

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
QUÍMICA

WILLIANE SILVA PINHEIRO

SECAGEM DA BIOMASSA DE LEVEDURA
(*Rhodotorula glutinis*) EM CAMADA DE ESPUMA (FOAM-MAT
***DRYING*)**

JOÃO PESSOA

2020

WILLIANE SILVA PINHEIRO

**SECAGEM DA BIOMASSA DE LEVEDURA
(*Rhodotorula glutinis*) EM CAMADA DE ESPUMA (*FOAM-MAT*
DRYING)**

JOÃO PESSOA

2020

WILLIANE SILVA PINHEIRO

**SECAGEM DA BIOMASSA DE LEVEDURA
(*Rhodotorula glutinis*) EM CAMADA DE ESPUMA (FOAM-MAT DRYING)**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química do Centro de Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba, em cumprimento aos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Química.

Orientador: Prof. Dr. Flávio Luiz Honorato da Silva
Coorientadora: Profa. Dra. Josilene de Assis Cavalcante

JOÃO PESSOA

2020

Catlogação na publicação Seção de Catlogação e Classificação

P654s Pinheiro, Williane Silva.

Secagem da biomassa de levedura (*Rhodotorula glutinis*) em camada de espuma
(Foam-mat drying) / Williane Silva Pinheiro. - João Pessoa, 2020.

75 f. : il.

Orientação: Flávio Luiz Honorato da Silva. Coorientação:
Josilene de Assis Cavalcante. Dissertação (Mestrado) -
UFPB/PPGEQ/CT.

1. Conservação de alimentos. 2. Processo fermentativo.
3. Ácido ascórbico. I. Silva, Flávio Luiz Honorato da.
- II. Cavalcante, Josilene de Assis. III. Título.

UFPB/BC

CDU 664.8/.9(043)

WILLIANE SILVA PINHEIRO

**SECAGEM DA BIOMASSA DE LEVEDURA (*Rhodotorula glutinis*) EM CAMADA DE
ESPUMA (FOAM-MAT DRYING)**

Dissertação de Mestrado apresentada ao
Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Química do Centro de Tecnologia da
Universidade Federal da Paraíba, em
cumprimento aos requisitos para obtenção do
título de Mestre em Engenharia Química.

Aprovada em 27/10/2020

BANCA EXAMINADORA



**Prof. Dr. Flávio Luiz Honorato da Silva DEQ/CT/UFPB
(Orientador)**



**Profa. Dra. Josilene de Assis Cavalcante
(Coorientadora)**



**Prof. Dr. Carlos Alberto Bispo de Sousa
(Examinador Interno)**



**Profa. Dra. Joselma Araújo de Amorim
(Examinador Externo)**

Dedico este trabalho a minha mãe, Marlene.

AGRADECIMENTOS

A Deus por me dar forças para enfrentar os momentos difíceis e superar todos os obstáculos. A toda minha família, em especial meus pais e meu irmão, pelo amor e incentivo.

A Ana Carolina minha companheira de vida.

Ao meu orientador Prof. Dr. Flávio Luiz Honorato, pelo privilégio de seus ensinamentos, orientação, carinho, disponibilidade e apoio incondicional ao longo desse trabalho.

A minha coorientadora Profa. Dra. Josilene de Assis, por ter me “adotado” desde da iniciação científica, pelo afeto e amizade todos esses anos de orientação, ensinamentos e por ser mais que uma professora, ser uma inspiração.

Aos professores Nagel Alves, Sharline Florentino por todo conhecimento compartilhado a esta pesquisa.

A Débora Jamila e Clediana Dantas, por toda paciência e ensinamentos.

A coordenação do PPGEQ por toda atenção e auxílios prestados durante todo o decorrer desse processo

Aos companheiros de pesquisa Josevan, Felipe, Amanda, Rian, Leanderson, Paloma, Elder, Wanessa e Daniel Árnobio por toda ajuda e conhecimentos compartilhados, em especial a Tamires pela amizade e carinho em todos esses anos.

Aos alunos de iniciação Científica Brunno e Lucas pelo apoio durante a pesquisa.

A todos os professores que contribuíram para o meu engrandecimento intelectual.

Aos amigos da vida Thiago, Valdiclecio, Daniel, Fernandes, Eduardo e Anna Caroline por todo carinho durante todo esse tempo.

A CAPES pelo apoio financeiro.

RESUMO

As leveduras, em especial o gênero *Rhodotorula*, tem a capacidade de produzir quantidades consideráveis de compostos de alto valor agregado, como pigmentos, carotenoides e lipídeos, além de ser considerada como fonte de proteínas na alimentação humana e animal. Mas para comercialização é conveniente a aplicação de um método de conservação. Dessa forma, o objetivo desse trabalho foi estudar a secagem em camada de espuma (*foam-mat drying*) da biomassa da levedura *Rhodotorula glutinis* para obtenção do pó. A levedura foi cultivada em biorreator, em meio à base de melaço de cana suplementada com nutrientes. A secagem foi realizada de acordo com o planejamento experimental fatorial completo de $2^3 + 3$ pontos centrais, sendo as variáveis independentes: concentração de agente espumante (10, 15 e 20%), tempo de agitação (4, 5 e 6 minutos) e temperatura de secagem (50, 60 e 70 °C), avaliou-se a influência dessas variáveis independentes nas variáveis dependentes (resposta) do processo (tempo de secagem e umidade de equilíbrio) e na caracterização do pó obtido. Também foi avaliada a caracterização física da espuma: estabilidade; densidade; incorporação de ar e expansão nos pontos mínimo, máximo e central do planejamento experimental. A produção de biomassa da *Rhodotorula glutinis* (CTT 2182) foi satisfatória, tendo rendimento médio de 60 g por batelada. O agente espumante já foi escolhido após testes preliminares. Na caracterização física da espuma, a variável independente tempo de agitação, no nível superior do planejamento experimental, foi responsável pelos melhores resultados para a densidade, expansão volumétrica e incorporação de ar. A estabilidade da espuma foi favorecida pelo aumento da concentração do espumante. Na secagem a temperatura apresentou-se como a única variável estatisticamente significativa ao nível de confiança de 95%. Com influência inversamente proporcional, de modo que quanto mais elevada a temperatura menor o tempo de secagem. Para os ajustes das curvas de secagem, os modelos que melhor descreveram o fenômeno da secagem foram Logaritmo e Page, com erro padrão da estimativa inferior a 0,28%. Nas caracterizações físico-químicas do pó da biomassa da levedura *Rhodotorula glutinis*, foi obtido um rendimento teórico médio para os experimentos do ponto central de 22,36%, um teor médio de ácido ascórbico de 41,36 mg/ 100 g de pó e solubilidade superior a 20% em todas as condições estudadas. Na análise de atividade de água, todos os experimentos obtiveram valores acima de 0,6 assegurando assim a viabilidade do produto produzido. O processo de secagem em camada de espuma da biomassa da levedura *Rhodotorula glutinis* mostrou-se viável, sendo as melhores condições de temperatura 70 °C, concentração do espumante 20% e tempo de agitação de 4 minutos, que apresentou menor tempo de secagem e umidade final do produto.

Palavras Chaves: processo fermentativo, atividade de água, ácido ascórbico.

ABSTRACT

Yeasts, especially the genus *Rhodotorula*, have the capacity to produce considerable amounts of compounds with high added value, such as carotenoid pigments and lipids, in addition to being considered a source of proteins in human and animal nutrition, but for commercialization it is convenient to apply conservation method. Thus, the objective of this work was to study the drying in foam layer (foam-mat drying) of the biomass of the yeast *Rhodotorula glutinis* to obtain the powder. The yeast was grown in a bioreactor, amid sugarcane molasses, supplemented with nutrients. The drying was carried out according to the complete factorial design of $2^3 + 3$ central points, with independent variables: concentration of foaming agent (10, 15 and 20%), stirring time (4, 5 and 6 minutes) and temperature drying (50, 60 and 70 ° C), the influence of these independent variables on the dependent variables (response) of the process (drying time and equilibrium humidity) and on the characterization of the obtained powder was evaluated. The physical characterization of the foam was also evaluated: stability; density; incorporation of air and expansion in the minimum, maximum and central points of the experimental planning. The production of biomass from *Rhodotorula glutinis* (CTT 2182) was satisfactory, with an average yield of 60 g per batch. The sparkling agent juá was chosen after preliminary tests. In the physical characterization of the foam, the independent variable agitation time, at the upper level of the experimental design, was responsible for the best results for density, volumetric expansion and air incorporation. The foam stability was favored by the increase in the concentration of the sparkling wine. In drying, temperature was the only statistically significant variable at the 95% confidence level. With inversely proportional influence, so that the higher the temperature, the shorter the drying time. For the adjustment of the drying curves, the models that best described the drying phenomenon were Logarithm and Page, with a standard error of the estimate below 0.28%. In the physico-chemical characterizations of the biomass powder of the yeast *Rhodotorula glutinis*, an average theoretical yield was obtained for the experiments of the central point of 22.36%, an average ascorbic acid content of 41.36 mg / 100 g of powder and solubility greater than 20% in all conditions studied. In the analysis of water activity, all experiments obtained values above 0.6, thus ensuring the viability of the product produced. The drying process in the foam layer of the *Rhodotorula glutinis* yeast biomass proved to be feasible, with the best temperature conditions being 70 °C, concentration of the sparkling wine 20 (%) and stirring time of 4 minutes, which showed less drying time and moisture end of the product.

Keywords: fermentative process, dehydration, drying kinetics.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
1.1 OBJETIVOS GERAIS.....	12
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	12
2. REVISÃO DA LITERATURA.....	13
2.1 LEVEDURAS.....	13
2.1.1 Levedura Rhodotorula	13
2.2 RESÍDUOS AGROINDUSTRIAIS	15
2.3 SECAGEM	15
2.3.1 Curvas de secagem	16
2.3.2 Secagem em camada de espuma	18
2.4 ATIVIDADE DE ÁGUA (AW).....	19
3. METODOLOGIA	20
3.1 DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS E VARIÁVEIS OPERACIONAIS PARA OS ENSAIOS DE SECAGEM.....	20
3.2 ETAPAS DO PROCESSO PARA OBTENÇÃO DA LEVEDURA EM PÓ	21
3.2.1 Microrganismo	21
3.2.2 Processo fermentativo no biorreator.....	23
3.2.3 Métodos analíticos para avaliação da cinética microbiana	23
3.3 PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA ESPUMA	25
3.3.1 Estabilidade da espuma.....	25
3.3.2 Incorporação de ar (over run).....	25
3.3.3 Densidade.....	27
3.3.4 Porcentagem de expansão da espuma.....	27
3.3.5 Cálculo do teor de umidade do material	28
3.4 SECAGEM EM CAMADA DE ESPUMA.....	28
3.4.1 Ensaios de secagem em camada de espuma	29
3.4.2 Cinética e ajustes matemáticos.....	30
3.4.3 Análise estatística	30
3.4.4 Ajustes dos dados experimentais aos modelos matemáticos	30
3.5 CARACTERIZAÇÃO DO PÓ OBTIDO.....	32
3.5.1 Rendimento teórico.....	32

3.5.2 Solubilidade	32
3.5.3 Atividade de água	33
3.5.4 Ácido Ascórbico	33
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	34
4.1 DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS E VARIÁVEIS OPERACIONAIS	34
4.2 CULTIVO	35
4.3 CARACTERIZAÇÃO DA ESPUMA	36
4.3.1 Estabilidade.....	37
4.3.2 Densidade e Percentual de expansão	39
4.3.3 Capacidade de incorporação de ar -Over run.....	40
4.4 SECAGEM EM CAMADA DE ESPUMA (FOAM-MAT DRYING).....	40
4.4.1 Análise estatística dos resultados da secagem	40
4.4.2 Cinética de secagem	46
4.4.3 Ajustes dos dados experimentais aos modelos matemáticos	46
4.5 CARACTERIZAÇÃO DO PÓ.....	59
4.5.1 Rendimento	59
4.5.2 Solubilidade	60
4.5.3 Ácido Ascórbico.....	61
4.5.4 Atividade de água.....	62
5. CONCLUSÃO	64
REFERÊNCIAS.....	66
APÊNDICES	71

1 INTRODUÇÃO

As leveduras são fungos que têm sido utilizadas pela humanidade há milhares de anos e cuja manipulação causou um grande impacto na produção de alimentos e, por conseguinte, influenciando o próprio processo de desenvolvimento socioeconômico. (TORRES e MORAES, 2000).

A produção de carotenoides por leveduras do gênero *Rhodotorula*, através do emprego de processos fermentativos, apresenta algumas vantagens, pois os pigmentos produzidos são considerados naturais com isso, muitos estudos estão direcionados a encontrar alternativas que possam induzir a síntese de carotenoides e/ou aumentar a eficiência destes microrganismos de forma que eles sejam comercialmente viáveis (AUSICH, 1997; BHOSALE, 2004).

Os carotenoides são corantes naturais responsáveis pelas cores amarelas, laranja e vermelho de muitos alimentos, são utilizados nas indústrias alimentícia, farmacêutica, de cosméticos e de ração. Seu amplo uso é devido a sua atividade pró-vitâmica A e as propriedades que resultam em funções biológicas benéficas à saúde, como o fortalecimento do sistema imunológico, inibição de doenças onde os radicais livres apresentam papel fundamental, como arteriosclerose, catarata, degeneração macular, esclerose múltipla, câncer, doenças degenerativas e cardiovasculares (MALDONADE, 2007; BHOSALE, 2004).

O gênero *Rhodotorula* também é estudado quanto ao seu potencial como fonte de outros lipídeos e de proteínas unicelulares (BHOSALE e GRADE, 2001). A biomassa das leveduras é considerada uma fonte rica em proteínas, lipídios e sais minerais, que podem ser utilizadas como aditivos em alimentos destinados a humanos e animais (CABALLERO-CORDOBA, PACHECO e SGARBIERI, 1997).

Na produção de carotenoides por processos microbiológicos (biotecnológicos), o metabolismo dos microrganismos é intracelular e para a extração dos bioativos se faz necessário a lise das células de leveduras (ruptura ou dissolução da parede celular, que leva à morte da célula e à liberação de seu conteúdo).

A secagem é uma das alternativas para a conservação desses compostos, pois possui a capacidade de reduzir consideravelmente a atividade de água e consequentemente a ação microbiológica, prolongando a vida útil do produto.

Uma das técnicas de secagem que vem sendo estudada é da secagem em camada de espuma (*foam-mat drying*), que consiste basicamente na transformação de produtos líquidos e semilíquidos em uma espuma estável através da adição de agentes químicos com propriedades emulsificantes e espumantes, com posterior desidratação a baixas temperaturas. A secagem em

camada de espuma é considerada, em comparação com outros processos de secagem, de baixo custo de operação e é utilizado menos tempo de secagem devido à elevada área de contato exposta ao ar aquecido, facilitando a retirada da umidade do meio em processo de secagem (SANKAT e CASTAIGNE, 2004).

Dessa forma, pretende-se utilizar a biomassa oriunda do cultivo da *Rhodotorula glutinis* para fins de produção de um suplemento proteico e vitamínico, pelo método de secagem em camada de espuma.

1.1 OBJETIVOS GERAIS

Obtenção do pó da levedura *Rhodotorula glutinis* através do método de secagem em camada de espuma (*foam-mat drying*).

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Cultivo da levedura glutinis para obtenção da biomassa
- Definir parâmetros operacionais para produção da espuma e secagem da mesma;
- Realizar a caracterização física da espuma que será submetida a secagem;
- Acompanhar a cinética de secagem da levedura em camada de espuma, baseado no planejamento experimental fatorial completo $2^3 + 3$ pontos centrais para avaliar a influência das variáveis de entrada (concentração de espumante; temperatura de secagem; tempo de agitação) sobre a resposta (tempo de secagem; umidade de equilíbrio);
- Realizar o ajuste das curvas de secagem obtidas a partir de modelos matemáticos;
- Realizar caracterizações físico-químicas do pó obtido.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 LEVEDURAS

As leveduras são organismos pertencentes ao grupo dos fungos, as quais se apresentam predominantemente sob a forma unicelular. Exercendo papel similar ao das bactérias, sendo tipicamente consumidores de matéria orgânica. Entretanto em relação às dimensões e propriedades morfológicas se diferenciam (REED e PEPPLER, 1973).

Ainda segundo Reed e Peppler (1973) as leveduras crescem e se reproduzem mais rapidamente do que os mofo (chamados de fungos verdadeiros). Também são mais eficientes na realização de alterações químicas, por causa de sua maior relação área/volume. Seu tamanho varia de 2,5 a 10,5 μm de largura e de 4,5 a 21 μm de comprimento.

Entre os fungos microscópicos, as leveduras são os microrganismos mais intensamente utilizados em indústrias. São cultivados visando à obtenção das células propriamente ditas, seus componentes celulares e os produtos finais durante a fermentação, Constituindo assim o principal grupo de microrganismos utilizados na fermentação de alimentos e bebidas (SICARD e LEGRAS, 2011).

Dentre os microrganismos, as leveduras têm se destacado como uma excelente fonte de proteínas, não apenas pela sua capacidade de sintetizá-las e a outros compostos, mas também por suas características não patogênicas, podendo ser usadas tanto como alimento humano quanto como ração (MARTÍEZ-FORCE e BENÍTEZ, 1992)

As proteínas de levedura, devido ao seu elevado valor nutricional e propriedades físico-químicas desejáveis, apresentam-se como uma alternativa tecnológica favorável para aplicação em diversas formulações de alimentos (KINSELLA, 1987).

As leveduras oleaginosas são capazes de produzir lipídios com perfil de ácidos graxos similares aos de óleos vegetais, com ácidos graxos saturados e monoinsaturados, principalmente contendo de 16 a 18 átomos de carbono na cadeia (PAPANIKOLAU e AGGELIS, 2011).

Segundo Ratledge e Wynn (2002) e Meng et al., (2009) diversas espécies de leveduras são classificadas como oleaginosas, pela capacidade de acumular mais do que 20% de ácidos graxos, armazenados em inclusões lipídicas intracelulares.

As leveduras oleaginosas mais conhecidas incluem os gêneros *Candida*, *Cryptococcus*, *Rhodotorula* e *Yarrowia*. Estas leveduras são capazes de acumular em média 40% de lipídios com relação à sua biomassa, entretanto em condições de limitação de nutrientes

este acúmulo pode atingir 70%. O conteúdo e o perfil lipídico produzido diferem de espécie para espécie (BEOPOULOS et al., 2009).

2.1.1 Levedura *Rhodotorula*

Leveduras do gênero *Rhodotorula* são microrganismos estritamente aeróbios. Neste grupo estão inclusas espécies *R. aurantiaca*, *R. glutinis*, *R. rubra*, *R. minuta*, *R. lactosa*, *R. graminis* etc. São espécies bem distribuídas na natureza, sendo encontradas em ambientes marinhos, aquáticos e no solo (COSTA, 1992).

Dentre os microrganismos apresentados, a *Rhodotorula glutinis* se destaca, pois, além de acumular carotenoides como β -caroteno, toruleno e torularrodina como produtos finais da biossíntese de carotenoides também é rica, em outros lipídios, proteínas e vitaminas, que a tornam um adequado aditivo (BHOSALE; GRADE, 2001).

Xue et al. (2008) utilizaram a levedura *R. glutinis* para produzir lipídios com potencial para a produção de biodiesel tendo como substrato águas residuais de glutamato monossódico, os resultados mostraram que a adição de glicose favoreceu o crescimento da levedura e a produção de lipídios.

