTO, M. Rheological properties of fruits and vegetables: a review. **International Journal of Food Properties**, New York, v. 18, p. 1191-1210, 2015.

DÍAZ, A. B.; ORY, I.; CARO, I.; BLANDINO, A. Solid state fermentation in a rotating drum bioreactor for the production of hydrolytic enzymes. **Chemical Engineering Transactions**, Milano, v. 17, p. 1041-1046, 2009.

DING, Y. L.; FORSTER, R.; SEVILLE, J. P. K.; PARKER, D. J. Segregation of granular flow in the transverse plane of a rolling mode rotating drum. **International Journal of Multiphase Flow**, Oxford, v. 28, n. 4, p. 635-663, 2002.

DORTA, B.; ARCAS, J. Sporulation of *Metarhizium anisopliae* in solid-state fermentation with forced aeration. **Enzyme and Microbial Technology**, Guildford, v. 23, p. 501-505, 1998.

DU, H.; PERRÉ, P. A novel lattice-based model for investigating three-dimensional fungal growth on solid media. **Physica A: Statistical Mechanics and its Applications**, Amsterdam, v. 541, n. 1, p. 123536, 2020.

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

FARINAS, C. S. Developments in solid-state fermentation for the production of biomass-degrading enzymes for the bioenergy sector. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Amsterdam, v. 52, p. 179-188, 2015.

FOONG, C. W.; JANAUN, J.; KRISHNAIAH, K.; PRABHAKAR, A. Effect of superficial air velocity on solid state fermentation of palm kernel cake in a lab scale fermenter using locally isolated fungal strain. **Industrial Crops and Products**, Amsterdam, v. 30, n. 1, p. 114-118, 2009.

FRASSATTO, P. A. C.; CASCIATORI, F. P.; THOMÉO, J. C.; GOMES, E.; BOSCOLO, M.; SILVA, R. β -Glucosidase production by *Trichoderma reesei* and *Thermoascus aurantiacus* by solid state cultivation and application of enzymatic cocktail for saccharification of sugarcane bagasse. **Biomass Conversion and Biorefinery**, Berlin, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13399-020-00608-1>.

GHOSE, T. K. Measurement of cellulase activities. **Pure and Applied Chemistry**, Oxford, v. 59, p. 257-268, 1987.

GIESCHE, H. Mercury porosimetry: a general (practical) overview. **Particle & Particle Systems Characterization**, Weinheim, v. 23, n. 1, p. 9-19, 2006.

GIUSEPPE, E.; CASTELLANI, R.; DOBOSZ, S.; MALVESTIO, J.; BERZIN, F.; BEAUGRAND, J.; DELISÉE, C.; VERGNES, B.; BUDTOVA, T. Reliability evaluation of automated analysis, 2D scanner, and micro-tomography methods for measuring fiber dimensions in polymer-lignocellulosic fiber composites. **Composites: Part A**, Oxford, v. 90, p. 320-329, 2016.

GOMES, A. C. S. **Cinética de crescimento do fungo termófilo *Myceliophthora thermophila* M. 7.7 em cultivo no estado sólido**. 2015. 102 f. Dissertação (Mestrado em Microbiologia) - Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, São José do Rio Preto, 2015.

GOMES, A. C. S.; CASCIATORI, F. P.; GOMES, E.; NUNES, C. C. C.; MORETTI, M. M. S.; THOMÉO, J. C. Growth kinetics of *Myceliophthora thermophila* M.7·7 in solid-state cultivation. **Journal of Applied Microbiology**, Oxford, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1111/jam.14774>.

GONZÁLEZ, J. D. T.; MORELOS, K. J. G.; CORREA, D. A. Análisis del perfil de textura en frutas, productos cárnicos y quesos. **Revisiones de la Ciencia, Tecnología e Ingeniería de los Alimentos**, Colômbia, v. 14, n. 2, p. 63-75, 2015.

GOSTICK, J. Versatile and efficient pore network extraction method sing markerbased watershed segmentation. **Physical Review E**, Ridge, v. 96, n. 2, p. 023307, 2017.

