

APROVEITAMENTO DE RESÍDUOS CÍTRICOS ATRAVÉS DA SECAGEM TÉRMICA

HARNESSING OF CITRUS WASTE THROUGH THERMAL DRYING

Hugo Perazzini

Universidade Federal de São Carlos, São Carlos – SP, Brasil
hperazzini@gmail.com

Fábio Bentes Freire

Universidade Federal de São Carlos, São Carlos – SP, Brasil
bentes@ufscar.br

José Teixeira Freire*

Universidade Federal de São Carlos, São Carlos – SP, Brasil
freire@ufscar.br

Resumo

No presente trabalho, realizou-se uma análise da secagem térmica de resíduos sólidos provenientes da indústria de beneficiamento de cítricos visando seu aproveitamento como um subproduto. O processo de secagem dos resíduos cítricos foi estudado experimentalmente em um secador rotativo semi-piloto de contato direto e fluxos concorrentes, operando com alimentação contínua e reciclo de sólidos. Os experimentos de secagem consistiram na obtenção de dados de umidade e temperatura em função do tempo para a fase sólida e fluida em diferentes condições operacionais de processo. Com base nos resultados obtidos, foi possível obter as condições ótimas de operação e avaliar a adequação do secador rotativo na secagem do resíduo sólido proposto.

Palavras-chave: Aproveitamento. Cinética de secagem. Resíduos sólidos. Secador rotativo. Tratamento térmico.

Abstract

In the present work, was performed an analysis of the thermal drying of solid waste from the citrus beneficiation industry, aimed at harnessing use as a byproduct. The process of drying citrus waste has been studied experimentally in a dryer rotary semi-pilot direct contact and flows concurrent, operating with continuous feeding and recycle solids. Drying experiments consists in obtaining moisture data and temperature at functions time for solid and fluid phase at different process operating conditions. Based on the results, it was possible to obtain the optimal operating conditions and assess the adequacy of rotary dryer for drying the solid residue proposed.

Keywords: Harnessing. Kinetics of drying. Solid waste. Rotary dryer. Heat treatment.

1 Introdução

No Brasil, nos últimos anos, a indústria processadora de sucos cítricos tem se expandido rapidamente. Um reflexo direto desta expansão é o aumento na quantidade de resíduos sólidos de

elevada carga orgânica gerados diariamente por seu processo industrial. Em âmbito mundial, o Brasil se destaca como um dos maiores produtores e exportadores de frutas cítricas (BAMPIDIS; ROBINSON, 2006). Como grande parte da produção destas frutas é destinada à produção de sucos cítricos e apenas 50% do fruto é aproveitado na etapa de extração (SKREENATH *et al.*, 1995; FERREIRA-LEITÃO *et al.*, 2010), uma grande quantidade de resíduo é gerada diariamente por esta atividade. Segundo Ferreira-Leitão *et al.* (2010), o Brasil produz anualmente, em média, 10.384 milhões de toneladas de resíduo sólido cítrico. Estes materiais são caracterizados por um elevado teor de matéria orgânica e umidade inicial e no que diz respeito às questões ambientais, devido a sua rápida degradação e fermentação ocasionada pelas reações bioquímicas que ocorrem na presença de umidade, os resíduos cítricos constituem-se de agentes poluidores de grande potencial (TRIPODO *et al.*, 2004; HEERDEN *et al.*, 2007; MAMMA *et al.*, 2008; SENEVIRATHNE *et al.*, 2009; SAHRAOUI *et al.*, 2011).

Do ponto de vista tecnológico-ambiental, a secagem pode ser considerada como uma alternativa viável para o tratamento térmico de resíduos sólidos. O estudo de processos de secagem de resíduos sólidos orgânicos e inorgânicos de diferentes naturezas vem se intensificando nos últimos anos devido, principalmente, às preocupações com respeito a seu destino final e a sua correta disposição no meio ambiente. Em especial aos resíduos sólidos cítricos de origem industrial, uma vez que são caracterizados por um elevado teor de matéria orgânica e umidade inicial, a importância da aplicação desta técnica advém não somente de questões ambientais, mas também vem de encontro a interesses tecnológicos e econômicos na obtenção de subprodutos.

Diante do contexto apresentado, o objetivo deste trabalho é obter informações qualitativas sobre o tratamento térmico de resíduos sólidos cítricos empregando-se técnicas de secagem, visando seu aproveitamento como um subproduto. A operação de secagem foi realizada empregando-se um secador rotativo de escala semi-piloto e escoamentos concorrentes. A influência das principais condições operacionais no processo foi avaliada e também investigada a adequação do secador proposto na secagem dos resíduos sólidos cítricos.