Squina e Mercadante (2003) utilizaram cinco linhagens de leveduras *Rhodotorula* para produção e determinação da composição por cromatografia líquida de alta eficiência (CLAE) de carotenoides. Nesse estudo, das cepas avaliadas, a *R. glutinis* foi a que apresentou a maior concentração de carotenoides, seguido da *R. Rubra* que também apresentou características semelhantes. Os carotenoides mais presentes nestas cepas foram torularrodina, toruleno, γ -caroteno e β -caroteno.

Martinez et. al. (2006) utilizaram *Rhodotorula glutinis* L-1816 isolada das uvas Cabernet Sauvignon para produção da enzima α -L-arabinofuranosidase (Abf). Nesse estudo, diferentes fatores do meio de cultura foram avaliados, como o uso de peptona como fonte de nitrogênio, melaço de beterraba, como fonte de carbono, como também pH e temperatura de crescimento. Decorridas 80 horas de fermentação, obteve-se uma correlação positiva entre a taxa de diluição e a atividade do Abf, onde este aumentou aproximadamente 500%. Além disso, também foi observado um aumento na produção de proteínas totais.

2.2 RESÍDUOS AGROINDUSTRIAIS

O Brasil é o maior produtor de cana-de-açúcar do mundo e segundo relatório da Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB) divulgado em agosto de 2019, a produção nacional foi de 620.435,4 mil toneladas na safra de 2018/2019. As principais regiões produtoras são o Sudeste com 400.312,1 mil toneladas, seguido do Centro-Oeste com 136.855,1 mil toneladas, Nordeste 44.416,1 mil toneladas e por fim o Norte do país, com 3.317,83 mil toneladas da produção nacional (CONAB, 2019).

O melaço de cana é o principal coproduto da indústria açucareira. É um licor resultante da cristalização final do açúcar, sendo composto por: água, açúcares (em média 62%, incluindo glicose, frutose e sacarose), compostos nitrogenados (aminoácidos, vitaminas e proteínas) e uma fração mineral composta principalmente por cálcio, magnésio, sódio e potássio (RAMBLA et al., 1999).

Sendo assim, devido à presença de grande quantidade de açúcares fermentescíveis em sua composição, o melaço constitui uma boa fonte de carbono para o metabolismo microbiano, além disso, sua composição mineral é rica em nutrientes importantes para o metabolismo celular (WALISZEWSKI, ROMERO e PARDIO, 1997; CORTÉZ; BROSSARD-PÉREZ, 1997).

2.3 SECAGEM

A necessidade de conservar os alimentos começou a ser uma preocupação no período pré-histórico quando as populações deixaram de ser nômades, e se fixaram em única área, deixando de se alimentar somente de produtos frescos, e percebendo necessidade de estocar alimentos caso houvesse momentos de escassez. Dessa forma, foram sendo desenvolvidas técnicas para evitar que esse alimento se deteriorasse, mantendo a segurança de um alimento por maior período (CRUZ, 1990).

Com o tempo, foram surgindo diferentes métodos de conservação. Com o fogo, defumaram alimentos, com o sal, realizou-se a salga, outra forma experimentalmente descoberta foi colocando a carne ao sol, observando-se assim a formação de uma camada externa na carne depois de um tempo exposta, já seca, que mantinha a conservação da parte interna por maior período. Método conhecido como secagem ou desidratação (CRUZ, 1990).

Com o avanço da ciência, esses processos de conservação foram aprimorados, melhorando a qualidade e o tempo de vida dos produtos, além de muitas outras vantagens como a disponibilidade de alimentos sazonais durante todo ano, maior facilidade de transporte, o que

também permite o alcance e acessibilidade de alimentos de certas regiões para lugares mais distantes, como em outros continentes.

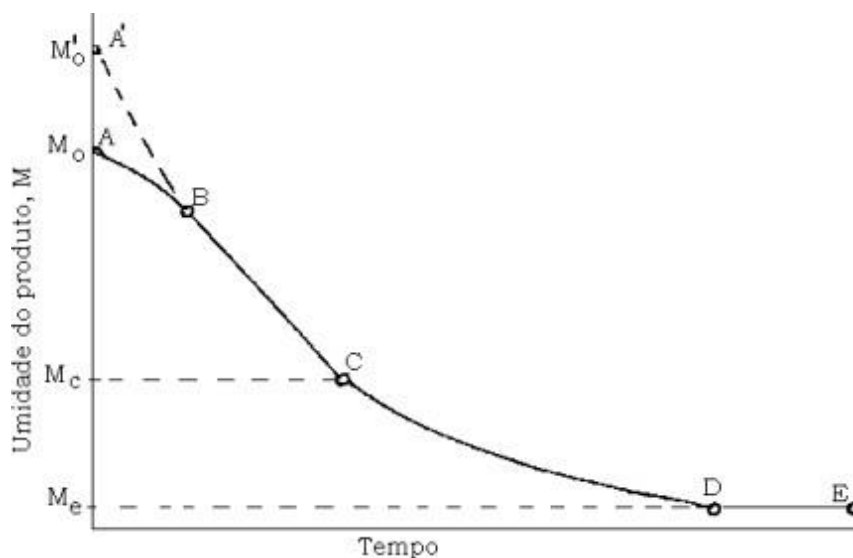
A secagem constitui-se em uma técnica que remove a água presente no alimento na forma de vapor, através da transferência de calor e massa, ou seja, a conservação do alimento pelo controle da umidade nele presente, retardando a atividade enzimática, deterioração de origem físico-química, além do desenvolvimento microbiano (MACHADO, 2006).

A secagem artificial é um processo de remoção de umidade, que implica no uso de equipamentos e condicionamento do ar de secagem pelo controle da temperatura, umidade relativa e velocidade do ar de secagem. Dessa forma, as condições do ar de secagem, não dependem das condições climáticas, o que favorece a obtenção de um produto de qualidade superior, e um menor tempo de processamento (CORNEJO, NOGUEIRA e WILBERG, 2003).

2.3.1 Curvas de secagem

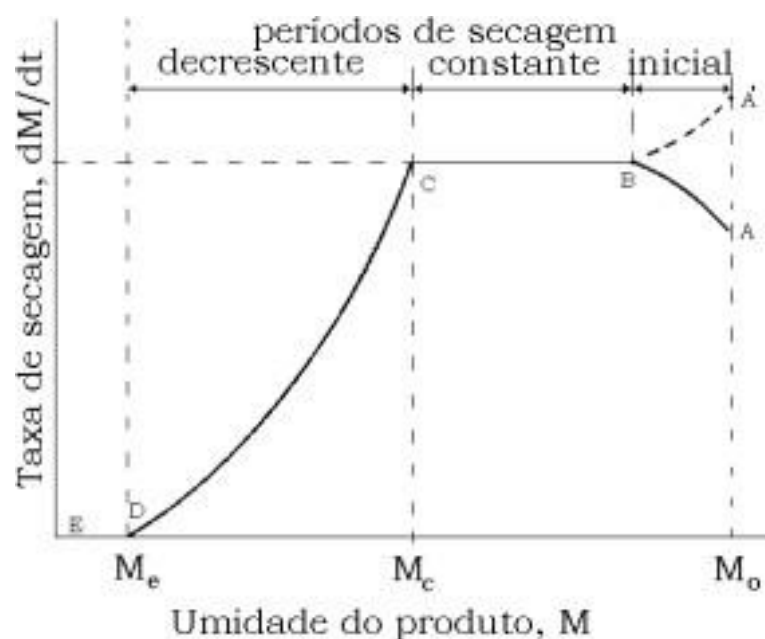
As curvas de secagem podem ser representadas de duas formas, a curva típica de secagem convectiva e a curva de taxa de secagem, nas quais são mostrados os diferentes períodos de secagem (Figuras 2.1 e 2.2).

Figura 2.1 - Curva característica da cinética de secagem convectiva



Fonte: FIOREZE e ROMEU (2003)

Figura 2.2- Curva da taxa de secagem



Fonte: FIOREZE e ROMEU (2003)

Como é possível observar através das Figuras, no período inicial da secagem, a mudança do teor de umidade do sólido com o tempo é ilustrada pelo segmento AB. Neste período, segmento BC, a taxa de secagem que corresponde à inclinação da reta, permanece constante. A diminuição linear do teor de umidade com o tempo ocorre continuamente até atingir o ponto C, chamado ponto crítico. A partir do ponto C, segmento CD, ocorre o aparecimento de uma curva próxima do teor de umidade de equilíbrio do material X_{eq} (STRUMILLO e KUDRA, 1986).

O período de secagem correspondente ao segmento BC da Figura 2.1 é chamado período de secagem a taxa constante. Após o ponto crítico (ponto C), é iniciado o segundo período de secagem denominado período de secagem à taxa decrescente.

Ainda de acordo com Strumillo e Kudra (1986), a taxa de secagem é definida como sendo a quantidade de umidade removida a partir do material na unidade de tempo por unidade de superfície de secagem. Na Figura 2.2, pode-se observar os dois períodos característicos da secagem. No período de secagem que corresponde ao segmento BC denomina-se secagem à taxa constante. No segmento subsequente (CD), ocorre o período de secagem à taxa decrescente.

O período de taxa decrescente é geralmente a parte mais demorada da operação de secagem. Em alguns alimentos, como frutas e grãos, o teor de umidade inicial está abaixo do teor crítico de umidade e o período de taxa decrescente é a única parte da curva de secagem que é observada (FELLOWS, 2006).

2.3.2 Secagem em camada de espuma

A secagem em leito de espuma foi desenvolvida na década de 50 por Morgan e sua equipe (MORGAN et al., 1959). O alimento é convertido em uma espuma estável por meio da adição de agentes espumantes e incorporação de ar, nitrogênio ou outros gases, em batedeiras ou outros equipamentos geradores de espuma (BRENNAN, 1994; FELLOWS, 2000). Em seguida, a espuma é espalhada sobre uma superfície, perfurada ou não, utilizando-se geralmente camada com espessura em torno de 2 a 5 mm.

A importância dos alimentos em pó deve-se a sua versatilidade no manuseio, armazenamento, processo de fabricação, estabilidade química e microbiológica, entre outras. Alguns exemplos desta classe de alimentos são: leites (integral e desnatado); café; malte, suplementos proteicos; pré-misturas para panificação; leveduras; enzimas; aromas; entre outros (VISSOTTO et al., 2006). E vem sendo muito utilizada também para alimentos pastosos como purês de frutas (SANKAT e CASTAIGNE, 2004).

O método de secagem em camada de espuma é relativamente simples. No entanto, uma dificuldade que tem sido experimentada com este processo é a falta de estabilidade de espuma durante o ciclo de aquecimento. As variáveis que afetam a formação de espuma, densidade e estabilidade, teor de sólidos solúveis, tipo e concentração de agente espumante, tipo e concentração do estabilizador de espuma (KARIM e WAI, 1999).

Para que sejam consideradas estáveis, as espumas devem possuir uma estrutura firme que não escorram do suporte de secagem e que não colapsem por pelo menos uma hora. A adição de agentes espumantes ou estabilizantes (geralmente biopolímeros solúveis em água de alto peso molecular) evita o colapso durante a desidratação devido a um aumento na temperatura de transição vítrea do produto ou mudanças nas propriedades reológicas da espuma. O estabilizante de espuma deve, no entanto, ser adicionado em baixas concentrações, já que o excesso destes aditivos pode resultar em colapso da espuma (RATTI e KUDRA, 2006, SANGAMITHRA et al., 2015).

As vantagens dessa técnica em relação a outras técnicas de secagem de líquidos como a secagem pulverizada (*spray-drying*) e a secagem em tambor (*drum-drying*) são: técnica mais simples, custo operacional menor, possibilita o uso de temperaturas mais baixas, o que preserva melhor o sabor e o valor nutricional, devido à maior área de superfície exposta ao ar e à velocidade de secagem, acelerando assim o processo de remoção de água e a obtenção de um produto poroso e de fácil reidratação (FRANCIS, 2000).

2.4 ATIVIDADE DE ÁGUA (A_w)

O teor de água de um alimento é o principal fator causador da deterioração por microrganismos e alterações por reações químicas e enzimáticas. A diminuição desse índice é um modo de conservação do alimento, no entanto quanto maior a umidade final, menos rígida será a consistência do produto, e atingirá a qualidade apreciada em um produto desidratado. Deve-se ponderar os dois fatores na secagem do alimento, para obter um produto de qualidade e com uma vida útil elevada (CELESTINO, 2010)

De acordo com Hoffman (2001) o valor absoluto da atividade de água dá uma indicação segura do teor de água livre do alimento, sendo esta a única forma de água utilizada por parte dos microrganismos. As bactérias são normalmente mais exigentes quanto à disponibilidade de água livre, seguidas pelos bolores e leveduras, sendo que, dentre estes últimos, algumas espécies se destacam pela elevada tolerância à baixa A_w . A possibilidade de alteração microbiana em alimentos acaba naqueles que apresentam A_w abaixo de 0,60, embora isso não signifique a destruição dos microrganismos.

Ainda segundo Hoffman (2001) a atividade de água mínima para o desenvolvimento da maioria das bactérias está entre 0,91 - 0,88; para a maioria das leveduras é 0,88 e para a maioria dos bolores é 0,80. A atividade de água nos alimentos pode variar de $A_w > 0,98$ (carnes e pescados frescos, leite e outras bebidas, frutas e hortaliças frescas, hortaliças em salmoura enlatadas e frutas em calda enlatadas) a $A_w < 0,60$ (doces, chocolate, mel, macarrões, batatas fritas, verduras desidratadas, ovos e leite em pó).

3 METODOLOGIA

Os experimentos foram conduzidos nos laboratórios do Departamento de Engenharia Química do Centro de Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba (DEQ/CT/UFPB)

3.1 DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS E VARIÁVEIS OPERACIONAIS PARA OS ENSAIOS DE SECAGEM

Na fase inicial do estudo foi necessário realizar testes preliminares a fim de definir os parâmetros da secagem, isto é, a preparação da matéria-prima, definição do agente espumante e o tempo de agitação, para a formação de uma espuma adequada para a secagem. A produção de uma espuma estável é de suma importância para que o processo de secagem seja eficiente, dessa forma foram feitos testes visando definir e padronizar as etapas do processo.

Na realização dos testes preliminares utilizou-se a levedura *Saccharomyces cerevisiae*, tendo em vista a sua similaridade física com a levedura *Rhodotorula glutinis* e principalmente pela sua disponibilidade no mercado. A *Saccharomyces cerevisiae*, foi obtida no comércio local da cidade de João Pessoa- PB, em tabletes de 0,5 kg.

Para a formação da espuma foram testados diferentes agentes espumantes com o propósito de definir o mais adequado para o processo de secagem em camada de espuma.

A levedura *Saccharomyces cerevisiae* foi diluída em água destilada em uma razão de 1:2, o composto produzido foi então misturado ao agente espumante e submetido a vigorosa agitação em batedeira.

Nos testes foram utilizados os agentes espumantes: carboximetilcelulose (CMC); Portugel® e Emustab®, que são emulsificantes e estabilizantes industriais, sendo empregados no setor alimentício e tem como principal princípio ativo os monoglicerídeos de ácidos graxos destilados. Outra classe de agente espumante foi aplicada nos testes iniciais, a clara do ovo em pó e a entrecasca de juá em pó, que são produtos desenvolvidos pela equipe de secagem do laboratório de Termodinâmica da UFPB, que têm pedidos de depósitos de patente registrados sob os números BR 10 2017 018701 2 e BR 10 2017 023344, respectivamente.

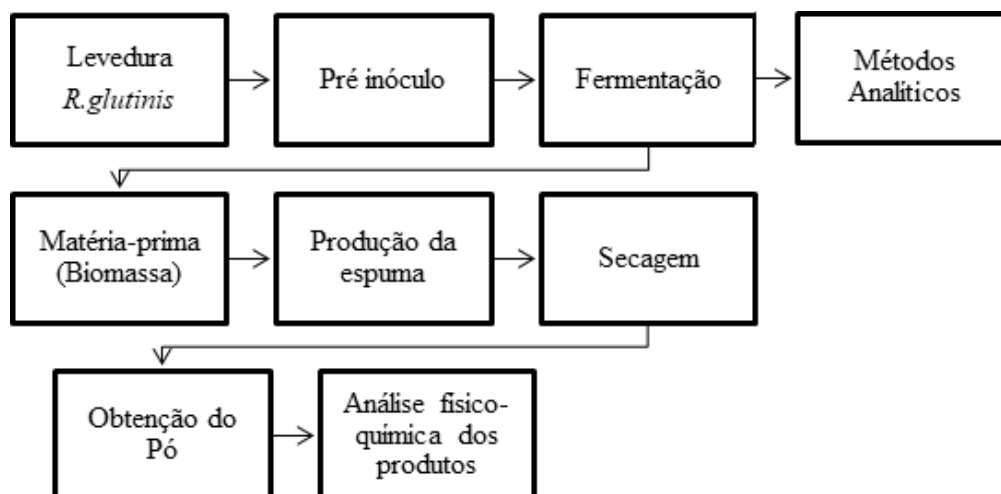
Os testes foram desenvolvidos em diferentes concentrações do agente espumante e diferentes tempos de agitação, com o objetivo de obter a formação da espuma.

3.2 ETAPAS DO PROCESSO PARA OBTENÇÃO DA LEVEDURA EM PÓ

O estudo em questão foi dividido em duas partes principais, sendo a primeira delas a produção da biomassa através da fermentação, seguida da secagem.

Após os testes preliminares, foram definidas todas as etapas do processo (Figura 3.1) a serem desenvolvidas para a obtenção da biomassa da levedura *Rhodotorula glutinis* em pó pelo método de secagem em camada de espuma.

Figura 3.1- Fluxograma do procedimento experimental utilizado.



3.2.1 Microrganismo

A levedura utilizada foi a *Rhodotorula glutinis* (CTT 2182), a mesma foi adquirida da coleção da Fundação André Tosello (Campinas, São Paulo, Brasil). Para crescimento e manutenção, as colônias foram incubadas em placas de Petri (Figura 3.2) com meio Yeast Malt Agar (YMA) cuja composição é mostrada na Tabela 3.1.

Tabela 3.1- Composição do meio YMA

Componente	Concentração (g.L ⁻¹)
Dextrose	10
Extrato de levedura	3
Extrato de malte	3
Bacto peptona	5
Agar	20

Pré-inóculo

As células da *Rhodotorula glutinis* (CTT 2182) foram transferidas das placas de Petri de forma asséptica para frascos de Erlenmeyer de 500 mL (Figura 3.3) contendo 200 mL de meio de cultivo sintético Yeast-Malt Extract (YM), cuja composição é mostrada na Tabela 3.2. Após a inoculação os frascos foram colocados em uma incubadora do tipo shaker da Logen Scientific LS4900-TZH a 30 °C por 48 horas a 200 rpm. Em seguida, as células foram separadas utilizando a centrífuga NT 812 da marca Novatecnica, a 5000 rpm por 10 minutos, de modo a obter uma concentração de células para a inoculação em bioreator.

Tabela 3.2- Composição do meio YM

Componente	Concentração (g.L ⁻¹)
Dextrose	10
Extrato de levedura	3
Extrato de malte	3
Bacto peptona	5

Fonte: Silva (2018)

Figura 3.2 - Levedura *Rhodotorula glutinis* em placa de Petri

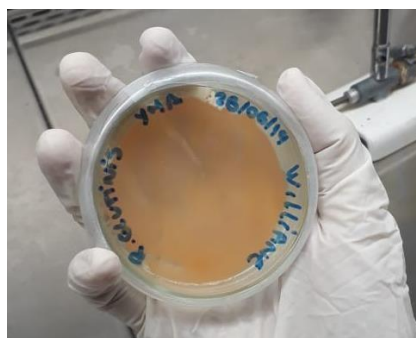


Figura 3.3 – Pré inóculo em meio YM após 48 horas



3.2.2 Processo fermentativo no biorreator

Os experimentos fermentativos foram realizados em biorreator de capacidade de 4,0 L, com vazão de aeração de 0,5 vvm, contendo 2,0 L de meio de cultivo sintético (Tabela 3.3). Os meios foram esterilizados a 120 °C por 15 min, inoculados com as células obtidas a partir do pré inóculo, para uma fermentação de 80 horas, a 28 °C e 180 rpm. Ao final do processo o meio de cultivo fermentado foi centrifugado para obtenção da biomassa úmida, que posteriormente foi congelada.