GRAJALES, L. M. **Desenvolvimento de um biorreator rotativo para produção de enzimas celulolíticas por fermentação em estado sólido**. 2014. 148 f. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência de Alimentos) – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas, São José do Rio Preto, 2014.

GRAJALES, L. M.; XAVIER, N. M.; HENRIQUE, J. P.; THOMÉO, J. C. Mixing and motion of rice particles in a rotating drum. **Powder Technology**, Lausanne, v. 222, p. 167-175, 2012.

HANSEN, G. H.; LÜBECK, M.; FRISVAD, J. C.; LÜBECK, P. S.; ANDERSEN, B. Production of cellulolytic enzymes from ascomycetes: comparison of solid state and submerged fermentation. **Process Biochemistry**, Barking, v. 50, p. 1327-1341, 2015.

HUANG, A-N.; KUO, H-P. CFD simulation of particle segregation in a rotating drum. Part II: Effects of specularidade coeficiente. **Advanced Powder Technology**, Utrecht, v. 29, p. 3368-3374, 2018.

HUIDOBRO, F. R.; MIGUEL, E.; BLAZQUEZ, B.; ONEGA, E. A comparison between two methods (Warner–Bratzler and texture profile analysis) for testing either raw meat or cooked meat. **Meat Science**, Oxford, v. 69, p. 527-536, 2005.

IRIE, M. S.; RABELO, G. D.; SPIN-NETO, R.; DECHICHI, P.; BORGES, J. S.; SOARES, P. B. F. Use of micro-computed tomography for bone evaluation in dentistry. **Brazilian Dental Journal**, Ribeirão Preto, v. 29, n. 3, p. 227-238, 2018.

ISAAC, A.; SKET, F.; DRIEMEIER, C.; ROCHA, G. J. M. 3D imaging of sugarcane bagasse using X-ray microtomography. **Industrial Crops and Products**, Amsterdam, v. 49, p. 790-793, 2013.

KACZMAREK, M.; GOUEYGOU, M. Dependence of elastic properties of materials on their porosity: review of models. **Journal of Porous Media**, Monticello, v. 9, n. 4, p. 335-355, 2006.

KALOGERIS, E.; INIOTAKI, F.; TOPAKAS, E.; CHRISTAKOPOULOS, P.; KEKOS, D.; MACRIS, B. J. Performance of an intermittent agitation rotating drum type bioreactor for solid-state fermentation of wheat straw. **Bioresource Technology**, Barking, v. 86, n. 3, p. 207-213, 2003.

KARALI, M. A.; HERZ, F.; SPECHT, E.; MALLMANN, J. Comparison of image analysis methods to determine the optimum loading of flighted rotary drums. **Powder Technology**, Lausanne, v. 291, p. 147-153, 2016.

KARIMI, A.; SHOJAOSADATI, S. A.; HEJAZI, P.; VASHEGHANI-FARAHANI, E.; HASHEMI, M. Porosity changes during packed bed solid-state fermentation. **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**, Amsterdam, v. 20, p. 4022-4027, 2014.

KATILEVICIUTE, A.; PLAKYS, G.; BUDREVICIUTE, A.; ONDER, K.; DAMIATI, S.; KODZIUS, R. A sight to wheat bran: high value-added products. **Biomolecules**, Basel, v. 9, n. 12, p. 887, 2019.

KHANAHMADI, M.; MITCHELL, D. A.; BEHESHTI, M.; ROOSTAAZAD, R.; SÁNCHEZ, L. R. Continuous solid-state fermentation as affected by substrate flowpattern. **Chemical Engineering Science**, London, v. 61, p. 2675-2687, 2006.

KLINGENBERG, D. J.; ROOT, T. W.; BURLAWAR, S.; SCOTT, C. T.; BOURNE, K. J.; GLEISNER, R.; HOUTMAN, C.; SUBRAMANIAM, V. Rheometry of coarse biomass at high temperature and pressure. **Biomass and Bioenergy**, Oxford, v. 99, p. 69-78, 2017.

LANDIS, E. N.; KEANE, D. T. X-ray microtomography. **Materials Characterization**, New York, v. 61, p. 1305-1316, 2010.