2 Generalidades

Diante do problema ambiental e visando agregar valor aos descartes da indústria cítrica, vários trabalhos têm proposto usos alternativos para os resíduos cítricos. Dentre os principais, pode-se citar a utilização destes materiais como fertilizantes orgânicos (GUERRERO; BRITO, 1995), como adsorvente de metais pesados para o tratamento de efluentes industriais (DHAKAL *et al.*, 2005), como matéria prima para a fabricação de ração animal (BAMPIDIS; ROBINSON, 2006), na produção de fibras dietéticas (MARÍN *et al.*, 2007) e de óleos essenciais (RAEISSI *et al.*, 2008). Mais recentemente, os resíduos cítricos têm sido utilizados como biocombustíveis para a produção

de etanol e biogás (LOHRASBI *et al.*, 2010). Para viabilizar técnica e economicamente a aplicação de algumas técnicas de aproveitamento é necessária a redução da umidade inicial dos resíduos, a qual pode ser realizada aplicando-se técnicas de secagem (FERREIRA-LEITÃO *et al.*, 2010; GUERRERO; BRITTO, 1995; MARÍN *et al.*, 2007; SAHRAOUI *et al.*, 2011; SENEVIRATHNE *et al.*, 2009).

Vários estudos já foram desenvolvidos visando a secagem de resíduos sólidos de diferentes origens, como por exemplo, os trabalhos realizados por Krokida *et al.* (2002), Arjona *et al.* (2005) e Doymaz *et al.* (2004) para a secagem de resíduos da indústria de óleo de oliva em secadores rotativos e em leito fixo, respectivamente. Lopez *et al.* (2000) estudaram a operação de secagem de resíduos vegetais em secador de leito fixo em diferentes condições operacionais. Utilizando resíduos semelhantes, Iguaz *et al.* (2003) realizaram a modelagem matemática da secagem em secador rotativo de escala industrial. Reyes *et al.* (2004) estudaram a influência das variáveis operacionais em um secador tipo túnel na secagem de lodo de esgoto. Pinacho *et al.* (2006) realizaram a secagem de resíduos sólidos municipais de natureza orgânica em secadores rotativo e de bandejas, visando um produto final a ser aplicado na alimentação de ruminantes. Posteriormente, Celma *et al.* (2009) estudaram experimentalmente o processo de secagem por infra-vermelho de resíduos de tomate. No mesmo trabalho, foram avaliados estatisticamente modelos semi-empíricos para a descrição matemática do processo. Vega-Gálvez *et al.* (2009) realizaram a modelagem matemática da secagem de resíduos da indústria de pesca em um secador convectivo de bandejas, visando a qualidade do produto a fim de ser utilizado como biofertilizante e como ração animal. Perazzini (2011) estudou a secagem de resíduos cítricos em um secador rotativo de escala semi-piloto, apresentando como resultado curvas experimentais e simuladas de temperatura e umidade das fases sólida e gasosa em função do tempo. Com relação à secagem de resíduos sólidos inorgânicos, pode-se citar, como exemplo, o trabalho de Kudra *et al.* (2002) que estudou a secagem de resíduos do processamento de papel em leito fluidizado, Passos *et al.* (2004) para a secagem do licor negro, resíduo proveniente da indústria papeleira, em leito de jorro com partículas inertes, Carvalho e Silva (2006) para a secagem de resíduos hospitalares em secador de bandejas e o trabalho de Bancelos *et al.* (2009) para a secagem de resíduos de embalagens cartonadas em um secador rotativo semi-piloto.

Dentre os métodos de secagem existentes empregados por diversos trabalhos da literatura, a técnica de leito móvel utilizando-se secadores rotativos vem sendo utilizada com sucesso na secagem de resíduos sólidos, principalmente, devido à sua versatilidade e flexibilidade, o que favorece a secagem de materiais heterogêneos (ADAPA *et al.*, 2004; IGUAZ *et al.*, 2003; KROKIDA *et al.*, 2002;), por proporcionar um bom contato entre as fases sólida e gasosa (SHAHHOSSEINI *et al.*, 2001), pela possibilidade de se obter produtos de qualidade uniforme,

devido a um elevado grau de mistura das partículas (LANGRISH *et al.*, 2002; SONG *et al.*, 2003) e ser de simples scale-up no que se diz respeito às geometrias do sistema (BACELOS *et al.*, 2009). Devido às características apresentadas, além de sua aplicação na secagem dos resíduos já citados anteriormente, o secador rotativo também já foi aplicado na secagem de lodo de esgoto (FINZER *et al.*, 2002) e na secagem de resíduos industriais inorgânicos (XU; PANG, 2008).