Tabela 3.3 - Componentes do meio de cultivo alternativo para crescimento da levedura *Rhodotorula glutinis*

Componente	Concentração (g.L ⁻¹)
Melaço de cana	80,0
Extrato de levedura	3,0
MgSO ₄ .H ₂ O	0,5
KH ₂ PO ₄	8,0

3.2.3 Métodos analíticos para avaliação da cinética microbiana

Concentração de células (Biomassa)

Para a cinética microbiana foram retiradas amostras do cultivo (alíquotas de 2 mL) durante os intervalos de tempo de 0, 2, 4, 6, 8, 10, 34, 58, 72, 80, 96, 110, 120, 132 e 144 horas para análise de concentração de células (g.L⁻¹). As amostras foram centrifugadas a 10000 rpm por 3 min, em triplicata e o sobrenadante retirado e congelado, para análises de açúcares redutores, e os tubos contendo às células foram colocados em estufa a 105 °C por 24 h, para análise de umidade.

Açúcares redutores (AR)

Para a determinação dos açúcares redutores presentes nas amostras do cultivo, utilizou-se uma modificação do método do DNS, originalmente proposto por Miller (1959). O meio reacional foi formado por 0,5 mL da amostra e 0,5 mL de solução de ácido 3,5- dinitrosalisílico (DNS) e o mesmo foi incubado por 5 minutos a 100 °C. Interrompeu-se a reação com um banho

de gelo e a leitura da absorbância foi realizada em espectrofotômetro a 540 nm, após a diluição de água destilada.

Figura 3.4 – Biorreator



Figura 3.5 Células do Pré-inóculo para fermentação no biorreator



Figura 3.6 Biomassa da levedura *Rhodotorula glutinis*.



3.3 PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA ESPUMA

Para produzir a espuma utilizou-se um composto de biomassa e água destilada, na proporção de 1:2, ou seja, a cada 50g de biomassa foi adicionado 100 mL de água destilada, em seguida a mistura foi homogeneizada. A proporção do composto supracitado foi determinada em testes preliminares (item 3.1)

A espuma foi produzida a partir de agitação vigorosa, em batedeira planetária Deluxe da marca Arno, do composto com a adição do espumante que foi definido em testes preliminares, assim como os tempos de agitação e concentração do agente espumante.

Figura 3.7 - Produção da espuma.



3.3.1 Estabilidade da espuma

A estabilidade foi avaliada através do método citado por Karin e Wai (1999), onde uma quantidade de espuma (10 g) foi depositada em um funil com filtro de nylon em proveta graduada e colocados em estufa com circulação e renovação de ar SL – 102 da Solab, por 90 minutos, nas temperaturas de secagem e volume drenado anotado em intervalos de 10 minutos, com cada teste realizado em triplicata. Essa análise baseia-se no fato de que a estabilidade da espuma é avaliada como inversamente proporcional ao volume de líquido drenado na proveta (PINTO, 2009; SILVA FILHO, 2012).

3.3.2 Incorporação de ar (*over run*)

O volume da espuma formada está ligado com a capacidade de incorporação de ar da solução. Para a determinação da incorporação de ar (Figura 3.8) foi avaliado o volume do composto antes e depois de ser submetida à rigorosa agitação. A análise foi realizada para

diferentes concentrações do espumante e tempo de agitação. Para o cálculo da porcentagem de ar incorporado foi utilizada a Equação 3.1. Conforme metodologia descrita por Pereira (2015).

Figura 3.8- Análise de capacidade de incorporação de ar



$$\%Over\ run = \frac{(V_{espuma} - V_{suco})}{V_{suco}} \times 100 \quad (3.1)$$

Onde:

V_{espuma} = Volume da espuma após agitação (cm^3)

V_{suco} = volume do suco e espumante antes da agitação (cm^3)

3.3.3 Densidade

A determinação da densidade da espuma foi realizada pela medição da massa e do volume ocupado pela mesma. Após a obtenção da espuma, uma proveta de 25 mL foi tarada e cheia de espuma com o auxílio de um funil (Figura 3.9). Ao completar os 25 mL a massa foi anotada. (Araújo et al., 2017, Brock et al., 2008). O valor da densidade é obtido pela Equação 3.2:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (3.2)$$

Onde:

m = massa (g)

V = volume (mL)

Figura 3.9- Análise de densidade



3.3.4 Porcentagem de expansão da espuma

A expansão de cada espuma foi calculada utilizando os valores encontrados previamente para as densidades da espuma e do suco da *Rhodotorula glutinis*, utilizando a Equação 3.3, segundo a metodologia de Feitosa; Figueiredo; Queiroz; Lima & Oliveira (2017):

$$\text{Expansão (\%)} = \frac{\left(\frac{1}{\rho_{\text{espuma}}} - \frac{1}{\rho_{\text{suco}}} \right)}{\frac{1}{\rho_{\text{suco}}}} \cdot 100\% \quad (3.3)$$

Onde:

ρ_{espuma} = densidade da espuma (g/cm³);

ρ_{suco} = densidade do suco (g/cm³);

3.3.5 Cálculo do teor de umidade do material

Para o cálculo do teor de umidade, a massa de sólido seco foi obtida pelo o método gravimétrico (IAL, 2008). Foi colocado 1 g do material disposto em um cadinho, de massa previamente conhecida, e em seguida o mesmo foi colocado em uma estufa de esterilização a 105 °C por 24 horas, todo o procedimento foi realizado em triplicata.

Após as 24 horas o cadinho foi pesado para obtenção da massa de sólido seco; para o cálculo do teor de umidade em base úmida (Equação 3.4) e em base seca (Equação 3.5)

$$X_{(b.u.)} = \frac{(m_i - m_{ss})}{m_i} \quad (3.4)$$

$$X_{(b.s.)} = \frac{(m_i - m_{ss})}{m_{ss}} \quad (3.5)$$

Onde:

$X_{(b.u.)}$ = teor de umidade em base úmida (adimensional)

$X_{(b.s.)}$ = teor de umidade em base seca (adimensional)

m_i = massa inicial da amostra em gramas (g)

m_{ss} = massa do sólido seco da amostra (g)

3.4 SECAGEM EM CAMADA DE ESPUMA

A partir dos testes iniciais, foram definidas como variáveis independentes do processo, as seguintes condições: temperatura de secagem (T); tempo de agitação (t_{ag}) para produção da espuma e concentração do espumante (C). E assim foi desenvolvido um planejamento experimental fatorial completo 2^3 com três repetições no ponto central, totalizando assim 11 experimentos. O qual teve como objetivo verificar a influência das variáveis independentes sobre as variáveis dependentes (variáveis de saída) do processo, nesse caso, tempo de secagem e a umidade final do produto.

As variáveis independentes e seus respectivos níveis e a matriz experimental para os ensaios de secagem são apresentadas nas Tabelas 3.4 e 3.5, respectivamente. As variáveis de entrada, assim como seus níveis, foram definidas nos testes preliminares, com exceção da temperatura que foi escolhida baseada em trabalhos da literatura.

Para que a aleatoriedade do planejamento seja cumprida, os experimentos não foram realizados na mesma ordem em que estão dispostos na Tabela 3.5.

Tabela 3.4 – Valores codificados e reais das variáveis independentes.

Variáveis independentes	Níveis		
	-1	0	1
Concentração do espumante (%)	10	15	20
Tempo de agitação (min)	4	5	6
Temperatura de secagem (°C)	50	60	70

Tabela 3.5 – Matriz do planejamento experimental fatorial completo $2^3 + 3$ pontos centrais

N° do Experimento	Variáveis independentes		
	C	t_{ag}	T

	(%)	(min)	(°C)
1	10(-1)	4 (-1)	50 (-1)
2	20(1)	4 (-1)	50 (-1)
3	10 (-1)	6 (1)	50 (-1)
4	20 (1)	6 (1)	50 (-1)
5	10 (-1)	4 (-1)	70 (1)
6	20 (1)	4 (-1)	70 (1)
7	10 (-1)	6 (1)	70 (1)
8	20 (1)	6 (1)	70 (1)
9	15 (0)	5 (0)	60 (0)
10	15 (0)	5 (0)	60 (0)
11	15 (0)	5 (0)	60 (0)

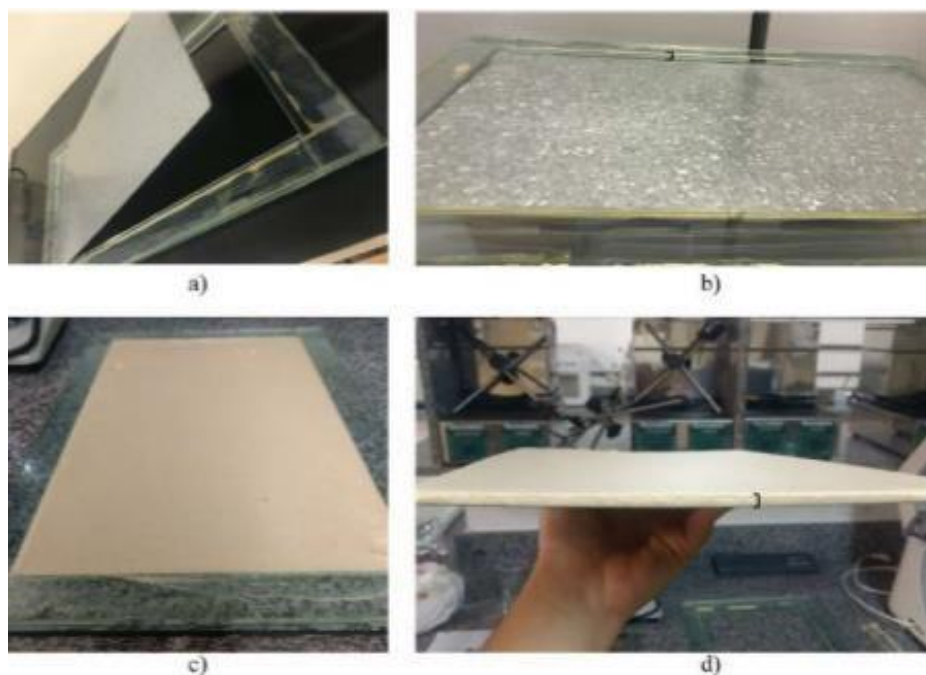
C- Concentração do espumante; tag= Tempo de agitação; T- Temperatura de secagem

3.4.1 Ensaios de secagem em camada de espuma

A espuma obtida em cada experimento foi disposta em um sistema desenvolvido por Negreiros (2019), que consiste em uma bandeja de zinco galvanizado sem bordas, com 1 mm de espessura, inserida em um fundo removível que mantém a espessura da camada de espuma fixa em 5 mm de maneira uniforme. O sistema está ilustrado na Figura 3.10.

A redução do teor de água foi determinada por pesagens da amostra em balança semi-analítica, em intervalos de tempos regulares. Inicialmente, pesou-se de 5 em 5 minutos durante os primeiros 30 minutos, período que corresponde a fase de adaptação da espuma. Após isso, passou-se a contabilizar 10 minutos entre as pesagens, até alcançar uma estabilidade na redução de umidade, passando assim para 30 minutos de intervalo. Por fim, os períodos seriam de 60 minutos até obter-se a massa constante.

Figura 3.10 - Sistema utilizado para o processo de secagem: a) bandeja de zinco e fundo removível; b) espessura do fundo; c) espuma disposta na bandeja; d) espessura da camada de espuma.



Fonte: Negreiros (2019)

Figura 3.11 Espuma da biomassa da levedura *Rhodotorula glutinis*



O material seco foi removido das bandejas com auxílio de espátulas, pesado e posteriormente acondicionado em sacos herméticos de polietileno onde permaneceram fechados até a realização das análises do pó.

3.4.2 Cinética e ajustes matemáticos

Para a obtenção da curva de cinética de secagem, foi necessário encontrar a razão de umidade (RU), variável adimensional que pode ser calculada a partir dos dados obtidos durante o processo de secagem, como mostrada na Equação 3.6. Com o cálculo dos valores, foi possível plotar o gráfico da curva de cinética (RU *versus* tempo de secagem) para observar o comportamento do processo.

$$RU = \frac{x_{bs}}{X_{bs0}} \quad (3.6)$$

Onde:

X_{bs} = umidade em base seca;

X_{bs0} = umidade em base seca inicial.

A umidade em base seca pode ser determinada pela razão entre a água eliminada no processo e a massa de sólidos secos presente na amostra, observada na Equação 3.7.

$$x_{bs} = \frac{(m_i - m_f)}{m_{ss}} \quad (3.7)$$

Onde:

m_i = massa inicial da amostra (g);

m_f = massa final (g);

m_{ss} = massa de sólidos secos da amostra (g)

3.4.3 Análise estatística

Para os cálculos dos efeitos principais, bem como das interações das variáveis independentes do processo sobre as variáveis dependentes (tempo de secagem e umidade final do equilíbrio) foi utilizado o programa STATISTICA 7.0.

Utilizou-se o programa também para analisar a influência das variáveis independentes sobre as características físico-química do pó obtido.

3.4.4 Ajustes matemáticos

Para o ajuste das curvas de secagem foi utilizado os dados experimentais e as equações dos modelos matemáticos apresentados na Tabela 3.6. Foram realizadas análises de regressão não linear, pelo método de Gauss-Newton, para conjuntos de experimentos em diferentes temperaturas utilizando o programa STATISTICA 7.0.

Tabela 3.6 Modelos matemáticos utilizados para descrever o processo de secagem.

Modelo	Representação matemática
--------	--------------------------

Newton	$RU = \exp(-k.t)$
Logaritmo	$RU = a.\exp(-k.t) + b$
Dois termos	$RU = a.\exp(-k.t) + b.\exp(-k_1.t)$
Aproximação de Difusão	$RU = a.\exp(-k.t) + (1-a)\exp(-k.b.t)$
Page	$RU = \exp(-k.t)^n$

3.5 CARACTERIZAÇÃO DO PÓ OBTIDO

3.5.1 Rendimento teórico

O rendimento foi calculado pela razão entre a quantidade de pó obtido no final do processo de secagem e a quantidade de espuma inicialmente utilizada, como mostrado na Equação 3.8. As massas de pó e espuma foram obtidas por pesagem em balança semi-analítica.

$$\text{Rendimento (\%)} = \frac{m_{\text{pó}}}{m_{\text{espuma}}} \cdot 100\% \quad (3.8)$$

Onde:

$m_{\text{pó}}$ = massa de pó obtido no final da secagem (g);

m_{espuma} = massa de espuma inicial (g);

3.5.2 Solubilidade

A análise foi realizada em temperatura ambiente (25 ± 1 °C), com base nas modificações propostas por Cano-Chauca et al. (2005) no método de Eastman e Moore (1984). A metodologia consiste na diluição de 1 g de pó pela adição de 50 mL de água destilada sob agitação e homogeneização em vortex modelo AP 56 da marca Phoenix Luferco e motor de 3800 rpm. A solução foi centrifugada em uma centrífuga da marca Novatecnica por 5 minutos a uma velocidade de 4500 rpm. Do sobrenadante foram retirados 12,5 mL e adicionados em placa de Petri, previamente tarada, para serem colocadas em estufa a 105 °C até total evaporação do líquido. Realizada em triplicata, a porcentagem de solubilidade em água foi obtida pela Equação 3.9.

$$\text{Solubilidade(\%)} = \frac{(m_{(\text{residual})} - m_{(\text{tara})})V_{\text{solução}}}{V_{\text{alíquota}}m_{\text{inicial}}} \quad (3.9)$$

Onde:

$m_{residual}$ = massa do sistema após a evaporação (g);

m_{tara} = massa da placa de Petri vazia (g);

$m_{inicial}$ = massa inicial de pó que foi diluído (g);

$V_{solução}$ = volume total da solução (mL);

$V_{aliquota}$ = volume de sobrenadante adicionados à placa.

3.5.3 Atividade de água

A atividade de água foi realizada logo após a secagem através do medidor específico, cujo o modelo do equipamento é Novasina Lab Master-aw. As análises foram feitas em triplicata para todos os experimentos, pesando-se 0,5 g da amostra à temperatura de 30 °C.

3.5.4 Ácido ascórbico

Determinou-se o ácido ascórbico segundo o método da AOAC (1997), modificado por BENASSI e ANTUNES (1988). Nesta metodologia, o ácido oxálico é usado como solução extratora e se baseia na titulação da amostra com 2,6 diclorofenolindofenol sódio, que apresenta cor rosa em solução ácida e cor azul em solução alcalina. Os resultados foram expressos em mg de ácido ascórbico/100 g da amostra.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS E VARIÁVEIS OPERACIONAIS

Nos testes preliminares foi possível observar que a utilização de emulsificantes industriais não favoreceu a formação de uma espuma adequada. Foram utilizadas diversas concentrações, bem como diferentes tempos de agitação, o resultado obtido foi insatisfatório. Ao utilizar a albumina foi verificada maior aeração que os demais utilizados, mas mesmo assim, o resultado desejado não foi obtido.

Ao testar o juá, em diferentes concentrações, foi obtida uma espuma satisfatória e aerada para o processo em camada de espuma. Na Tabela 4.1 estão apresentados os testes para formação de espuma, bem como os agentes espumantes e os tempos de agitação utilizados.

Tabela 4.1- Resultados obtidos para os testes de formação da espuma

Teste	Agente Espumante	Concentração (%)	Tempo de agitação (min)	Resultado
1	CMC	5	4	Negativo
2	CMC	7	4	Negativo
3	Porto gel®	5	4	Negativo
4	Porto gel®	7	4	Negativo
5	Porto gel®	10	6	Negativo
6	Albumina	7	4	Positivo**
7	Albumina	10	6	Negativo
8	Emustab®	5	4	Negativo
9	Emustab®	10	6	Negativo
10	Juá	4	4	Negativo
11	Juá	5	4	Positivo**
12	Juá	10	4	Positivo***
13	Juá	10	6	Positivo***
14	Juá	15	6	Positivo***
15	Juá	20	6	Positivo***

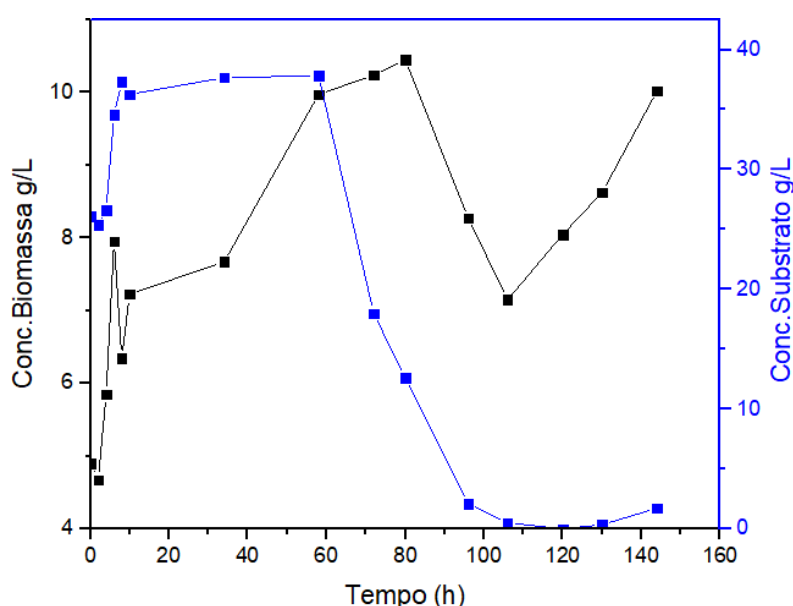
Negativo = não ocorreu a formação da espuma Positivo**= formação de espuma instável; Positivo***= formação de espuma adequada

Com os resultados, observou-se que para a aplicação do método de secagem em camada de espuma seria necessário fazer os ensaios nas melhores condições para a formação da espuma, 10%, 15% e 20% de juá em relação á matéria-prima.