LEÃO, M. I.; KREBS, A. S. J. Uso de traçador para estudo de interação entre águas subterrâneas e superficiais na região carbonífera de Santa Catarina, Brasil. **Águas Subterrâneas**, São Paulo, v. 31, n. 2, p. 130-142, 2017.

LÓPEZ-GÓMEZ, J. P.; PÉREZ-RIVERO, C.; WEBB, C. Investigating a non-destructive alternative for a preliminary evaluation of fungal growth in solid state fermentations. **Journal of Microbiological Methods**, Amsterdam, v. 160, p. 60-67, 2019.

LUZURIAGA, D.; BALABAN, M. O.; YERALAN, S. Analysis of visual quality attributes of white shrimp by machine vision. **Journal of Food Science**, Malden, v. 62, p. 1-7, 1997.

MADEJ, L.; LEGWAND, A.; MOJZESZKO, M.; CHRAPONSKI, J.; ROSKOSZ, S.; CWAJNA, J. Experimental and numerical two- and three-dimensional investigation of porosity morphology of the sintered metallic material. **Archives of Civil and Mechanical Engineering**, Wroclaw, v. 18, n. 4, p. 1520-1534, 2018.

MANAN, M. A.; WEBB, C. Insights into physical characterization of solid state fermentation: from preliminary knowledge to practical application. **Journal of Biotech Research**, Edmond, v. 10, p. 271-282, 2019.

MASSE, J.-P.; POQUILLON, D. Mechanical behavior of entangled materials with or without cross-linked fibers. **Scripta Materialia**, Tarrytown, v. 68, p. 39-43, 2013.

MEFTAH, R.; BERGER, S.; JACQUS, G.; LALUET, J.-Y.; CNUDE, V. Multiscale characterization of glass wools using X-ray micro-CT. **Materials Characterization**, New York, v. 156, 109852, 2019.

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.

MEMBRILLO, I.; SÁNCHEZ, C.; MENESES, M.; FAVELA, E.; LOERA, O. Particle geometry affects differentially substrate composition and enzyme profiles by *Pleurotus ostreatus* growing on sugar cane bagasse. **Bioresource Technology**, Barking, v. 102, n. 2, p. 1581-1586, 2011.

MENDES, F. B.; ATALA, D. I. P.; THOMÉO, J. C. Is cellulase production by solid-state fermentation economically attractive for the second generation ethanol production? **Renewable Energy**, Oxford, v. 114, p. 525-533, 2017.

MIENDA, B. S.; IDI, A.; UMAR, A. Microbiological features of solid state fermentation and its applications - an overview. **Research in Biotechnology**, Vellore, v. 2, n. 6, p. 21-26, 2011.

MITCHELL, D. A.; KRIEGER, N.; BEROVIC, M. **Solid-state fermentation bioreactors: fundamentals, design and operation**, Berlin: Springer-Verlag, 2006.

MITCHELL, D. A.; MEIEN, O. F.; KRIEGER, N. Recent developments in modeling of solid-state fermentation: heat and mass transfer in bioreactors. **Biochemical Engineering Journal**, Amsterdam, v. 13, p. 137-147, 2003.

MORENO-ATANASIO, R.; WILLIAMS, R. A.; JIA, X. Combining X-ray microtomography with computer simulation for analysis of granular and porous materials. **Particuology**, New York, v. 8, n. 2, p. 81-99, 2010.

NAYAK, B.; PANDA, B. P. Modelling and optimization of texture profile of fermented soybean using response surface methodology. **AIMS Agriculture and Food**, Springfield, v. 1, n. 4, p. 409-418, 2016.

OSADOLOR, O. A.; JABBARI, M.; NAIR, R. B.; LENNARTSSON, P. R.; TAHERZADEH, M. J. Effect of media rheology and bioreactor hydrodynamics on filamentous fungi fermentation of lignocellulosic and starch-based substrates under pseudoplastic flow conditions. **Bioresource Technology**, Barking, v. 263, p. 250-257, 2018.

PANDEY, A.; SOCCOL, C. R.; NIGAM, P.; SOCCOL, V. T. Biotechnological potential of agro-industrial residues. I: sugarcane bagasse. **Bioresource Technology**, Barking, v. 74, p. 69-80, 2000.