Com base nos resultados dos trabalhos apresentados e diante das características intrínsecas do secador rotativo, o que favorece a secagem de materiais heterogêneos, optou-se pela utilização deste secador como contexto para os estudos de secagem realizados neste trabalho, os quais serão descritos em seguida.

3 Materiais e metodologia experimental

3.1 Resíduo sólido

Neste trabalho, foram utilizados resíduos sólidos industriais do limão da variedade siciliano (espécie *Citrus limon* L. Burm f.), provenientes da etapa de extração do suco cítrico. Este material consiste de uma mistura heterogênea de vários componentes da fruta, tais como casca, semente, membrana, núcleo e vesículas de suco.

3.2 Caracterização do resíduo sólido

Por se tratar de um material heterogêneo, realizou-se inicialmente uma caracterização do material particulado em estudo, com o objetivo de determinar suas principais propriedades termofísicas. Foram obtidas as massas específicas aparente e real a partir de técnicas de picnometria líquida utilizando-se solvente n-hexano e por picnometria gasosa utilizando-se gás hélio como fluido percolante, respectivamente. O calor específico do resíduo cítrico foi obtido pela técnica de calorimetria por varredura diferencial (DSC) na faixa de temperatura de 20 a 90 °C.

3.3 Equipamento experimental

Os experimentos de secagem foram conduzidos em um secador rotativo de escala semi-piloto com escoamentos concorrentes de gás e de sólidos. Um diagrama esquemático da unidade experimental de secagem e seus principais periféricos são apresentados na Figura 1. O tambor rotativo foi construído com chapas de aço inox de 1,5 mm de espessura a fim de evitar processos de oxidação ocasionados pela umidade do resíduo sólido. O tambor possui 2,7 m de comprimento (L) e 0,45 m de diâmetro (D). Tais dimensões obedecem à relação comprimento/diâmetro ($4D \leq L \leq 15D$) sugerida por Nonhenbel e Moss (1971). No seu interior estão dispostos seis suspensores de

três segmentos que seguem o modelo geométrico proposto por Baker (1988) e Kelly (1992), conforme mostra a Figura 2.

Figura 1 - Esquema do secador rotativo: (1) Soprador; (2) trocador de calor; (3) Controlador de temperatura; (4) Sistema de alimentação; (5) Tambor rotativo; (6) Sistema de rotação; (7) Sensor de temperatura, umidade e velocidade; (8) Coletor

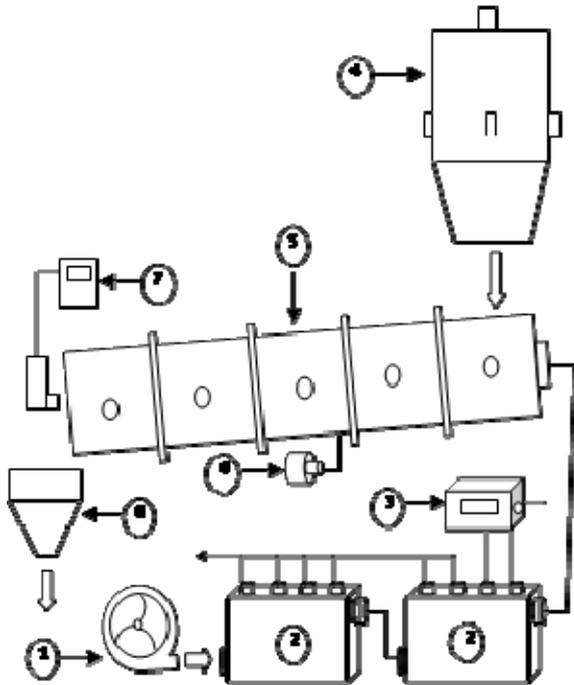
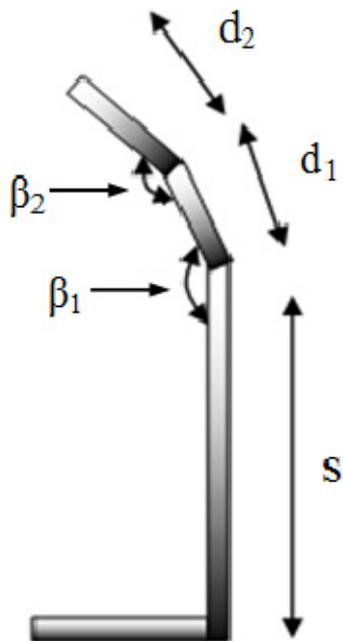


Figura 2 - Suspensor de três segmentos: β_1 e $\beta_2 = 135^\circ$; d_1 e $d_2 = 15$ mm; $s = 80$ mm.