4.2 CULTIVO

Para o estudo do crescimento da biomassa foi realizada uma cinética microbiana de 144 horas, de modo a definir as melhores condições de cultivo. Sendo assim, foram efetuadas as análises de concentração de células (biomassa) e açúcares redutores (AR). Cujas curvas são apresentadas na Figura 4.1.

Figura 4.1- Perfis de crescimento celular e consumo de substrato para a *Rhodotorula glutinis* utilizando melão de cana-de-açúcar como fonte de carbono.



Como observado na Figura 4.1 a fase inicial de crescimento da levedura ocorreu 4 h após o início da fermentação, sendo o ponto máximo correspondente ao tempo de 80 horas, com biomassa produzida equivalente a $10,45 \text{ g.L}^{-1}$. Foi verificado uma pequena fase estacionária, durando poucas horas, seguida da fase de declínio acentuada e ao final um pico de crescimento correspondente a biomassa produzida de $10,05 \text{ g.L}^{-1}$. Ao final do processo fermentativo o °Brix do substrato correspondeu a 4,16.

Em relação ao consumo de açúcares, a concentração de células no tempo 0 (zero) no fermentador foi de $26,09 \text{ g.L}^{-1}$. No início da fermentação é perceptível um aumento na concentração de açúcares, durante o período de adaptação do microrganismo ao meio, isto é devido a transformação de açúcares não redutores em açúcares redutores (AR) durante o período de adaptação do microrganismo.

O cultivo apresentou uma maior taxa de consumo de açúcar a partir de 48 horas do início do processo, correspondendo ao período de maior produção de biomassa. Desta forma o

maior uso da fonte de carbono foi responsável pela maior quantidade de biomassa produzida, assim como a menor taxa de consumo de açúcar originou uma menor produção de biomassa.

Barbosa (2017) aplicou um meio à base de manipueira para produção de biomassa de leveduras. A autora verificou uma produção máxima de biomassa pela *Rhodotorula glutinis* de 3,018 g.L⁻¹ em 72 h de fermentação, também notou-se uma faixa ótima de crescimento de 28 a 30 °C, faixa de temperatura que também foi observada neste trabalho.

Januário (2014) estudou diferentes fontes de carbono (glicerol, sacarose, frutose, melaço de cana e xarope de polpa de alfarroba) para produção de biomassa de leveduras *Rhodotorula glutinis*. Dentre os meios utilizados, o melaço de cana e o xarope de polpa de alfarroba foram os que obtiveram maior crescimento, 5,28 g.L⁻¹ e 5,35 g.L⁻¹, respectivamente, em 48 horas de fermentação.

Andrade (2010) estudou o desenvolvimento e a produtividade lipídica da levedura *Rhodotorula glutinis* NCYC 921, foram utilizados glucose e glicerol como fonte de carbono em diferentes razões carbono/nitrogênio. A fermentação foi realizada em um biorreator, alcançou-se uma concentração máxima de biomassa de 4,1 g.L⁻¹ (em 16 horas) para o meio com limitação de nitrogênio e 4,5 g.L⁻¹ (13,75 h) com limitação de carbono.

Dessa forma foi observado que o uso do melaço suplementado com nutrientes possibilitou uma boa produção da biomassa *Rhodotorula glutinis*, quando comparado com os trabalhos supracitados. Os parâmetros para produção de biomassa foram definidos como: 80 horas de fermentação, temperatura de 28 °C e pH de 5 a 6. Foram realizados 12 ensaios de fermentação, com rendimento médio de 60 gramas de biomassa úmida.

Tabela 4.2- Resultados da cinética microbiana para a Produtividade da Biomassa

X (g.L ⁻¹)	Xf (g.L ⁻¹)	Tf (h)	Px (g.L ⁻¹ .h)	μ _{máx} (h ⁻¹)	Tg (h)
4,9	10,45	80	0,069375	0,1327	0,000522

Na Figura 4.1 observa-se uma fase exponencial no período de 2 as 6 horas que corresponde a uma velocidade específica de crescimento máxima (μ_{máx}) de 0,1327 h⁻¹ com R² = 0,992. Para a produtividade da biomassa foi obtido 0,069375 g.L⁻¹.h em um período de 80 horas de fermentação. No estudo desenvolvido por Andrade (2010) foi obtido uma taxa específica de crescimento (μ) de 0,34 h⁻¹, para a produtividade foi obtido 0,25 g.L⁻¹.h⁻¹ (13 h).

4.3 CARACTERIZAÇÃO DA ESPUMA

Tendo em vista que não se tem registros na literatura acerca de trabalhos com secagem em camada de espuma para biomassa da levedura *Rhodotorula glutinis*, fazendo deste trabalho inédito, os dados obtidos não puderam ser comparados com outros materiais secos em camada de espuma.

Na caracterização física da espuma, faz-se necessário a análise das variáveis do estudo e suas interferências nas propriedades e características da espuma, como densidade, estabilidade, incorporação de ar e expansão, pois a partir destas análises é possível garantir a aplicação viável e a eficiência no processo de secagem. As análises foram realizadas para os pontos de máximo, mínimo e central do planejamento experimental.

4.3.1 Estabilidade

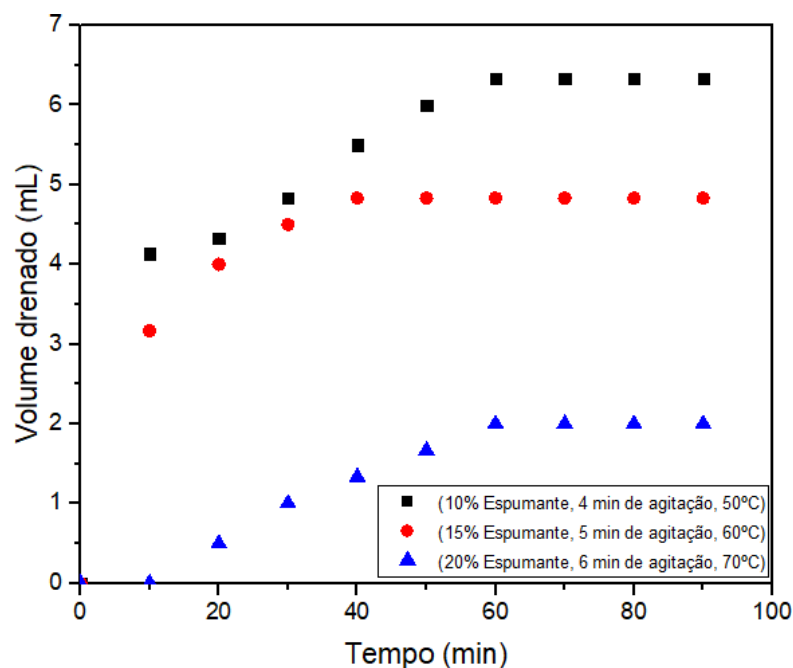
A estabilidade da espuma é de fundamental importância para o sucesso da operação de secagem em camada de espuma, bem como para a qualidade do produto final, tendo relação diretamente proporcional à adição de agentes de estabilização de espumas (CRUZ, 2013).

As espumas são sistemas termodinamicamente instáveis e por isso, além da capacidade de incorporação de ar, é importante avaliar sua estabilidade, ou seja, sua habilidade de resistir à perda de bolhas de ar (LAU e DICKINSON, 2004).

A estabilidade é influenciada pela densidade, espessura e permeabilidade da interface líquido-agente espumante, pela distribuição do tamanho das bolhas de ar e pela tensão superficial, porém a natureza e concentração do agente utilizado é um dos principais fatores que alteram esta propriedade (KANDASAMY et al., 2012).

A análise foi realizada para as condições extremas do planejamento experimental (ponto de máximo, mínimo e central). O comportamento da estabilidade foi avaliado por 90 minutos, como observado na Figura 4.2.

Figura 4.2- Resultados do teste de estabilidade para os níveis máximo, mínimo e central do planejamento experimental fatorial completo.



Sabendo que a estabilidade da espuma é inversamente proporcional ao volume de líquido drenado, na Figura 4.2, para o ponto máximo do estudo, Exp 8 (20% de espuma; 6 minutos de agitação; 70 °C), houve um desprendimento de líquido a partir dos 20 minutos, sendo seu volume máximo de 2 mL de líquido drenado aos 70 minutos e se manteve constante até o final do tempo de análise.

Para as condições centrais do estudo, Exp 9 (15% de espuma; 5 minutos de agitação; 60 °C), foi observado uma drenagem de aproximadamente 4,5 mL de líquido. Para o nível mínimo do estudo, Exp 1 (10% de espuma; 4 minutos de agitação; 50 °C), o volume drenado foi o maior dentre os três apresentados, obteve 6,5 mL.

De maneira geral, considera-se o resultado de estabilidade da espuma da biomassa da levedura *Rhodotorula glutinis* satisfatório, visto que o maior volume drenado foi de 6,5 mL, nas condições mínimas de produção da espuma e temperatura.

4.3.2 Densidade e Percentual de expansão

Para a secagem em camada de espuma, a densidade é um dos principais parâmetros que devem ser avaliados em razão desta propriedade estar relacionada com formação de uma espuma estável (MELO, 2013). O percentual de expansão também é uma propriedade de suma importância, pois, indica o tamanho da área para transferência de calor e massa, quanto maior

a área, maiores serão as taxas de evaporação e menores os tempos de secagem (GURGEL, 2014).

A análise foi realizada à temperatura ambiente (25 °C), para os pontos máximo, mínimo e central do planejamento experimental. Os valores das densidades e dos percentuais de expansão das espumas são verificados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Valores das densidades e dos percentuais de expansão das espumas para as condições mínimas, centrais e máximas do planejamento experimental.

Condições	Densidade (g/mL)	Percentual de Expansão (%)
10 % e 4 min (-1)	0,109 ± 0,05	827,8 ± 42,5
15% e 5 min (0)	0,105 ± 0,052	861,7 ± 23,7
20% e 6 min (1)	0,072 ± 0,04	1306 ± 39,05

Os maiores valores para a densidade correspondem ao nível mínimo do estudo (10% de espumante; 4 minutos de agitação), e o menor valor corresponde ao ponto máximo do planejamento (20% de espumante; 6 minutos de agitação).

Cruz (2013) afirma que a redução na densidade das espumas ocorre devido à incorporação de ar durante a etapa de agitação, uma vez que a alta velocidade de agitação promove um aumento na taxa de cisalhamento, favorecendo a divisão das bolhas de ar, resultando na incorporação de maior quantidade de gás à mistura e, portanto, na diminuição da densidade da espuma.

Ao analisar a expansão da espuma, verificou-se que a maior expansão ocorreu para a amostra com maior concentração de espumante e maior tempo de agitação, e o menor valor corresponde à amostra com menor concentração de espumante e menor tempo de agitação, 1306 % e 827,8 %, respectivamente.

No processo de secagem em camada de espuma tem-se por objetivo encontrar o tempo de batimento da espuma, o que segundo RAJKUMAR et al. (2007) é obtido quando a espuma apresenta a maior expansão volumétrica e o menor valor de densidade, o que no caso deste trabalho, foi possível de ser obtido com o maior tempo de agitação do processo (6 minutos).

4.3.3 Capacidade de incorporação de ar -*Over run*

A capacidade de incorporação de ar é uma propriedade física da espuma que está relacionada com a quantidade de ar que pode ser incorporado durante a sua mudança de estrutura, que passa de líquida-viscosa para sua estrutura semissólida. Na Tabela 4.4 estão dispostos os valores correspondentes aos volumes antes e após a batidura, e a porcentagem de expansão do volume.

Tabela 4.4 – Incorporação de ar da espuma da biomassa da levedura *Rhodotorula glutinis* nas condições dos pontos fatoriais de máximo, de mínimo e do ponto central.

Condições	Volume Inicial (mL)	Volume final (mL)	Incorporação de ar (%)
10 % e 4 min	200	600	200
15% e 5 min	200	900	350
20% e 6 min	200	1200	500

De modo análogo às análises de densidade, percentual de expansão e estabilidade, para a incorporação de ar são avaliadas apenas a concentração de espumante juá e o tempo de agitação em batideira, visto que o experimento foi realizado à temperatura ambiente.

Analisando os valores, foi constatado que para as maiores concentrações do espumante e maiores tempo de agitação, maior é o percentual de incorporação de ar, pois a maior porcentagem foi obtida nas condições (20% e 6 min) e a menor em (10% e 4 min), 500 % e 200 %, respectivamente.

4.4 SECAGEM EM CAMADA DE ESPUMA

4.4.1 Análise estatística dos resultados da secagem

Na Tabela 4.5 são apresentados os resultados finais, obtidos após a secagem em camada de espuma da biomassa da levedura *Rhodotorula glutinis*, de umidade final em base seca (Xbs) e tempo final de secagem. As análises desses resultados serão discutidas nas próximas seções.

Tabela 4.5 - Resultados finais da secagem em camada de espuma da biomassa da levedura *R. glutinis*.

Nº Exp	Variáveis independentes			Variáveis dependentes	
	C (%)	t _{tag} (min)	T (°C)	t _{secagem} (min)	X (b.s)
1	10(-1)	4 (-1)	50 (-1)	120	0,014
2	20(1)	4 (-1)	50 (-1)	160	0,039
3	10 (-1)	6 (1)	50 (-1)	180	0,050
4	20 (1)	6 (1)	50 (-1)	180	0,061
5	10 (-1)	4 (-1)	70 (1)	100	0,041
6	20 (1)	4 (-1)	70 (1)	100	0,013
7	10 (-1)	6 (1)	70 (1)	100	0,171
8	20 (1)	6 (1)	70 (1)	130	0,046
9	15 (0)	5 (0)	60 (0)	140	0,041
10	15 (0)	5 (0)	60 (0)	130	0,019
11	15 (0)	5 (0)	60 (0)	120	0,024

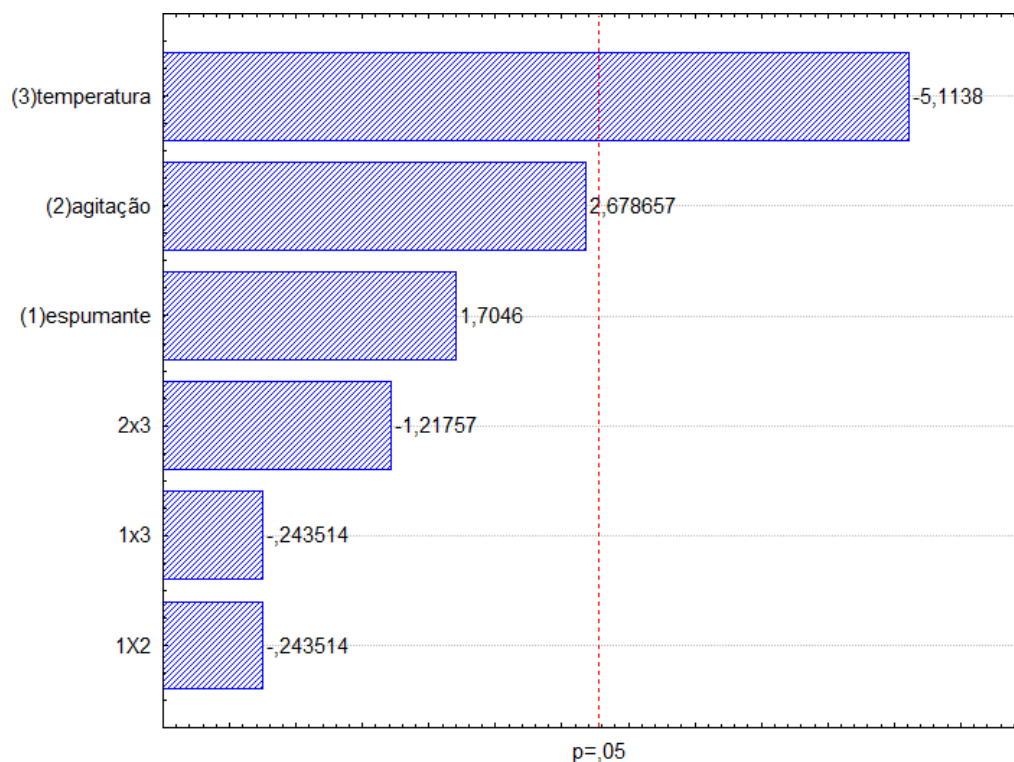
C – concentração; tag – tempo de agitação; T – temperatura;; Tsecagem – tempo de secagem; Xbs – teor de umidade em base seca

Para o processo de secagem faz-se necessário a avaliação da influência das variáveis independentes, que são a concentração do espumante (%), temperatura de secagem (°C) e tempo de agitação (min) sobre as variáveis dependentes (tempo de secagem e umidade de equilíbrio).

Tempo de secagem

Na Figura 4.3 é possível visualizar o diagrama de Pareto para a resposta tempo de secagem.

Figura 4.3 - Diagrama de Pareto para o tempo de secagem da biomassa da levedura *Rhodotorula glutinis*.



Pela Figura 4.3 foi possível verificar que apenas a variável independente temperatura de secagem foi significativa para o processo. Pode-se também observar que a temperatura exerce uma influência negativa sobre a variável resposta, desse modo quanto maior a temperatura, menor será o tempo de secagem.

A partir da análise estatística foi possível gerar um modelo, por intermédio de regressão linear dos dados experimentais do processo, com a variável independente que foi estatisticamente significativa ($p < 0,05$). Esse modelo possuiu um coeficiente de determinação de 0,9043 ou percentagem de variação explicada de 90,43%, e pode ser representado pela Equação 4.1

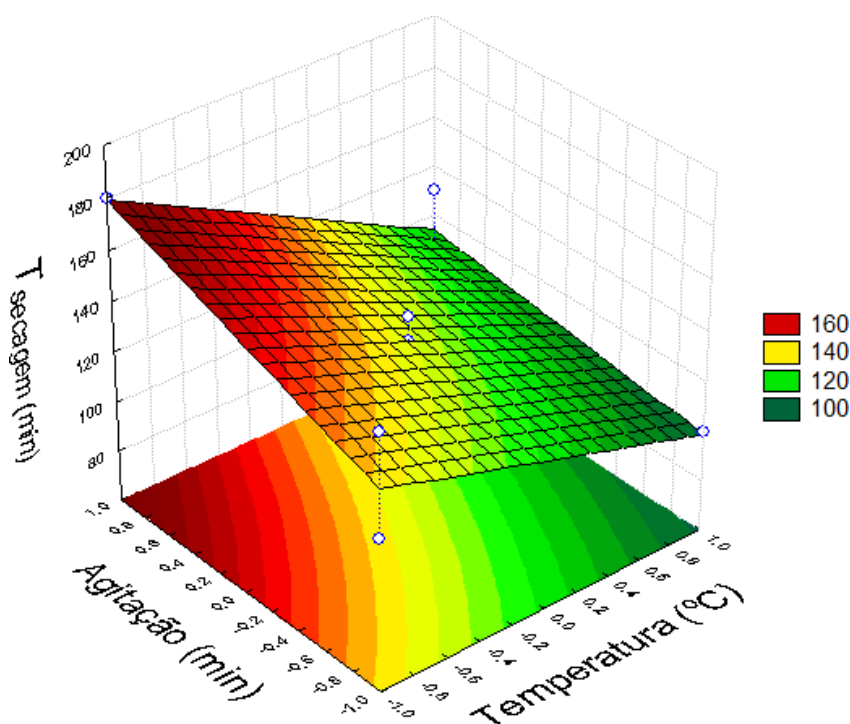
$$T_s = 132,7273 - 52,500T \quad (4.1)$$

Ao realizar a análise de variância (ANOVA) dos dados para a variável tempo de secagem (T_s) (APÊNDICE A) foi observado que, a nível de 95% de confiança, o modelo representado pela Equação 4.1 é estatisticamente significativo, já que através do Teste F constatou-se que o valor de $F_{\text{calculado}}$ é maior que o F_{tabelado} , $37,8320 > 4,46$, considerando o nível de confiança e os graus de liberdade da regressão e do resíduo. Ainda com base no Teste F, foi perceptível que o modelo não apresenta falta de ajuste, haja vista que pelo mesmo Teste F, onde é dessa vez considerado o nível de confiança e os graus de liberdade da falta de ajuste e do erro

puro, revelando que o valor de $F_{\text{calculado}}$ é menor que o F_{tabelado} , $1,07197 < 5,1$ o que caracteriza um modelo sem falta de ajuste a partir da ANOVA.