PARKINSON, D. Y.; MCDERMOTT, G.; ETKIN, L. D.; GROS, M. A. L.; LARABELL, C. A. Quantitative 3-D imaging of eukaryotic cells using soft X-ray tomography. **Journal of Structural Biology**, San Diego, v. 162, p. 380-386, 2008.

PEREZ, C. L. **Avaliação da viabilidade técnica da ampliação de escala da produção de enzimas celulolíticas e hemicelulolíticas por FES em biorreatores de leito**. 2017. 98 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência de Alimentos) - Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, São José do Rio Preto, 2017.

PEREZ, C. L.; CASCIATORI, F. P.; THOMÉO, J. C. Strategies for scaling-up packed-bed bioreactors for solid-state fermentation: the case of cellulolytic enzymes production by a thermophilic fungus. **Chemical Engineering Journal**, Lausanne, v. 361, p. 1142-1151, 2019.

PIGNERET, M.; MERMILLOD-BLONDIN, F.; VOLATIER, L.; ROMESTAING, C.; MAIRE, E.; ADRIEN, J.; GUILLARD, L.; ROUSSEL, D.; HERVANT, F. Urban pollution of sediments: Impact on the physiology and burrowing activity of tubificid worms and consequences on biogeochemical processes. **Science of the Total Environment**, Amsterdam, v. 568, p. 196-207, 2016.

POLACHINI, T. C.; SATO, A. C. K.; CUNHA, R. L.; TELIS-ROMERO, J. Density and rheology of acid suspensions of peanut waste in different conditions: An engineering basis for bioethanol production. **Powder Technology**, Lausanne, v. 294, p. 168-176, 2016.

QIANG, Z. D.; WANG, B. D.; LI, R.; CHEN, Q.; ZHENG, G.; ZIVKOVIC, V.; YANG, H. The surface structure and the active layer depth of the irregular sand particles in a continuously avalanching flow. **Powder Technology**, Lausanne, v. 360, n. 15, p. 1037-1046, 2020.

RAO, V. N. M.; QUINTERO, X. Rheological Properties of Solid Foods. In: RAO, M. A., RIZVI, S. S. H., DATTA, A. K.; AHMED, J. **Engineering Properties of Food**. New York: CRC Press, 2014. p. 179-222.

RICHARDSON, S. D.; WILSON, C. S.; RUSCH, K. A. Use of rhodamine water tracer in the marshland upwelling system. **Ground Water**, Malden, v. 42, n. 5, p. 678-688, 2004.

RIVERA, E. C.; RABELO, S. C.; GARCIA, D. R.; MACIEL FILHO, R.; COSTA, A. C. Enzymatic hydrolysis of sugarcane bagasse for bioethanol production: determining optimal enzyme loading using neural networks. **Journal of Chemical Technology and Biotechnology**, Oxford, v. 85, p. 983-992, 2010.

RODRIGUES, A. C. **Tratamento de efluente do tingimento de ágatas por processo oxidativo avançado – técnica Fenton para degradação de Rodamina B**. 2015. 43 f. Trabalho de Conclusão do Curso (Graduação em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

RODRIGUEZ-LEON, J. A.; SOCCOL, C. R.; PANDEY, A.; RODRIGUEZ, D. E. Kinetics in Solid-state Fermentation. In: PANDEY, A.; SOCCOL, C. R.; LARROCHE, C. **Current developments in solid-state fermentation**. New York: Springer Science, 2008. cap. 4, p. 48-73.

RUTSATZ, M. D. **Cultivo em estado sólido**: modelagem e quantificação de biomassa em biorreator cilíndrico horizontal agitado. 2006. 105 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

SALA, A.; ARTOLA, A.; SANCHEZ, A.; BARRENA, R. Rice husk as a source for fungal biopesticide production by solid-state fermentation using *B. bassiana* and *T. harzianum*. **Bioresource Technology**, Barking, v. 296, p. 122322, 2020.

SANTOS, D. A.; BARROZO, M. A. S.; DUARTE, C. R.; WEIGLER, F.; MELLMANN, J. Investigation of particle dynamics in a rotary drum by means of experiments and numerical simulations using DEM. **Advanced Powder Technology**, Utrecht, v. 27, n. 2, p. 692-703, 2016.