Fonte: Adaptado de Bacelos *et al.* (2009)

3.4 Técnicas de medida

Para a obtenção das medidas de temperatura e umidade relativa do gás utilizou-se um termo-higrômetro que permitiu a determinação direta destas variáveis. As temperaturas da fase sólida e da parede externa do secador foram determinadas por um pirômetro. A umidade do resíduo foi determinada coletando-se amostras em intervalos de tempo pré-estabelecidos. Em seguida, as amostras foram pesadas e levadas a uma estufa a 105 °C para a determinação do peso seco, enquanto que a atividade de água do material foi determinada em um equipamento específico (Aqualab Lite – Decagon Devices Inc.). Um termo-anemômetro digital foi utilizado para medir a velocidade de saída do gás de secagem. Todas as técnicas de media apresentadas foram realizadas na saída do equipamento, o que permitiu, em primeira análise, a obtenção de dados de umidade e temperatura em função do tempo de secagem.

3.5 Procedimento experimental

A secagem do resíduo sólido foi estudada experimentalmente no secador rotativo com o acompanhamento periódico da umidade e da temperatura das fases sólida e fluida a cada cinco minutos nas condições operacionais descritas na Tabela 1. Nesse mesmo intervalo de tempo também foram monitoradas a temperatura da parede externa do secador e a atividade de água do sólido segundo as técnicas de medida já apresentadas.

Tabela 1 - Condições Operacionais de Secagem

Variável	Faixa Operacional
Velocidade de rotação (rpm)	1
Ângulo de inclinação do tambor (°)	1
Velocidade do ar (m/s)	1 e 2
Temperatura de entrada do ar (°C)	$135 \leq T_g^E \leq 155$
Vazão de alimentação (kg/min)	0,2 e 0,4
Umidade relativa do ar de entrada (% base úmida)	$13,6 \leq UR \leq 18,4$
Umidade inicial do sólido (% base úmida)	$80 \leq Y_s \leq 85$

Testes preliminares proporcionaram a escolha das condições operacionais de acordo com o melhor escoamento e cascadeamento dos sólidos no interior do tambor rotativo, com as limitações do equipamento relacionadas com temperatura e velocidade de gás máxima e com relação à disponibilidade do material para alimentação.

Para as experiências de secagem, com duração de aproximadamente quatro horas e que abrangeram todo o período transiente, foi estabelecida a seguinte metodologia: inicialmente eram acionados o soprador, o sistema de aquecimento e a rotação do tambor nas condições operacionais desejadas. Nessas condições, ainda sem a alimentação de resíduo, o sistema operou até a temperatura de saída do ar ficar constante. Depois disso, os resíduos foram alimentados

intermitentemente no secador. Em tais condições, o tempo para entrada no novo regime permanente foi determinado quando não foram mais observadas variações significativas de temperatura e umidade relativa do ar de secagem na saída do secador. Satisfeita essa condição, deu-se, efetivamente, início ao processo de secagem dos resíduos. A alimentação de sólidos foi realizada recirculando os sólidos que foram coletados na saída do secador a cada cinco minutos. Estudos que envolvem a recirculação de sólidos em secadores rotativos também podem ser encontrados em Audu (1983), Ademiluyi *et al.* (2010) e Taiwo *et al.* (2010). O fim dos experimentos foi estipulado como sendo o instante no qual a atividade de água de amostras do resíduo alcançou o valor menor ou igual a 0,14. Isto significa considerar que a umidade de equilíbrio do sólido com o ar nas condições estudadas é baixa, o que assegurou as condições de estabilização microbiológica do material. Para confirmar essa consideração, as amostras foram levadas à estufa, onde foi constatado que o sólido atingiu um baixo grau de umidade ($\leq 14\%$, base úmida).