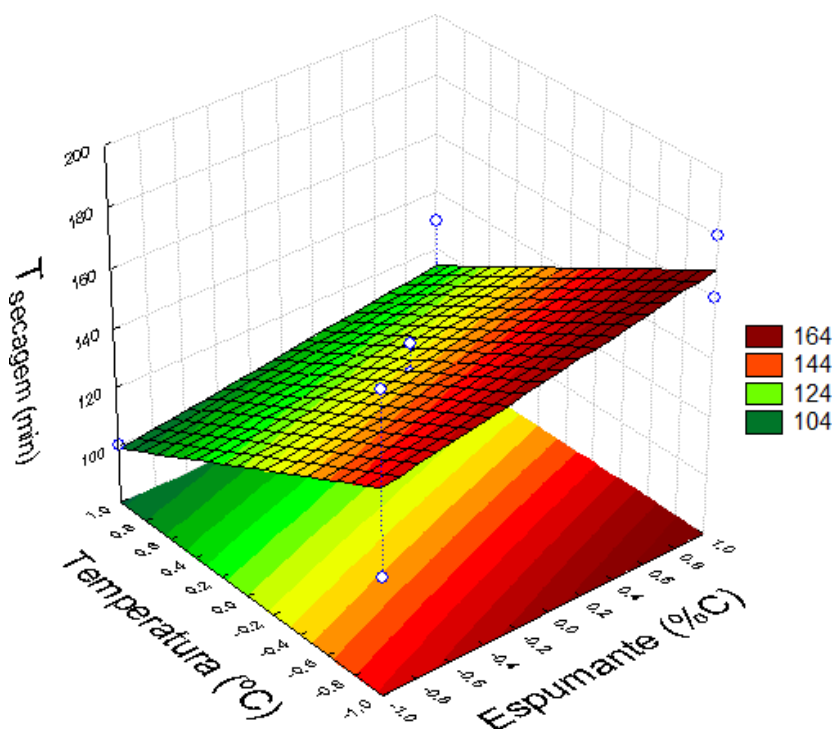
Nas Figuras 4.4, 4.5 e 4.6 são apresentadas as superfícies de respostas para o tempo final de secagem, onde para a análise uma das variáveis independentes do processo é mantida nas condições centrais do planejamento experimental.

Figura 4.4 - Superfície de resposta para a variável tempo de secagem, mantendo a concentração do espumante constante no nível central no planejamento experimental.



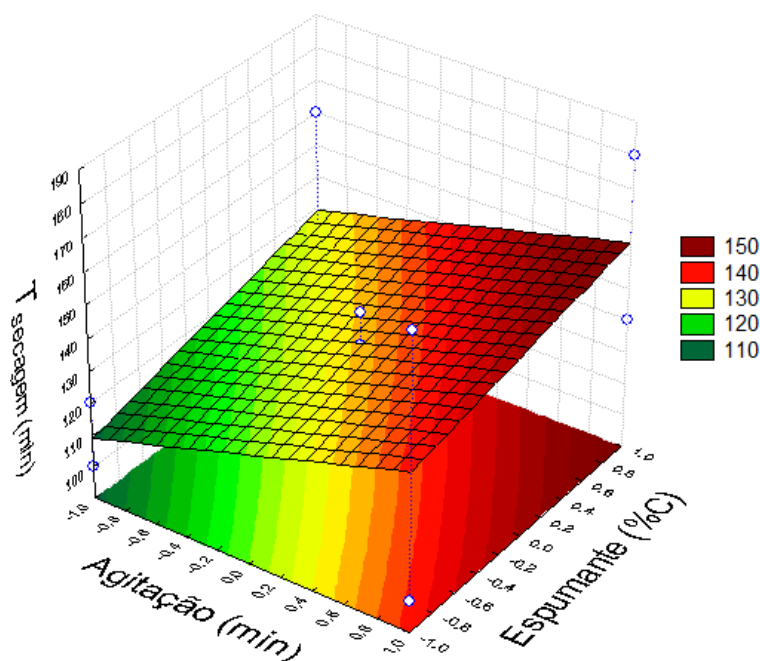
Na Figura 4.4, a superfície de resposta que compara as variáveis independentes do processo temperatura e tempo de agitação em relação à resposta tempo de secagem, foi verificado que a temperatura exerce maior influência, entretanto há uma correlação de ambas variáveis sobre a resposta. A partir da Tabela 4.5 foi observado que na combinação dos maiores níveis de temperatura e menores níveis de tempo de agitação são necessários menores tempos de secagem. De maneira similar, para os menores níveis de temperatura e maiores níveis de tempo de agitação, o tempo de secagem é mais elevado. Dessa forma, esse resultado confirma a análise do diagrama de Pareto (Figura 4.3), no qual a temperatura apresentou influência de sinal negativo, e o tempo de agitação que apesar de não significativa apresentou uma inclinação de sinal positivo sobre a resposta.

Figura 4.5 - Superfície de resposta para a variável tempo de secagem, mantendo o tempo de agitação constante no nível central do planejamento experimental.



Na Figura 4.5 foi observado que a variável independente do processo temperatura exerce influência significativa na resposta, de sinal negativo, indicando que quanto maior a temperatura menor o tempo de secagem. A concentração do agente espumante não apresentou influência significativa sobre a resposta, mantendo-se praticamente constante ao longo da faixa de trabalho. Dessa forma, é possível a aplicação dos seus níveis mínimos na operação de secagem sem interferências nos resultados.

Figura 4.6 - Superfície de resposta para a variável tempo de secagem, mantendo a temperatura constante no nível central do planejamento experimental.



A partir da Figura 4.6 foi possível observar a atuação da variável tempo de agitação na resposta tempo de secagem, enquanto que a concentração permaneceu constante. O tempo de agitação não apresentou influência significativa nesta análise, mas para os menores níveis há uma tendência em menores tempos de secagem. Portanto, é plausível realizar os ensaios de secagem nos seus valores mínimos.

A partir da análise das superfícies de resposta, ilustradas nas Figuras (4.4); (4.5) e (4.6), pode-se confirmar o resultado apresentado no diagrama de Pareto (Figura 4.3) que a variável temperatura foi a única que apresentou influência significativa para o tempo de secagem, e que os maiores níveis de temperatura são obtidos os menores tempos de secagem.

Umidade de equilíbrio

Com a análise estatística da influência das variáveis independentes sobre a umidade final da secagem foi verificado que nenhuma das variáveis, assim como suas interações, afetou a umidade de equilíbrio de forma estatisticamente significativa. Esse resultado pode ser observado no diagrama de Pareto (APÊNDICE B).

4.4.2 Cinética de secagem

As curvas da cinética de secagem da biomassa da levedura *Rhodotorula glutinis* são apresentadas nas Figuras 4.7, 4.8 e 4.9. Os dados estão dispostos na forma de umidade adimensional (X/X_0) em função do tempo de secagem (min) para as temperaturas definidas pelo planejamento experimental, de 50 °C, 70 °C e 60 °C.

Figura 4.7 - Curvas de secagem da espuma da biomassa da levedura *Rhodotorula glutinis* na temperatura de 50 °C.

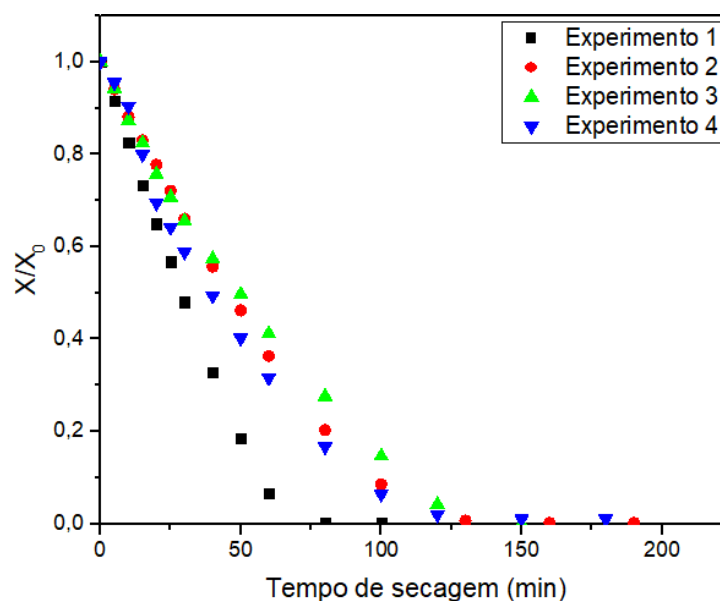


Figura 4.8 - Curvas de secagem da espuma da biomassa da levedura *Rhodotorula glutinis* na temperatura de 70 °C.

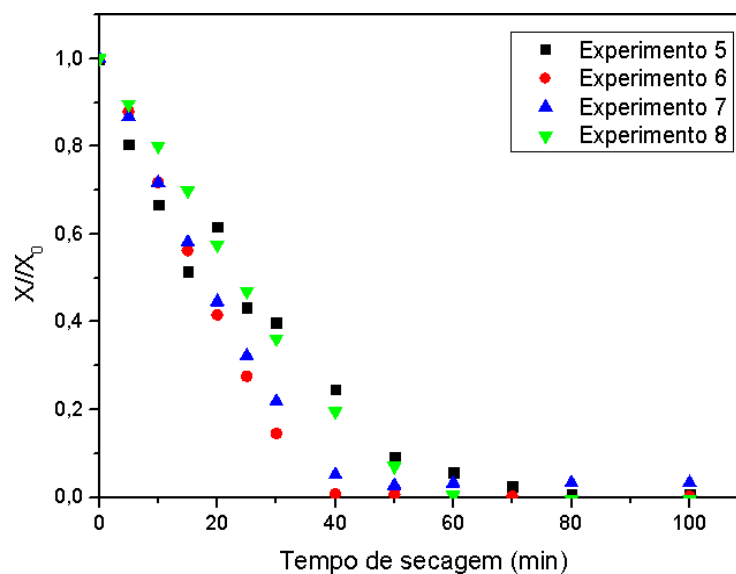
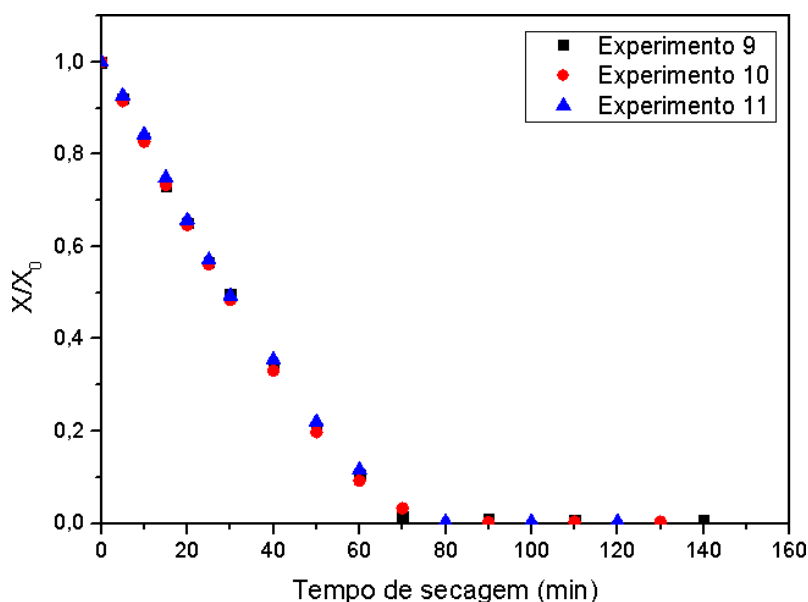


Figura 4.9 - Curvas de secagem da espuma da biomassa da levedura *Rhodotorula glutinis* na temperatura de 60 °C.



Conforme apresentado nas Figuras 4.7, 4.8 e 4.9, foi observado que a variação do tempo de secagem e comportamento entre os experimentos ocorreu de acordo com as temperaturas a que foram submetidas, ou seja, à medida que a temperatura aumenta o tempo de secagem diminui e as curvas adquirem uma inclinação maior, uma vez que há maior quantidade de calor transferido do ar para o material.

Os experimentos tiveram tempo mínimo de 100 min para os experimentos realizados a 70 °C, e tempo máximo de 180 min para os experimentos realizados a 50 °C.

Ainda analisando as curvas de secagem apresentadas foram observados os distintos períodos de secagem: taxa constante e decrescente. Foi observado também uma boa reprodutibilidade no comportamento da secagem para ponto central dos experimentos.

Nas Figuras 4.10, 4.11 e 4.12 são mostradas as curvas da taxa de secagem ($\text{g}/\text{cm}^2.\text{min}$) em função da umidade em base seca (X_{bs}), nas temperaturas de 50 °C, 70 °C e 60 °C, respectivamente, onde pode ser observada a confirmação dos longos períodos de taxa constante e dos curtos períodos de taxa decrescente da secagem

Figura 4.10 - Taxa de secagem em função da umidade em base seca para os experimentos com a temperatura de 50 °C.

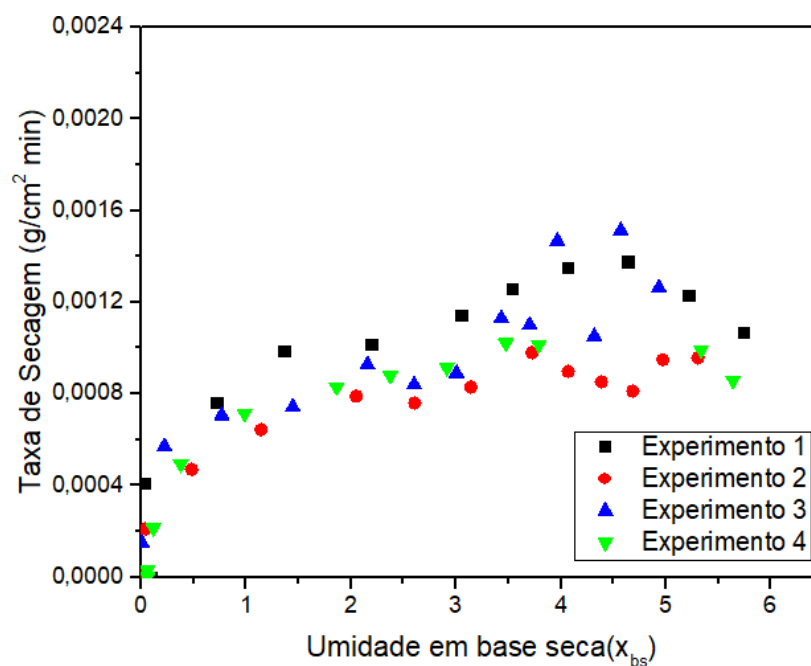


Figura 4.11- Taxa de secagem em função da umidade em base seca para os experimentos com a temperatura de 70 °C.

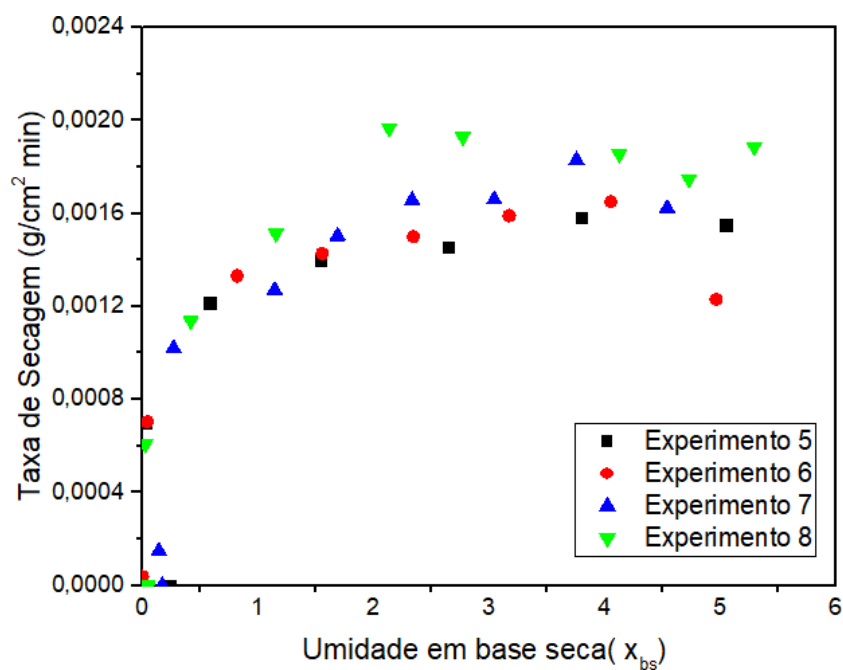
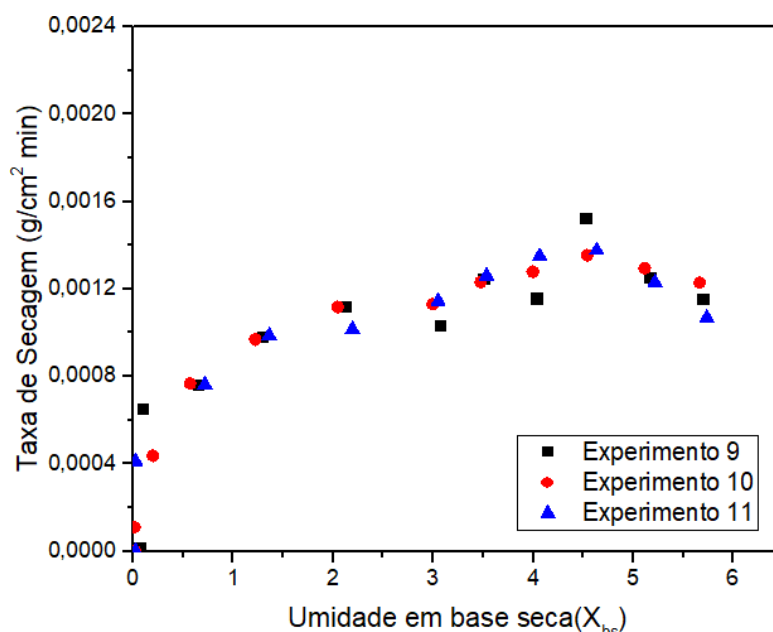


Figura 4.12 - Taxa de secagem em função da umidade em base seca para os experimentos com a temperatura de 60 °C.



Conforme apresentado nas Figuras 4.10, 4.11 e 4.12 foi observado que os maiores valores para as taxas de secagem foram encontrados na temperatura de 70 °C. Comportamento que comprova a influência da temperatura na velocidade de remoção da água do material.