SCHOBBER, T. J.; MESSERSCHMIDT, M.; BEAN, S. R.; PARK, S-H.; ARENDT, E. K. Gluten-free bread from sorghum: quality differences among hybrids. **Cereal Chemistry**, Saint Paul, v. 82, n. 4, p. 394-404, 2005.

SCHOEMAN, L.; WILLIAMS, P.; PLESSIS, A.; MANLEY, M. X-ray micro-computed tomography (μ -CT) for non-destructive characterisation of food microstructure. **Trends in Food Science & Technology**, Cambridge, v. 47, p. 10-24, 2016.

SCHUTYSER, M. A. I.; PAGTER, P.; WEBER, F. J.; BRIELS, W. J.; BOOM, R. M.; RINZEMA, A. Substrate aggregation due to aerial hyphae during discontinuously mixed solid-state fermentation with *Aspergillus oryzae*: experiments and modeling. **Biotechnology and Bioengineering**, Hoboken, v. 83, n. 5, 2003.

SHAH, A. R.; SHAH, R. K.; MANDAWAR, D. Improvement of the quality of whole wheat bread by supplementation of xylanase from *Aspergillus foetidus*. **Bioresource Technology**, Barking, v. 97, n. 16, p. 2047-2053, 2006.

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

SINKA, I. C.; BURCH, S. F.; TWEED, J. H.; CUNNINGHAM, J. C. Measurement of density variations in tablets using X-ray computed tomography. **International Journal of Pharmaceutics**, Amsterdam, v. 271, p. 215-224, 2004.

SOCCOL, C. R.; COSTA, E. S. F.; LETTI, L. A. J.; KARP, S. G.; WOICIECHOWSKI, A. L.; VANDENBERGHE, L. P. S. Recent developments and innovations in solid state fermentation. **Biotechnology Research and Innovation**, Rio de Janeiro, v. 1, p. 52-71, 2017.

STICKEL, J. J.; KNUTSEN, J. S.; LIBERATORE, M. W.; LUU, W.; BOUSFIELD, D. W.; KLINGENBERG, D. J.; SCOTT, C. T.; ROOT, T. W.; EHRHARDT, M. R.; MONZ, T. O. Rheology measurements of a biomass slurry: an inter-laboratory study. **Rheologica Acta**, Heidelberg, v. 48, p. 1005-1015, 2009.

SZCZESNIAK, A. S. Texture is a sensory property. **Food Quality and Preference**, Harlow, v. 13, n. 4, p. 215-225, 2002.

TADA, E. F. R. **Modelagem e simulação de transferência de calor em leito de partículas estacionárias sujeitas a agitação intermitente**. 2016. 115f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência de Alimentos) - Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, São José do Rio Preto, 2016.

TADA, E. F. R.; AGUDELO, L. M. G.; THOMÉO, J. C. Water holding capacity and heat transfer aspects of a mixture of sugar cane bagasse and wheat bran in a partially filled rotating drum. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, São Paulo, v. 36, n. 3, p. 1131-1141, 2019.

TADA, E. F. R.; BÜCK, A. CASCIATORI, F. P.; TSOTSAS, E.; THOMÉO, J. C. Investigation of heat transfer in partially filled horizontal drums. **Chemical Engineering Journal**, Lausanne, v. 316, p. 988-1003, 2017a.

TADA, E. F. R.; BÜCK, A.; TSOTSAS, E.; THOMÉO, J. C. Mass transport in a partially filled horizontal drum: modelling and experiments. **Chemical Engineering Science**, London, v. 214, 115448, 2020.

TADA, E. F. R.; GRAJALES, L. M.; LEMOS, Y. P.; THOMÉO, J. C. Mixture and motion of sugar cane bagasse in a rotating drum. **Powder Technology**, Lausanne, v. 317, p. 301-309, 2017b.

TAI, A.; BIANCHINI, R.; JACHOWICZ, J. Texture analysis of cosmetic/pharmaceutical raw materials and formulations. **International Journal of Cosmetic Science**, Oxford, v. 36, n. 4, p. 291-304, 2014.