4 Apresentação e análise de resultados

4.1 Estudos de caracterização

Na Tabela 2 são apresentados os resultados de caracterização do resíduo sólido do limão. Uma vez que as grandezas físicas apresentadas na tabela foram determinadas indiretamente por técnicas experimentais e cada uma possui uma incerteza intrínseca, optou-se por realizar uma análise estatística de propagação de erros nas medidas experimentais das grandezas. Para isso, foram determinados os desvios padrão e os respectivos intervalos de confiança de cada variável analisada com base na estatística “t de student”, assumindo que todas as incertezas estão normalmente distribuídas. Dessa maneira, é possível garantir que o valor médio calculado de cada propriedade esteja no intervalo de confiança com uma probabilidade mínima de 95% (Himmelblau, 1970).

Tabela 2 - Propriedades termofísicas do resíduo

Propriedade	Réplicas	Valor médio	Desvio padrão	Intervalo de confiança
ρ_{ap} [g/cm ³]	15	1,086	0,059	0,033
ρ_r [g/cm ³]	9	3,326	0,034	0,026
c_p [J/g.K]	5	0,996	0,772	0,536

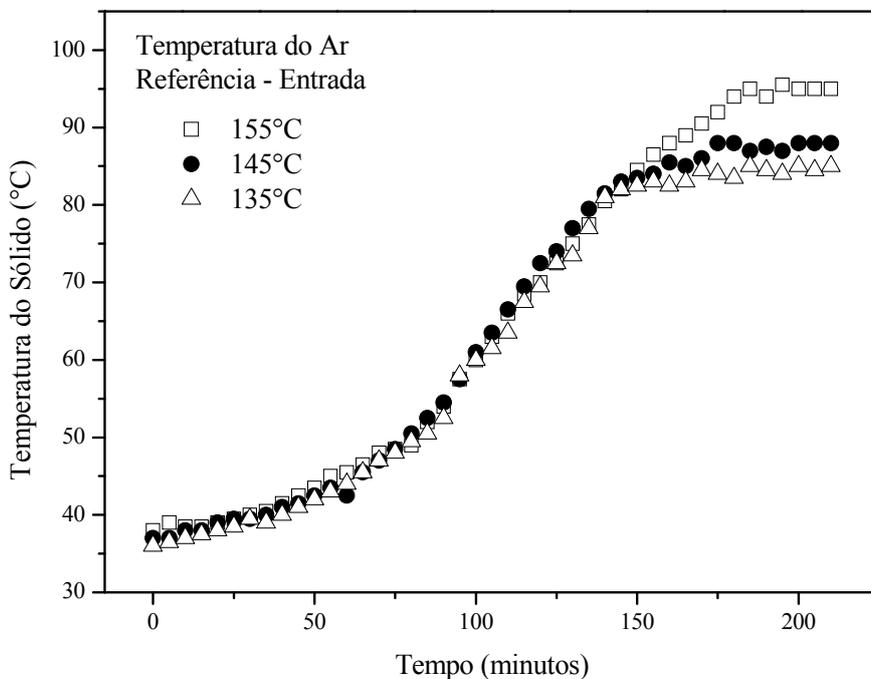
Os resíduos cítricos, além de seu elevado conteúdo de umidade inicial ($\approx 85\%$, base úmida), são caracterizados por uma alta heterogeneidade devido à variabilidade de massa específica (real e aparente) e de calor específico de seus constituintes, conforme pode se observar nos dados da Tabela 2. Além disso, estudos anteriores (PERAZZINI *et al.*, 2010) verificaram ainda que cada

componente do resíduo possui características particulares de transportar calor e massa e apresentam diferentes interações físico-químicas entre a umidade associada ao material e o ar de secagem.