4.4.3 Ajustes matemáticos

O ajuste dos modelos matemáticos aos dados experimentais da secagem da biomassa da levedura *Rhodotorula glutinis* foi realizado por regressão não-linear, pelo método Gauss-Newton, utilizando o programa STATISTICA 7.0.

A partir da análise estatística foi possível observar se o modelo apresenta coeficientes estatisticamente significativos, como também verificar se o ajuste foi satisfatório, através do coeficiente de determinação (R^2) e do erro padrão da estimativa (S), onde os modelos deverão ter seu coeficiente de determinação (R^2) alto e o mais próximo de um (1,0) e o valor do erro padrão da estimativa (S) deve ser o mais baixo e mais próximo de zero. Os resultados dos ajustes são apresentados para as diferentes faixas de temperaturas do estudo e apenas para os modelos não-lineares que apresentaram parâmetros significativos.

Os resultados dos modelos não-lineares bem como seus parâmetros para a temperatura de 50 °C, ajustados aos dados experimentais da secagem da biomassa da levedura *Rhodothorula glutinis* são apresentados na Tabela 4.5.

Tabela 4.5- Resultado do ajuste dos modelos estudados para os ensaios de secagem na temperatura de 50 °C.

Modelo	Parâmetros dos modelos matemáticos					
	k	k ₁	a	b	R ²	S
Newton	0,019294	-	-	-	0,968821	0,366885
Logaritmo	0,017701	-	1,14397	-0,09078	0,975802	0,285751
Dois termos	7	0,021795	-0,0941	1,094099	0,973621	0,311165

Como pode ser observado na Tabela 4.5 todos os modelos se ajustaram aos dados experimentais da secagem, com exceção dos modelos Page e Aproximação de Difusão, que foram descartados do estudo por não apresentarem coeficientes estatisticamente significativos.

Ainda de acordo com a Tabela 4.5, os modelos que apresentaram melhor ajuste foram os modelos de Logaritmo e Dois termos, pois têm maiores coeficientes de determinação e menores valores de erro padrão da estimativa. As equações dos modelos matemáticos estão representadas na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 - Equações dos modelos ajustados a cinética de secagem para a temperatura de 50 °C

Modelo	Representação matemática ajustada
Newton	$RU = \exp(0,019294.t)$
Logaritmo	$RU = 1,14397 \exp(-0,017701.t) - 0,09078$
Dois termos	$RU = -0,0941 \exp(-7.t) + 1,094099 \exp(-0,021795.t)$

Os gráficos com os ajustes dos modelos que apresentaram o maior R² e menor S, Logaritmo e Dois termos e estão apresentados nas Figuras 4.13; 4.14 e 4.15

Figura 4.13- Ajuste para o modelo de Newton para a temperatura de 50 °C

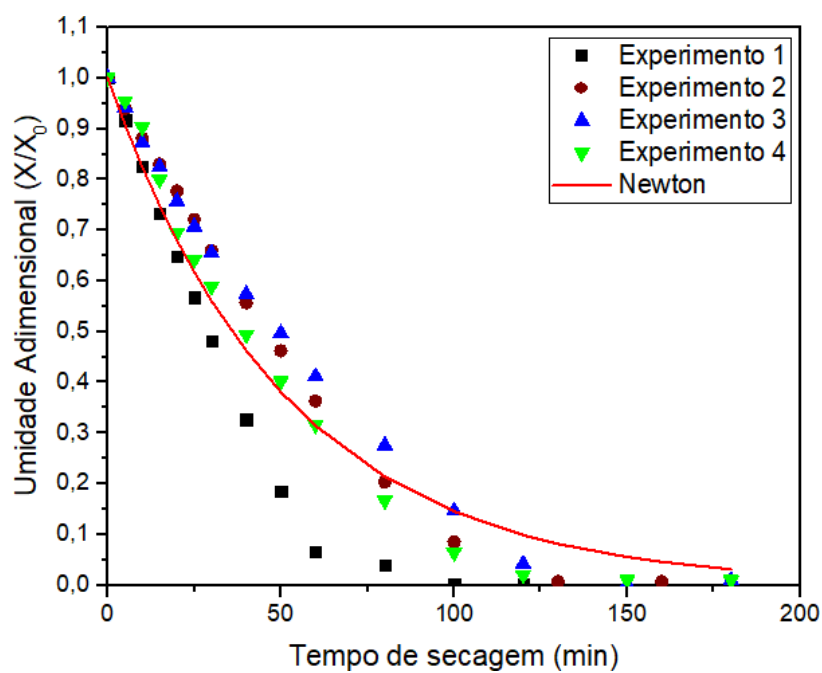


Figura 4.14- Ajuste para o modelo de Logaritmo para a temperatura de 50 °C

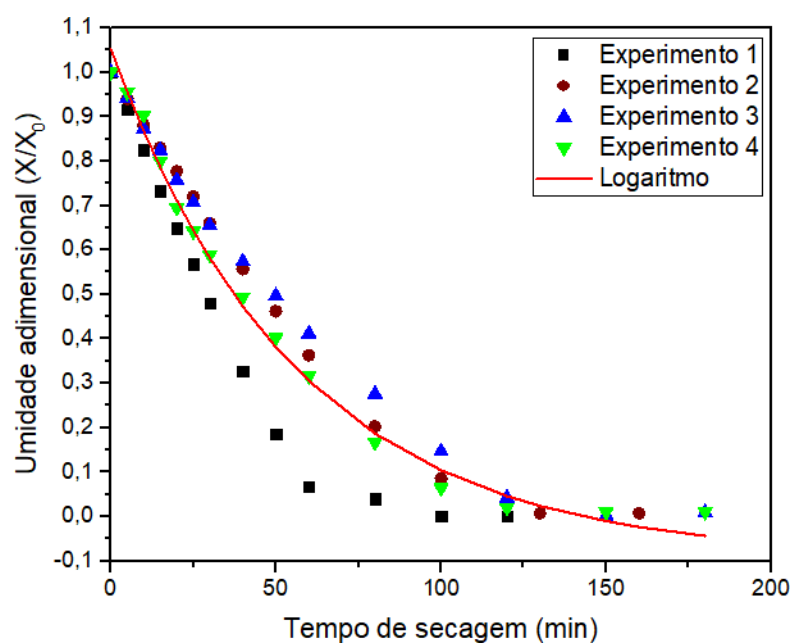
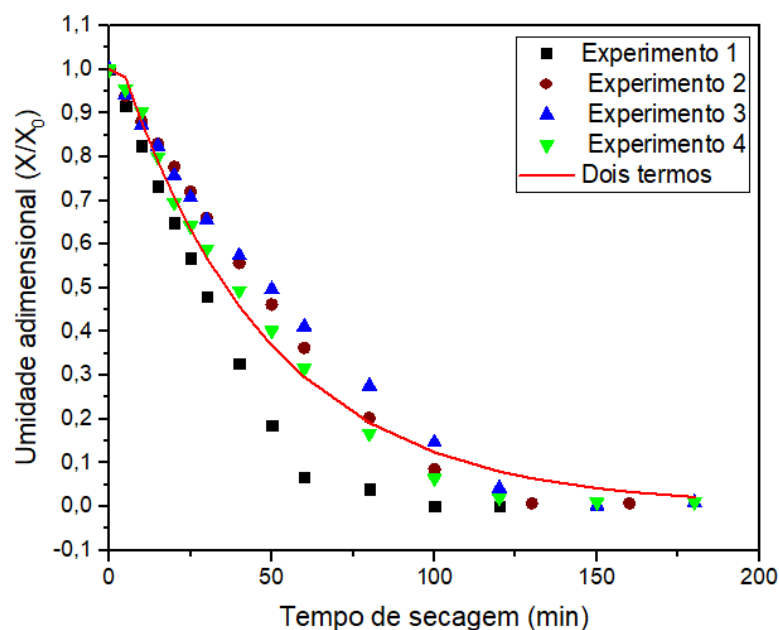


Figura 4.15- Ajuste para o modelo de Dois termos para a temperatura de 50 °C



Conforme apresentado em todas as curvas de secagem, o modelo de Logaritmo foi o que se ajustou melhor aos dados experimentais, pois, dentre os modelos foi o que teve maior coeficiente de determinação ($R^2=0,975802$) e menor erro padrão da estimativa ($S= 0,285751$), sendo assim, representou melhor o processo de secagem em camada de espuma da biomassa da levedura *Rhodotorula glutinis* na temperatura de 50 °C.

A partir dos modelos Newton e Dois termos também foram obtidos resultados razoáveis, com valores de R^2 de 0,9689 e 0,973621, respectivamente, porém apresentaram maiores valores de erro padrão da estimativa, fato que pode ser observado nas curvas a partir dos 100 min, caracterizado pela falta de ajuste nessa faixa de tempo de secagem.

Os resultados dos modelos não-lineares bem como seus parâmetros para a temperatura de 60 °C, ajustados aos dados experimentais da secagem da biomassa da levedura *Rhodothorula glutinis* são apresentados na Tabela 4.7.

Tabela 4.7- Resultado do ajuste dos modelos estudados para os ensaios de secagem na temperatura de 60 °C.

Modelo	Parâmetros dos modelos matemáticos						
	k	k ₁	a	b	R ²	S	n
Newton	0,027119	-	-	-	0,98033	0,1739	-
Logaritmo	0,025243223	-	1,1881	-0,099	0,99259	0,06593	-
Dois termos	0,030994888	0,030992	0,68508	0,43615	0,98777	0,10852	-
Page	0,005382	-	-	-	0,99793	0,0185	0,45568

Como pode ser observado na Tabela 4.7 todos os modelos se ajustaram aos dados experimentais da secagem, com exceção do modelo de Aproximação de Difusão, que foi descartado do estudo por não apresentar coeficientes estatisticamente significativos. Os modelos de Page e Logaritmo apresentaram os maiores coeficientes de determinação (R²) e menores valores do erro padrão da estimativa (S), sendo, portanto, os modelos que melhor se ajustaram aos dados experimentais. Na Tabela 4.8 é possível observar as equações ajustadas do modelos que apresentaram os melhores ajustes

Tabela 4.8 - Equações dos modelos ajustados a cinética de secagem para a temperatura de 60 °C.

Modelo	Representação matemática ajustada
Newton	$RU = \exp(0,027119.t)$
Logaritmo	$RU = 1,1881 \exp(-0,025243223.t) - 0,099$
Dois termos	$RU = 0,68508 \exp(-0,0309948.t) + 0,43615 \exp(-0,0309948.t)$
Page	$RU = \exp(-0,005382.t)^{145568}$

Os gráficos com os ajustes dos modelos que apresentaram o maior R² e menor S, Logaritmo e Dois termos e são apresentados nas Figuras 4.16; 4.17; 4.18 e 4.19

Figura 4.16- Ajuste para o modelo de Newton para a temperatura de 60 °C

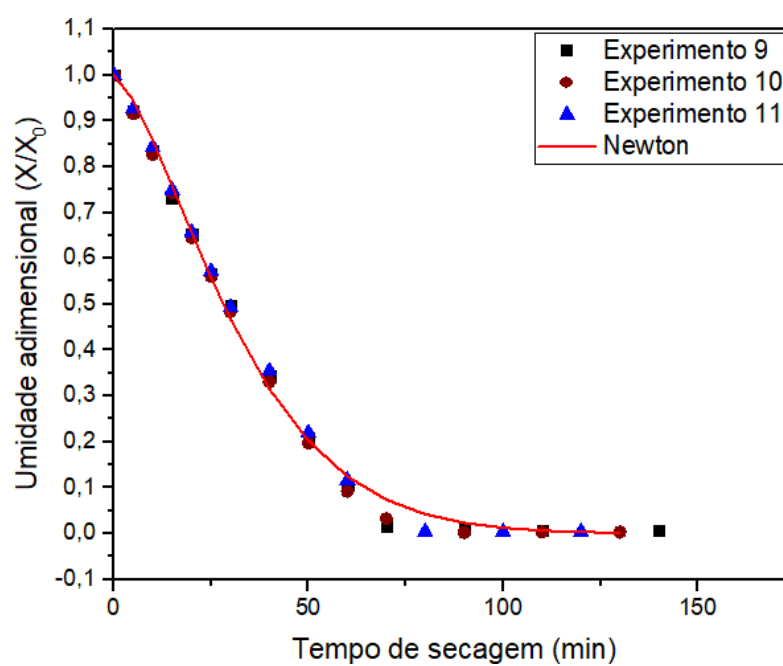


Figura 4.17- Ajuste para o modelo de Logaritmo para a temperatura de 60 °C

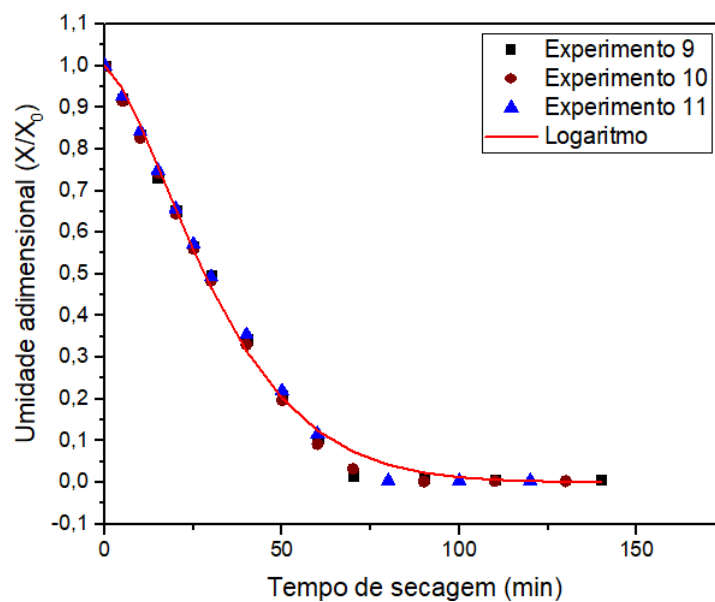


Figura 4.18- Ajuste para o modelo de Dois termos para a temperatura de 60 °C

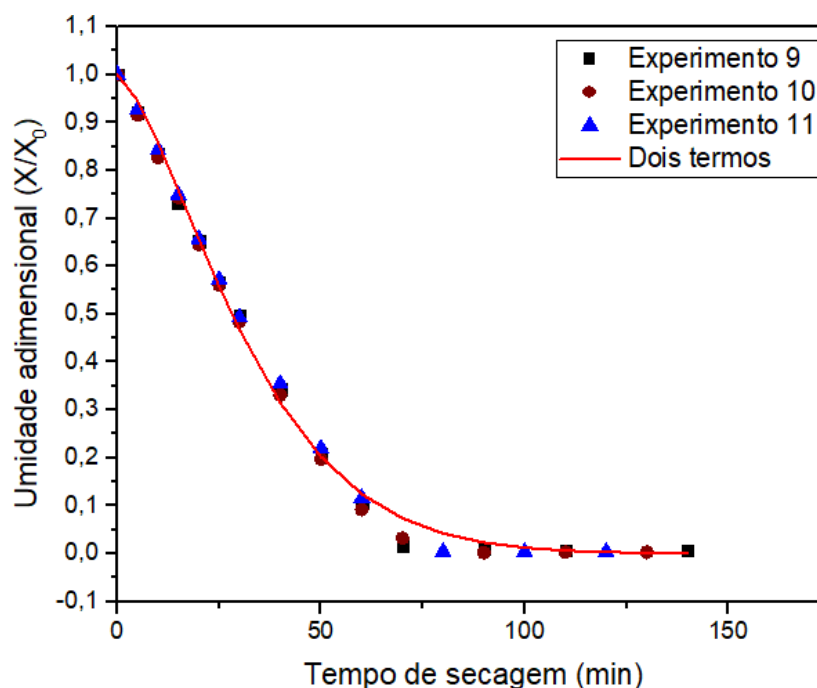
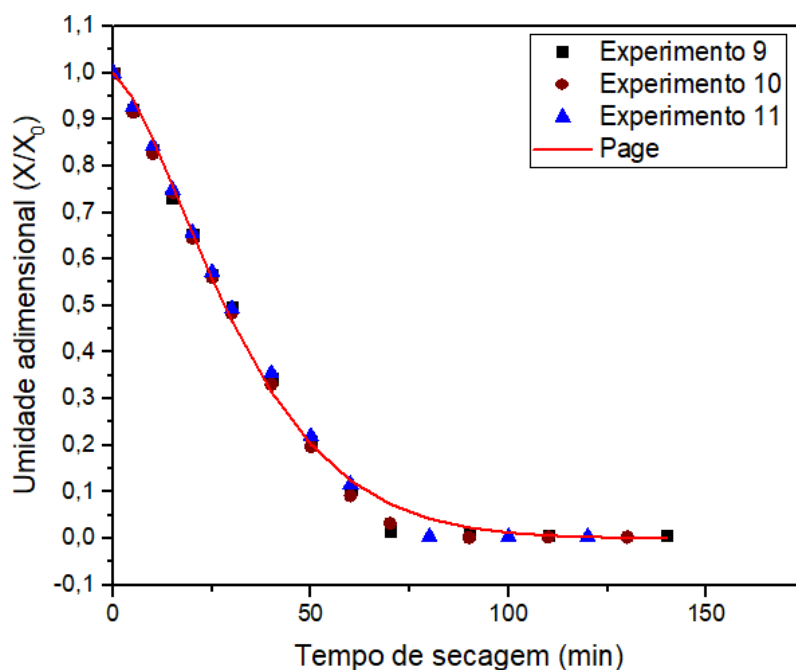


Figura 4.19- Ajuste para o modelo de Page para a temperatura de 60 °C



O comportamento observado em todas as curvas confirma que o modelo de Page foi o que melhor se ajustou aos dados experimentais, sendo assim o que melhor descreveu o processo de secagem do estudo na temperatura de 60 °C.

Os modelos de Newton, Logaritmo e Dois termos também apresentaram resultados adequados, porém tiveram maiores valores do erro padrão da estimativa, fato este que pode ser observado pela falta de ajuste na faixa de tempo correspondente ao período inicial da taxa decrescente.

Os resultados dos modelos não-lineares bem como seus parâmetros para a temperatura de 70°C, ajustados aos dados experimentais da secagem da biomassa da levedura *Rhodothorula glutinis* são apresentados na Tabela 4.9.

Tabela 4.9- Resultado do ajuste dos modelos estudados para os ensaios de secagem na temperatura de 70 °C.

Modelo	Parâmetros dos modelos matemáticos						
	k	k ₁	a	b	R ²	S	n
Newton	0,04072	-	-	-	0,9604	0,2885	-
Dois termos	7	0,04695	0,1415	1,145116	0,9659	0,2493	-
Page	0,01328	-	-	-	0,9785	0,1941	1,3437

Como pode ser observado na Tabela 4.9 todos os modelos se ajustaram aos dados experimentais da secagem, com exceção dos modelos de Logaritmo e Aproximação de Difusão, que foram descartados do estudo por não apresentarem coeficientes estatisticamente significativos.

Os modelos de Page, Dois termos e Newton foram os que melhor se ajustaram aos dados experimentais, pois, apresentaram os maiores coeficientes de determinação (R²) e menores valores do erro padrão da estimativa (S). Sendo os valores de R² de 0,9785, 0,9659 e 0,9604 e os de S de 0,1941, 0,2493 e 0,2885, respectivamente para os modelos de Page, Dois termos e Newton, sendo que o primeiro destes o modelo que apresentou o melhor ajuste.