TELIS, V. R. N.; TELIS-ROMERO, J.; GABAS, A. L. Solids rheology for dehydrated food and biological materials. **Drying Technology**, Philadelphia, v. 23, n. 4, p. 759-780, 2005.

THOMAS, L.; LARROCHE, C.; PANDEY, A. Current developments in solid-state fermentation. **Biochemical Engineering Journal**, Amsterdam, v. 81, p. 146-161, 2013.

TU, J.; ZHAO, J.; LIU, G.; TANG, C.; HAN, Y.; CAO, X.; JIA, J.; JI, G.; XIAO, H. Solid state fermentation by *Fomitopsis pinicola* improves physicochemical and functional properties of wheat bran and the bran-containing products. **Food Chemistry**, Barking, v. 328, 127046, 2020.

van BREUKELLEN, F. R.; HAEMERS, S.; WIJFFELS, R. H.; RINZEMA, A. Bioreactor and substrate selection for solid-state cultivation of the malaria mosquito control agent *Metarhizium anisopliae*. **Process Biochemistry**, Barking, v. 46, p. 751-757, 2011.

VELMURUGAN, P.; HUR, H.; BALACHANDAR, V.; KAMALA-KANNAN, S.; LEE, K.-J.; LEE, S.-M.; CHAE, J.-C.; OH, B.-T. *Monascus* pigment production by solid-state fermentation with corn cob substrate. **Journal of Bioscience and Bioengineering**, Osaka, v. 112, n. 6, p. 590-594, 2011.

VENDRUSCOLO, F.; RIBEIRO, C. S.; ESPOSITO, E.; NINOW, J. L. Protein enrichment of apple pomace and use in feed for Nile tilapia. **Applied Biochemistry and Biotechnology**, Clifton, v. 152, p. 74-87, 2009.

VERMA, V.; PADDING, J. T.; DEEN, N. G.; KUIPERS, J. A. M.; BARTHEL, F.; BIEBERLE, M.; WAGNER, M.; HAMPE, U. Bubble dynamics in a 3-D gas–solid fluidized bed using ultrafast electron beam x-ray tomography and two-fluid model. **AIChE Journal**, New York, v. 60, 1632-1644, 2014.

WANG, E-Q.; LI, S-Z.; TAO, L.; GENG, X.; LI, T-C. Modeling of rotating drum bioreactor for anaerobic solid-state fermentation. **Applied Energy**, Barking, v. 87, p. 2839-2845, 2010.

WANG, L.; LIU, Y.; CHEN, H.-Z. Chapter 2 - Advances in porous characteristics of the solid matrix in solid-state fermentation. *In*: PANDEY, A.; LARROCHE, C.; SOCCOL, C. R. (ed.). **Current Developments in Biotechnology and Bioengineering**. Amsterdam: Elsevier, 2018.

WANG, L.; YANG, S-T. Solid state fermentation and its applications. *In*: YANG, S-T. **Bioprocessing for value-added products from renewable resources**. Amsterdam: Elsevier, 2007. p. 465-489.

WEBER, F. J.; TRAMPER, J.; RINZEMA, A. Simplified material and energy balance approach for process development and scale-up of *Coniothyrium minitans* conidia production by solid-state cultivation in a packed-bed reactor. **Biotechnology and Bioengineering**, Hoboken, v. 65, p. 447-458, 1999.

YANCY-CABALLERO, D.; ING, L. Y.; FUJITA, A.; FERREIRA, J. E.; DRIEMEIER, C. Intraparticle connectivity in sugarcane bagasse unveiled by pore network modeling. **BioEnergy Research**, New York, v. 12, p. 546-557, 2019.

ZANELATO, A. I.; SHIOTA, V. M.; GOMES, E.; SILVA, R.; THOMÉO, J. C. Endoglucanase production with the newly isolated *Myceliophthora* sp. I-1D3b in a packed bed solid state fermentor. **Brazilian Journal of Microbiology**, Rio de Janeiro, v. 43, n. 4, p. 1536-1544, 2012.

ZHANG, Y.; WANG, L.; CHEN, H. Correlations of medium physical properties and process performance in solid-state fermentation. **Chemical Engineering Science**, London, v. 165, p. 65-73, 2017.