As equações ajustadas dos modelos que apresentaram coeficientes estatisticamente significativos podem ser observadas na Tabela 4.10

Tabela 4.10 - Equações dos modelos ajustados a cinética de secagem para a temperatura de 70 °C

Modelo	Representação matemática ajustada
Newton	$RU = \exp(0,04072.t)$
Dois termos	$RU = -0,1415\exp(-7.t) + 1,14151\exp(-0,04695.t)$
Page	$RU = \exp(-0,01328.t)^{1,3437}$

Os gráficos com os ajustes dos modelos que apresentaram o maior R^2 e menor S, Logaritmo e Dois termos, são apresentados nas Figuras 4.20; 4.21 e 4.22

Figura 4.20- Ajuste para o modelo de Newton para a temperatura de 70 °C

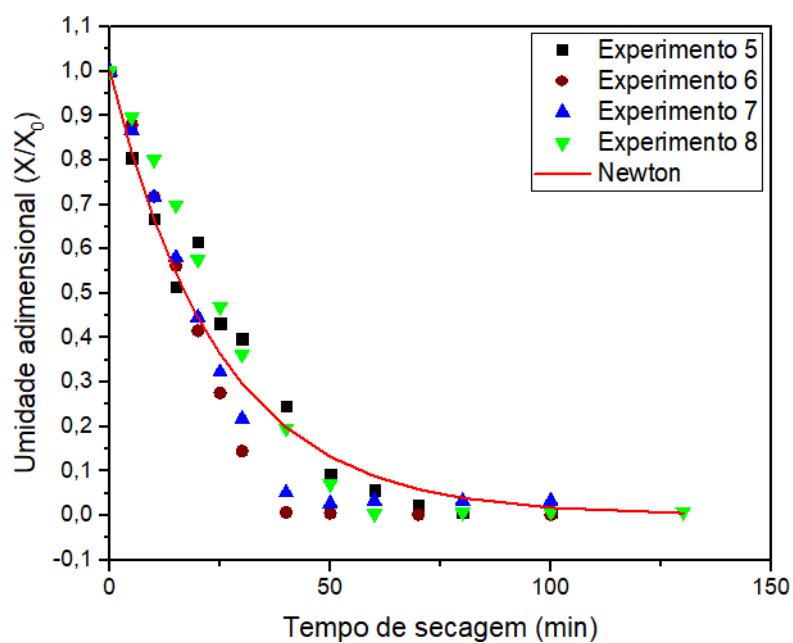


Figura 4.21- Ajuste para o modelo de Dois Termos para a temperatura de 70 °C

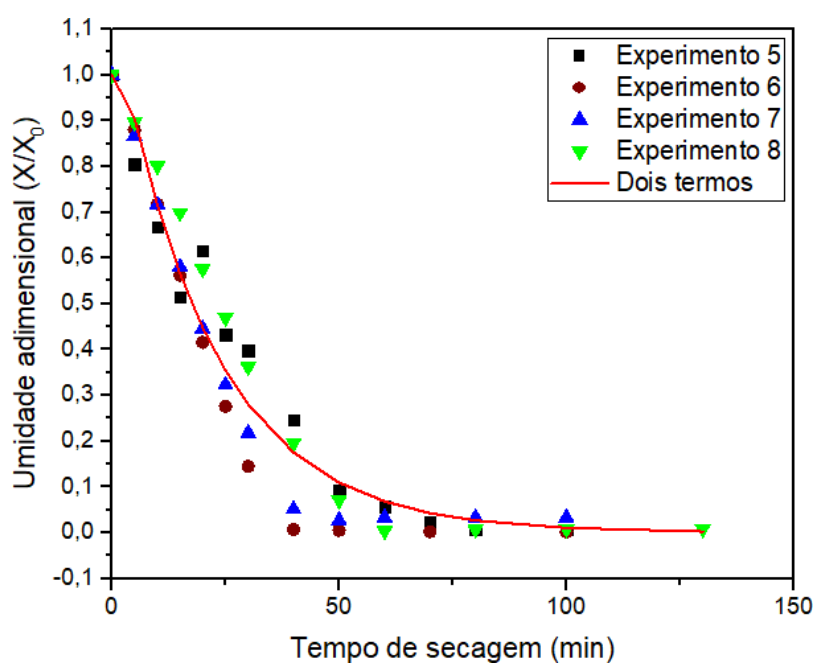
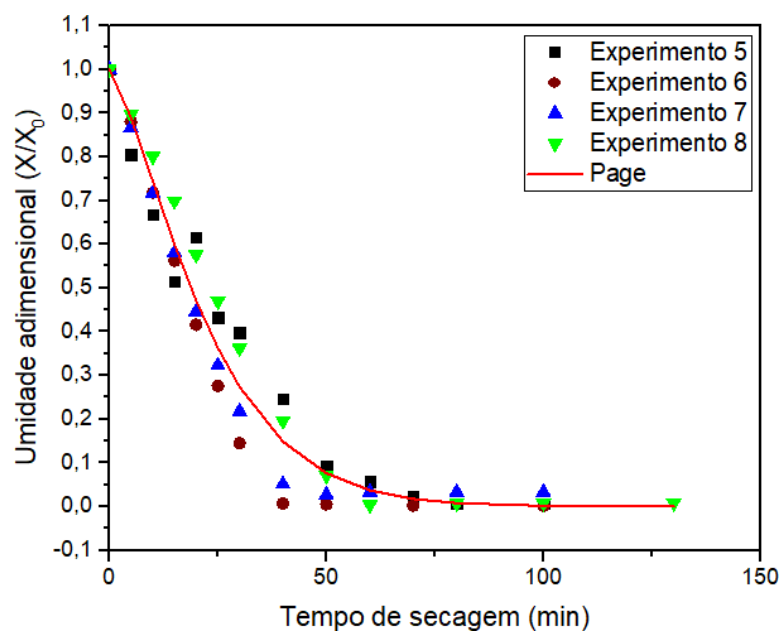


Figura 4.22- Ajuste para o modelo de Page para a temperatura de 70 °C



De maneira análoga, o comportamento das curvas confirma que o melhor ajuste foi obtido a partir do modelo de Page. Os ajustes para os modelos Newton e Dois termos

apresentaram maiores valores para o erro padrão da estimativa, fato que pode ser observado pela falta de ajuste nas curvas no período inicial da taxa decrescente.

4.5 CARACTERIZAÇÃO DO PÓ

4.5.1 Rendimento teórico

Na Tabela 4.11 é mostrado o rendimento percentual do pó para cada um dos ensaios do planejamento experimental fatorial utilizado na secagem.

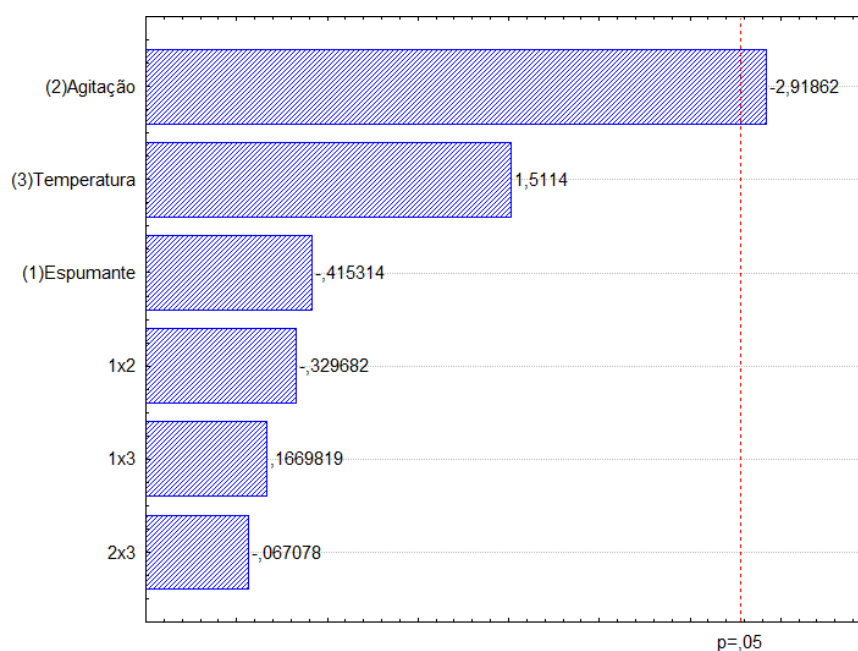
Tabela 4.11 - Resultados do rendimento teórico do pó da biomassa da levedura *Rhodotorula glutinis*

Experimento	Rendimento (%)
01(10%, 4 mim, 50°C)	29,73
02(20%, 4 mim, 50°C)	22,24
03(10%, 6 mim, 50°C)	14,29
04(20%, 6 mim, 50°C)	17,70
05(10%, 4 mim, 70°C)	28,07
06(20%, 4 mim, 70°C)	34,96
07(10%, 6 mim, 70°C)	25,37
08(20%, 6 mim, 70°C)	16,74
09(15%, 5 mim, 60°C)	24,31
10(15%, 5 mim, 60°C)	22,33
11(15%, 5 mim, 60°C)	20,46

A produção da biomassa da levedura *Rhodotorula glutinis* pela técnica de secagem em camada de espuma apresentou maior rendimento teórico no experimento 6 (20% de espumante; 4 minutos de agitação; 70 °C), e menor valor no experimento 3 (10% de espumante; 6 minutos de agitação; 50 °C). Seus valores foram 34,96% e 14,29 %, respectivamente.

Com a análise estatística foi observado que dentre as variáveis independentes do processo (tempo de agitação, temperatura e concentração do espumante), apenas o tempo de agitação influência de forma significativa o rendimento do pó, dentro de um nível de confiança de 95%.

Figura 4.23 - Diagrama de Pareto para a análise de rendimento teórico dos pós obtidos por secagem em camada de espuma.



De acordo com a Figura 4.23 foi verificado que o tempo de agitação afeta de forma significativa o rendimento teórico do pó da biomassa da levedura *Rhodotorula glutinis* dentro de um nível de confiança de 95%. Sendo essa influência de sinal negativo (-2,91673), indicando que com o aumento do tempo de agitação diminui o rendimento teórico do pó.

4.5.2 Solubilidade

A solubilidade possibilita verificar a capacidade do pó em se manter como uma mistura homogênea em água, isto é, a estabilidade da mistura composta por partículas dissolvidas no líquido (Franco, 2015). Na Tabela 4.12 são mostrados os valores médios de solubilidade (%) do pó para cada um dos ensaios do planejamento experimental fatorial utilizado na secagem.

Tabela 4.12 – Valores médios percentuais da solubilidade do pó da biomassa da levedura *Rhodotorula glutinis*.

Experimentos	Solubilidade em água (%)
--------------	--------------------------

01(10%, 4 mim, 50°C)	27,55 ± 2,75
02(20%, 4 mim, 50°C)	29,96 ± 0,62
03(10%, 6 mim, 50°C)	33,09 ± 2,08
04(20%, 6 mim, 50°C)	31,08 ± 2,23
05(10%, 4 mim, 70°C)	37,22 ± 0,97
06(20%, 4 mim, 70°C)	30,37 ± 2,60
07(10%, 6 mim, 70°C)	27,70 ± 2,63
08(20%, 6 mim, 70°C)	32,44 ± 5,55
09(15%, 5 mim, 60°C)	24,88 ± 0,60
10(15%, 5 mim, 60°C)	30,82 ± 2,46
11(15%, 5 mim, 60°C)	20,51 ± 0,68

Conforme apresentado na Tabela 4.12 o maior valor de solubilidade obtido foi de 37,22 ± 0,97 no experimento 5 (10% de espuma; 4 minutos de agitação; 70°C) e a menor solubilidade foi de 20,51 ± 0,68 no experimento 11 (15% de espuma; 5 minutos de agitação; 60°C) que representa o ponto central dos experimentos.

Conforme a análise estatística, nenhuma das variáveis independentes (concentração do agente espuma, tempo de agitação e temperatura de secagem) influenciou significativamente, dentro do intervalo de confiança de 95% na solubilidade do pó da biomassa da levedura *Rhodotorula glutinis* por secagem em camada de espuma. Esse resultado pode ser observado no diagrama de Pareto mostrado no APÊNDICE C

4.5.3 Ácido Ascórbico

Na Tabela 4.13 são apresentados os valores médios do ácido ascórbico para o pó da biomassa da levedura *Rhodotorula glutinis* para cada um dos ensaios do planejamento experimental fatorial utilizado na secagem.

Tabela 4.13 – Valores médios do ácido ascórbico para o pó da biomassa da levedura *Rhodotorula glutinis*.

Experimentos	Ácido ascórbico (mg/100 g)
01(10%, 4 mim, 50°C)	36,46 ± 6,04

02(20%, 4 mim, 50°C)	36,07 ± 5,78
03(10%, 6 mim, 50°C)	54,54 ± 0,24
04(20%, 6 mim, 50°C)	36,10 ± 3,84
05(10%, 4 mim, 70°C)	36,60 ± 3,64
06(20%, 4 mim, 70°C)	42,64 ± 6,93
07(10%, 6 mim, 70°C)	42,58 ± 6,81
08(20%, 6 mim, 70°C)	42,52 ± 3,62
09(15%, 5 mim, 60°C)	48,24 ± 3,48
10(15%, 5 mim, 60°C)	42,69 ± 7,00
11(15%, 5 mim, 60°C)	36,57 ± 7,07

De acordo com os resultados apresentados na Tabela 4.13 foi observado que quanto ao teor de ácido ascórbico o maior valor obtido foi de 54,54 mg/ 100 g de pó no experimento 3 (10% de espumante; 6 minutos de agitação; 50°C), que pode ser classificado como um ótimo resultado, tendo em vista que o ácido ascórbico é uma substância que apresenta alta instabilidade, sendo frequentemente utilizado como um índice da qualidade global de nutrientes dos alimentos durante o processamento e armazenamento. (HIATT et al., 2010).

Conforme a análise estatística, nenhuma das variáveis independentes (concentração do agente espumante, tempo de agitação e temperatura de secagem) influenciaram significativamente, dentro do intervalo de confiança de 95% no ácido ascórbico do pó da biomassa da levedura *Rhodotorula glutinis* por secagem em camada de espuma. Esse resultado pode ser observado no diagrama de Pareto mostrado no APÊNDICE D

4.5.4 Atividade de água

Na Tabela 4.14 são mostrados os valores médios da atividade de água (A_w), na temperatura de 30 °C, do pó da biomassa da levedura *Rhodotorula glutinis* para cada um dos ensaios do planejamento experimental fatorial utilizado na secagem.

Tabela 4.14 - Atividade de Água (A_w) do pó da biomassa da levedura *Rhodotorula glutinis*.

Experimentos	A_w
01(10%, 4 mim, 50°C)	0,398± 0,026

02(20%, 4 mim, 50°C)	0,375 ± 0,009
03(10%, 6 mim, 50°C)	0,253 ± 0,021
04(20%, 6 mim, 50°C)	0,319 ± 0,005
05(10%, 4 mim, 70°C)	0,230 ± 0,017
06(20%, 4 mim, 70°C)	0,455 ± 0,033
07(10%, 6 mim, 70°C)	0,281 ± 0,022
08(20%, 6 mim, 70°C)	0,207 ± 0,017
09(15%, 5 mim, 60°C)	0,277 ± 0,022
10(15%, 5 mim, 60°C)	0,364 ± 0,022
11(15%, 5 mim, 60°C)	0,277 ± 0,026

Na Tabela 4.14 foi observado, para a análise de atividade de água nos pós obtidos por secagem em camada de espuma, que o menor valor de a_w foi de $0,207 \pm 0,012$ no experimento 8 (20% de espumante, 6 minutos de agitação; 70° C) e o maior de a_w foi de $0,455 \pm 0,033$ do experimento 6 (20% de espumante; 4 minutos de agitação; 70° C).

Sendo assim, os valores de atividade de água para os pós da biomassa da levedura *Rhodotorula glutinis* são aceitáveis, haja vista que em todos os experimentos realizados foi mantido um teor de a_w abaixo de 0,6, assegurando que o produto final da secagem está nas condições satisfatórias para conservação e armazenamento. (CELESTINO, 2010).

Conforme a análise estatística, nenhuma das variáveis independentes (concentração do agente espumante, tempo de agitação e temperatura de secagem) influenciou significativamente, dentro do intervalo de confiança de 95% na atividade de água do pó da biomassa da levedura *Rhodotorula glutinis* por secagem em camada de espuma. Esse resultado pode ser observado no diagrama de Pareto mostrado no APÊNDICE E

5. CONCLUSÃO

A partir dos resultados obtidos, pode-se concluir que:

O processo de fermentação da levedura *R. glutinis* com um meio a base de melaço de cana, suplementada com nutrientes: extrato de levedura, sulfato de magnésio e fosfato monopotássico, foi satisfatório, tendo resultados superiores a alguns trabalhos vistos na literatura, porém foram necessárias 12 bateladas, sendo aproximadamente uma batelada por ensaio de secagem, as quais tiveram em média um rendimento de 62 g de biomassa úmida.

A utilização do agente espumante raspas de juá em pó foi indispensável, para a formação da espuma.

As caracterizações físicas da espuma, estabilidade, densidade, percentual de expansão e capacidade de incorporação apresentaram resultados satisfatórios. Dentre as variáveis independentes do processo, o tempo de agitação foi a variável de maior destaque, em particular o nível superior do planejamento experimental, que foi responsável pela menor densidade, maior expansão volumétrica e maior capacidade de incorporação. A estabilidade da espuma foi favorecida pelo aumento da concentração do agente espumante.

Os modelos não lineares que melhor se ajustaram aos dados experimentais da cinética de secagem foram Logaritmo e Page, pois apresentaram coeficientes estatisticamente significativos e valores contidos do erro padrão da estimativa.

Em relação às curvas de cinética de secagem, a partir da análise estatística foi possível determinar que dentre as variáveis independentes do processo apenas a temperatura teve influência significativa ao nível de 95% de confiança nos resultados. Determinou-se que com a elevação da temperatura foi reduzido o tempo de secagem. Para a umidade de equilíbrio de secagem nenhuma das variáveis apresentou influência significativa.

Nas caracterizações físicas e físico-químicas do pó da levedura, observou-se que o rendimento do pó é influenciado significativamente ao nível de 95% de confiança pelo tempo de agitação, de forma que quanto menor o tempo de agitação maior será o rendimento do pó. Para as demais análises as variáveis não apresentaram influência significativa

A solubilidade em água obtida variou de $20,51 \pm 0,68$ a $37,22 \pm 0,97$. A atividade de água do pó apresentou resultados abaixo de 0,6, se mantendo dessa forma na faixa considerada segura para conservação de alimentos. O teor de ácido ascórbico foi em média de 41,36 mg/100 g de pó.

Em termos de tempo de secagem, a melhor condição de secagem foi a do experimento 06 (20% do agente espumante; 4 min de agitação; 70 °C), onde o tempo de secagem foi de 100 min e a umidade em base seca de 0,013.

REFERÊNCIAS

- ANDRADE, R. C. R **Estudo do desenvolvimento e da produtividade lipídica da levedura *Rhodotorula glutinis* NCYC 921 em culturas descontínuas monitorizadas por citometria de fluxo.** XX f. Dissertação (Mestrado em Biotecnologia) - Faculdade de Ciências e Tecnologia, Monte de Caparica, 2010.
- ARAÚJO, C. S., MACEDO, L. L., VIMERCATI, W. C., SARAIVA, S. H., OLIVEIRA, A. N., & TEIXEIRA, L. J. Q. (2017) Cinética de secagem de acerola em leito de espuma e ajuste de modelos matemáticos. **Braz. J. Food Technol.**, 20. <http://dx.doi.org/10.1590/1981-6723.15216>
- AUSICH, R. L. Commercial opportunities for carotenoid production by biotechnology. **Pure and applied chemistry**, v. 69, n. 1, p. 2169-2173, 1997.
- AOAC - ASSOCIATION OF OFFICIAL ANALYTICAL CHEMISTS. **Official Methods of Analysis**, Williams, S. (Ed) 14.ed. Arlington, 1997. 1141 p.
- BARBOSA, A. F. S. **Cultivo de *Rhodotorula glutinis* em manipueira para a produção de suplemento vitamínico e proteico.** Dissertação (Mestrado em Biociências) - Universidade Federal da Bahia, Vitória da Conquista, 2017.
- BEOPOULOS, A.; CESCUT, J.; HADDOUCHE, R.; URIBELARREA, J. L.; MOLINAJOUVE, C.; NICAUD, J. M. *Yarrowia lipolytica* as a model for bio-oil Production. **Progress in Lipid Research**, v. 48, n. 6, p. 375-387, 2009.
- BHOSALE, P. Environmental and cultural stimulants in the production of carotenoids from microorganism. **Applied Microbiology and Biotechnology**, v. 63, p.351-361, 2004.
- BHOSALE, P.; GRADE, R. V. Manipulation of temperature and illumination conditions for enhanced b-carotene production by mutant 32 of *Rhodotorula glutinis*. **Letters in Applied Microbiology**, v. 34, p. 349-353, 2002.
- BRENNAN, J. G. **Food Dehydration: a dictionary and guide.** Oxford: ButterworthHeinemann, 1994. 189p.
- BROCK, J., NOGUEIRA, M. R., ZAKRZEWSKI, C., CORAZZA, F. C., CORAZZA, M. L., & OLIVEIRA, J. V. (2008). Determinação experimental da viscosidade e condutividade térmica de óleos vegetais. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, 28(3), 564-570. <http://dx.doi.org/10.1590/S0101-20612008000300010>
- CABALLERO-CORDOBA, G. M.; PACHECO, M. T. B.; SGARBIERI, V. C. Composição química da biomassa de levedura integral (*Saccharomyces* sp.) e determinação do valor nutritivo da proteína em células íntegras ou rompidas mecanicamente. **Ciênc. Tecnol. Aliment.** Campinas, v. 17, n. 2, p. 102-106, 1997.
- CANO-CHAUCA, M.; STRINGHETA, P. C.; RAMOS, A. M.; CAL-VIDA, J. Effect of the carriers on the microstructure of mango poder obtained by spray drying and its functional

characterization. **Innovative Food Science and Emerging Technologies**, v. 5, n. 4, p. 420-428, 2005.

CELESTINO, S. M. C. **Princípios de secagem de alimentos**. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2010.

CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da Safra Brasileira – Cana-de-açúcar**. v. 6 - Safra 2019/20, n. 2 - Segundo levantamento, Brasília, p. 1-58, agosto de 2019.

CORNEJO, F. E. P.; NOGUEIRA, R. I.; WILBERG, V. C. **Secagem como método de conservação de frutas**. Embrapa Agroindústria de Alimentos-Documents (INFOTECA-E), 2003.

CORTEZ, L. A. B.; BROSSARD PÉREZ, L. E. Experiences On Vinasse Disposal Part III: Combustion of Vinasse-# 6 Fuel Oil Emulsions. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, São Paulo, v.14, n.1, 1997.

COSTA, I. Produção de β -caroteno por uma espécie do gênero *Rhodotorula*. 60 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Bioquímica) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1992.

CRUZ, G. A. **Desidratação de alimentos**. Rio de Janeiro (RJ): Globo, 1990. 207 p

CRUZ, W. F. **Obtenção de polpa de goiaba (*Psidium guajava* L.) em pó pelo método de secagem em camada de espuma**. Viçosa, 78 p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2013.

EASTMAN, J. E.; MOORE, C. O. **Cold Water Soluble Granular Starch for Gelled Food Composition**. Patente, U.S., 1984.

FRANCIS, F. J. **Encyclopedia of Food Science and Technology**. 2nd ed. New York: John Wiley & Sons, Inc. 2000. v. 1. 2907p.

FRANCO, T. S. **Desidratação de suco de yacon pelo método de camada de espuma**. 2015. 190 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Alimentos) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

FEITOSA, R. M., FIGUEIRÊDO, R. M. F., QUEIROZ, A. J. M., LIMA, F. C. S., & OLIVEIRA, E. N. A. (2017). Drying and characterization of myrtle pulp. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 21(12), 858-864. <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v21n12p858-864>

FELLOWS, P. **Food Processing Technology**. Principles and Practice. 2 Ed. New York: CRC Press. 2000, 562p.

FELLOWS, P. J. **Tecnologia do Processamento de Alimentos**. Princípios e Práticas. 2ªEd. Porto Alegre: ArtMed, 2006. 602 p

GURGEL, C. E. M. R.. **Secagem da polpa de graviola (*Annona muricata* L.) em camada de espuma-desempenho do processo e características do produto**. Dissertação de Mestrado(

Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte- UFRN, Natal, 2014

HOFFMANN, F. L. Fatores limitantes à proliferação de microorganismos em alimentos. **Brasil alimentos**, v. 9, n. 1, p. 23-30, 2001.

HIATT, A.N.; TAYLOR, L.S.; MAUER, L.J. Influence of simultaneous variations in temperature and relative humidity on chemical stability of two vitamin C forms and implications for shelf life models. *J. Agric. Food Chem.*, v. 58, p. 3532-3540, 2010.

IAL. Instituto Adolfo Lutz. **Métodos físico-químicos para análise de alimentos: normas analíticas do Instituto Adolfo Lutz**. 4. ed. [1. ed. digital]. São Paulo (SP): Instituto Adolfo Lutz; 2008. Disponível em: http://www.ial.sp.gov.br/resources/editorinplace/ial/2016_3_19/analisedealimentosial_2008.pdf.

JANUÁRIO, T. M. P. **Otimização do processo de produção de lípidos e carotenóides a partir da biomassa da levedura *Rhodotorula glutinis* NRRL Y-1091**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Alimentar) - Universidade de Lisboa, Lisboa, 2014.

KARIM, A. A.; WAI, C. Foam-mat drying of starfruit (*Averrhoa carambola* L.) purée stability and air-drying characteristics. **Food Chemistry**, v. 64, n. 3, p. 337-343, 1999.

KANDASAMY, P.; VARADHARAJU, N.; KALEMULLAH, S.; MOITRA, S. Production of papaya powder under foam-mat drying using methyl cellulose as foaming Agent. **Asian Journal of Food and Agro-Industry**, v. 5, n. 5, p. 374-387, 2012.

KINSELLA, J. E. Functional proteins from yeast nucleoprotein for uses. Methods for isolation. In: KNORR, D. **Food biotechnology**. New York: Marcel Dekker, 1987. Cap. 14: p.363-391

LAU, K.; DICKINSON, E. Structural and Rheological Properties of Aerated High Sugar Systems Containing Egg Albumen. **Journal of Food Science**, v. 69, p. 232-239, 2004.

MACHADO, C. M. M. Processamento de hortaliças em pequena escala. **Embrapa Hortaliças-Livro técnico (INFOTECA-E)**, 2008.

MALDONADE, I. R., RODRIGUEZ-AMAYA, D. B., & SCAMPARINI, A. R. Carotenoids of yeasts isolated from the Brazilian ecosystem. **Food Chemistry**, v. 107, n. 1, p. 145-150, 2008.

MARTÍNEZ, C.; GERTOSIO, C.; LABBE, A.; PÉREZ, R.; GANGA, M. A. Production of *Rhodotorula glutinis*: a yeast that secretes alpha-L-arabinofuranosidase. **Electron. J. Biotechnol.**, v. 9, n. 4, 2006.

MARTÍNEZ-FORCE, Enrique; BENÍTEZ, Tahía. Changes in yeast amino acid pool with respiratory versus fermentative metabolism. **Biotechnology and bioengineering**, v. 40, n. 6, p. 643-649, 1992.

MELO, K. D. S. Secagem em camada de espuma da polpa do fruto do mandacaru: experimentação e ajustes de modelos matemáticos. **Revista Caatinga**, v. 26, n. 2, p. 9-17, 2013.

MENG, X.; YANG, J.; XU, X.; ZHANG, L.; NIE, Q.; XIAN, M. Biodiesel production from oleaginous microorganisms. **Renewable Energy**, v. 34, n. 1, p. 1-5, 2009.

MILLER, G. Use of dinitrosalicilic acid reagent for determination of reducing sugars. *Analytical Chemistry*, v. 31, p. 426-428, 1959.

MORGAN, A. I. J; GINETTE, L. F.; RANDALL, J. M.; GRAHAM, R. P.; Technique for improving instant foods. **Food Engineering**, v. 31, n. 9, p.89-94. 1959.

NEGREIROS, J. K. S. **Secagem em camada de espuma do suco da romã, composto por sua polpa e casca** Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), 107 p. Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2019.

PAPANIKOLAOU, S.; AGGELIS, G. Lipids of oleaginous yeasts. Part II: Technology and potential applications. **European Journal of Lipid Science and Technology**, v. 113, n. 8, p. 1052-1073, 2011.

PEREIRA, T. S. **Estudo da secagem da clara de ovo em camada de espuma (foam-mat drying)**. Pombal. 65 p. Dissertação (Mestrado em Sistemas Agroindustriais) - Programa de Pós-Graduação em Sistemas Agroindustriais, Pombal, 2015.

PINTO, E. G. **Caracterização da espuma de jenipapo (*Genipa americana* L.) com diferentes aditivos visando a secagem em leito de espuma**. 65 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos) – Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, Itapetinga, 2009.

RAMBLA, M. A. O.; PRADA, A. R.; COOPAT, T. S.; CARRACEDO, G. B. **Méis. Manual dos derivados da cana-de-açúcar**. Instituto cubano de pesquisas dos derivados da cana-de-açúcar. Cap. 2.4, p 49-55,1999.

RAJKUMAR, P., KAILAPPAN, R., VISWANATHAN, R., RAGHAVAN, G.S.V. Drying characteristics of foamed alphonso mango pulp in a continuous type foam mat dryer. **J. Food Eng.**, v. 79, p.1452-1459, 2007.

RATTI, C.; KUDRA, T. Drying of foamed biological materials: opportunities and challenges. **Drying Technology**, v. 24, n. 9, p. 1101-1108, 2006.

RATLEDGE, C.; WYNN, J. P. The biochemistry and molecular biology of lipid accumulation in oleaginous microorganisms. **Advances in Applied Microbiology**, v. 51, n. 51, p. 1-51, 2002.

REED, G.; PEPPLER, H. J. **Yeast technology**. The AVI Publ. Co. Inc. Westport Co, p. 103-164, 1973.

FIOREZE, ROMEU. Princípios de secagem de produtos biológicos. **João Pessoa: Editora Universitária/UFPB**, v. 229, 2003

SANGAMITHRA, A.; SIVAKUMAR, V.; KANNAN, K.; JOHN, S. G. Foam-Mat Drying of Muskmelon. **International Journal of Food Engineering**, v. 11, n. 1, p. 127-137, 2015.

SANKAT, C. K.; CASTAIGNE, F. Foaming and drying behaviour of ripe bananas. **LWT-Food Science and Technology**, v. 37, n. 5, p. 517-525, 2004.

SICARD, D.; LEGRAS, J. L. Bread, beer and wine: Yeast domestication in the *Saccharomyces sensu stricto* complex. **Compts Rendus Biologies**, v. 334, n. xx, p. 229-236, 2011

SILVA FILHO, E. D. **Obtenção e avaliação da qualidade da polpa da manga cv. Haden em pó, pelo método de secagem em camada de espuma**. 190 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2012.

Silva, J. D., Silva, F. L. H. D., Santos, S. F. D. M., Ribeiro, J. E. S., Medeiros, L. L. D., & Ferreira, A. L. D. O. Produção de biomassa e lipídios pela levedura *Rhodotorula mucilaginosa* utilizando a manipueira como substrato. **Brazilian Journal of Food Technology**, v. 21, 2018.

SQUINA, F. M.; MERCADANTE, A. Z. Análise, por CLAE, de carotenóides de cinco linhagens de *Rhodotorula*. **Revista Brasileira de Ciências Farmacêuticas**, São Paulo, v.39, n. 3, p. 309-318, 2003.

STRUMILLO, C.; KUDRA, T. **Drying: principles, applications and design**. New York: Gordon and Breach Science Publishers, 1986, 280 p.

TORRES, F. A. G; MORAES, L. M. P. Proteínas recombinantes produzidas em leveduras. **Biotecnologia Ciência e Desenvolvimento**, v. xx, n. xx, p. 20-22, 2000.

VISSOTTO, F. Z.; MONTENEGRO, F. M.; SANTOS, J. M.; OLIVEIRA, S. J. R. Avaliação da influência dos processos de lecitinação e de aglomeração nas propriedades físicas de achocolatado em pó. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 26, n. 3 p. 666-671, 2006

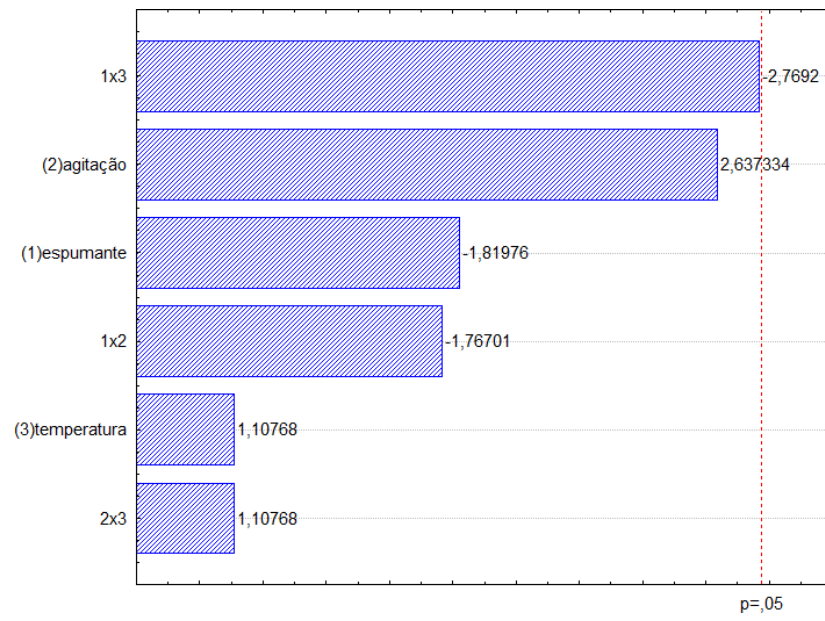
WALISZEWSKI, K. N.; ROMERO, A.; PARDIO, V. T. Use of cane condensed molasses in feeding broilers. **Animal Feed Science Technology**, v. 67, p.253-258, 1997.

XUE, F.; MIAO, J.; ZHANG, X.; LUO, H.; TAN, T. Studies on lipid production by *Rhodotorula glutinis* fermentation using monosodium glutamate wastewater as culture medium. **Bioresource Technology**, v. 99, p. 5923–5927, 2008

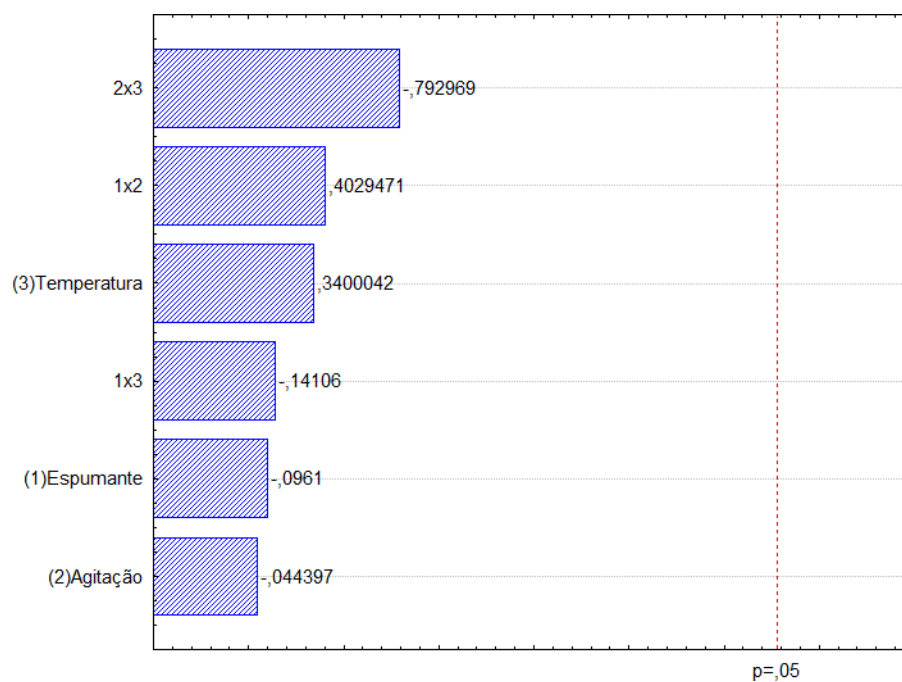
APÊNDICE A- Dados da ANOVA realizada para a variável tempo de secagem

Fonte de variação	Soma Quadrática (SQ)	Grau de Liberdade (GL)	Quadrado Médio (QM)	Teste f $F_{\text{calculado}}$	Teste f F_{tabelado}	Teste
Regressão	7975,00	2	3987,5	37,8320	4,46	O modelo é significativo
Resíduo (erro)	843,182	8	105,4			
Falta de ajuste	643,182	6	107,197	1,07197	5,14	O modelo não apresenta falta de ajuste
Erro puro	200	2	100			
Total	8818,182	10				
R^2	0,9043					

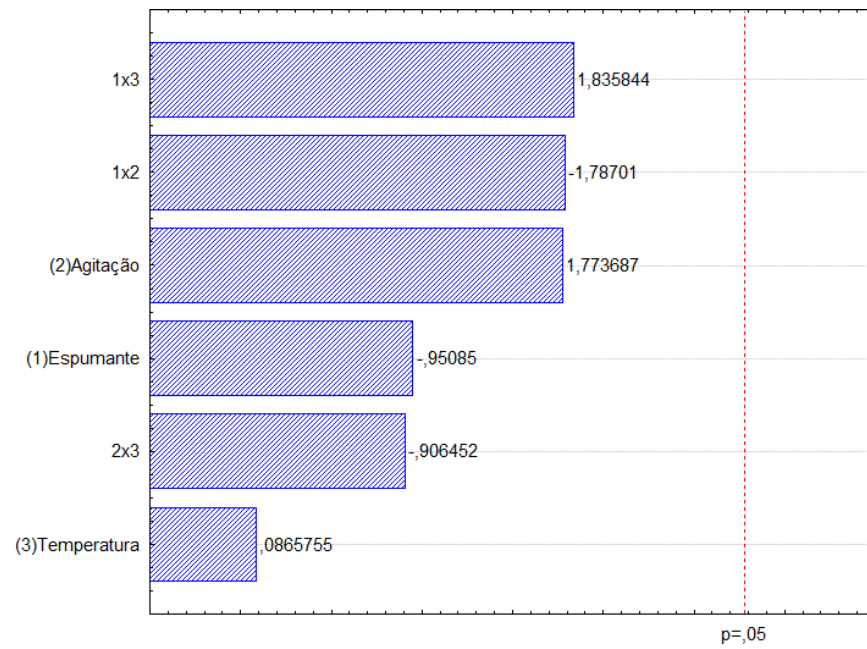
APÊNDICE B - Diagrama de Pareto para a Umidade final da secagem



APÊNDICE C - Diagrama de Pareto para a análise de solubilidade dos pós obtidos por secagem em camada de espuma



APÊNDICE D- Diagrama de Pareto para a análise de asc dos pós obtidos por secagem em camada de espuma



APÊNDICE E- Diagrama de Pareto para a análise de atividade de água dos pós obtidos por secagem em camada de espuma