4.2 Experimentos de secagem

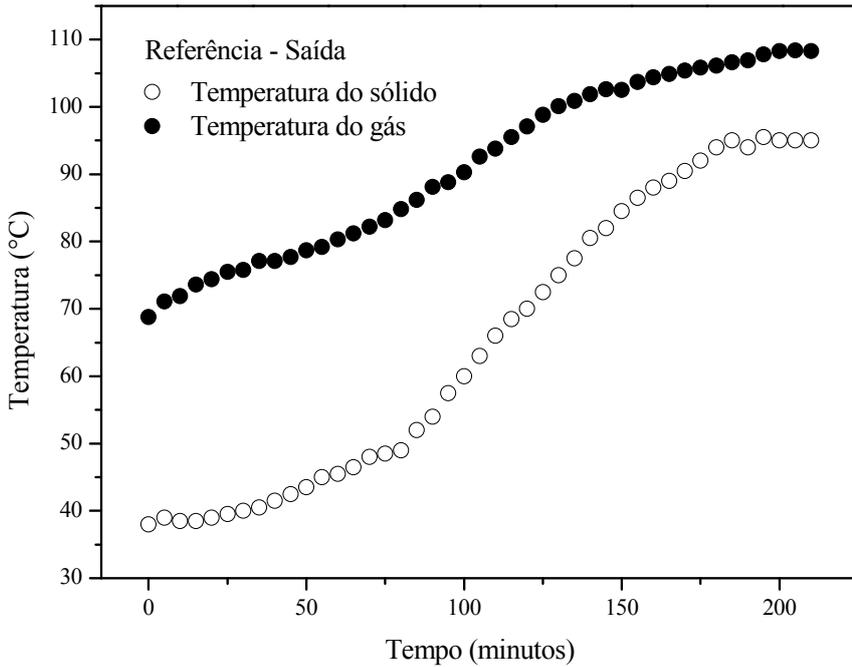
Inicialmente, na Figura 3, é apresentada a evolução da temperatura do resíduo sólido em função do tempo de secagem para as três condições de temperaturas de entrada e velocidade de gás de 2 m/s e vazão de sólidos de 0,4 kg/min. Quando é dado início ao processo de secagem com reciclo dos sólidos ($t = 0$), logo nos instantes iniciais a temperatura do material particulado se eleva em regime transiente e a influência da temperatura de entrada do gás torna-se fundamentalmente significativa apenas nos instantes finais, quando o sólido atinge um baixo grau de umidade e a taxa de secagem é próxima a zero.

Figura 3 - Temperatura do sólido em função do tempo para diferentes temperaturas de entrada de ar



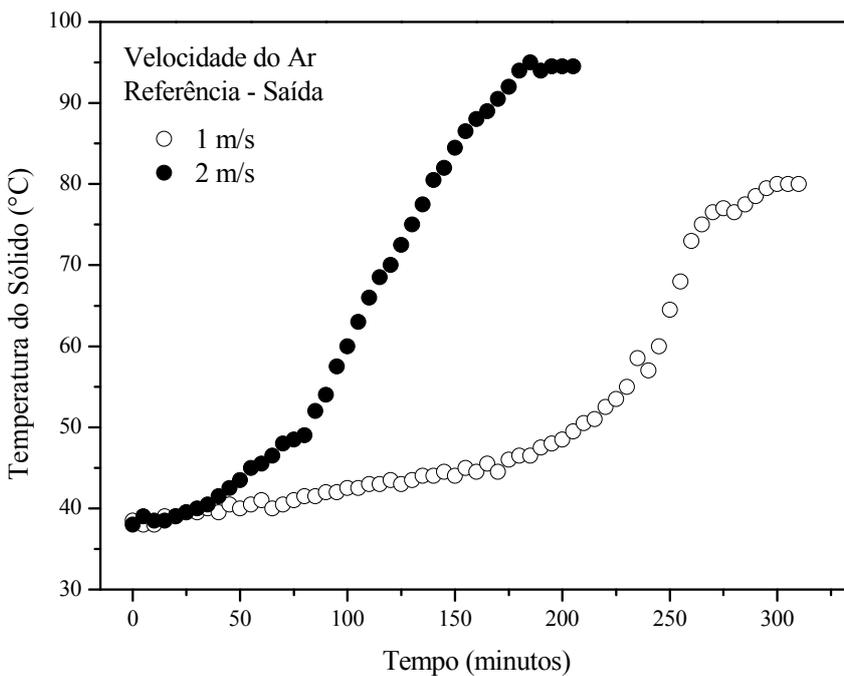
A partir do instante no qual a elevação da temperatura do sólido ocorre de maneira mais acelerada, em $t \approx 90$ minutos, a concentração de líquido em sua superfície é pequena e os mecanismos difusivos de transferência de massa passam a predominar no processo de secagem. Neste período, a transferência de calor entre as fases não é mais compensada e grande parte da energia responsável pela evaporação da água fica disponível para ser utilizada como calor sensível e elevar a temperatura do sólido até que esta, finalmente, atinja o estado estacionário e entre em equilíbrio com a temperatura da fase gasosa, obtida na saída do secador (Figura 4).

Figura 4 - Temperatura das fases em função do tempo ($v_g = 2 \text{ m/s}$, $T_g^E = 145 \text{ }^\circ\text{C}$ e $\dot{m}_s = 0,4 \text{ kg/min}$)



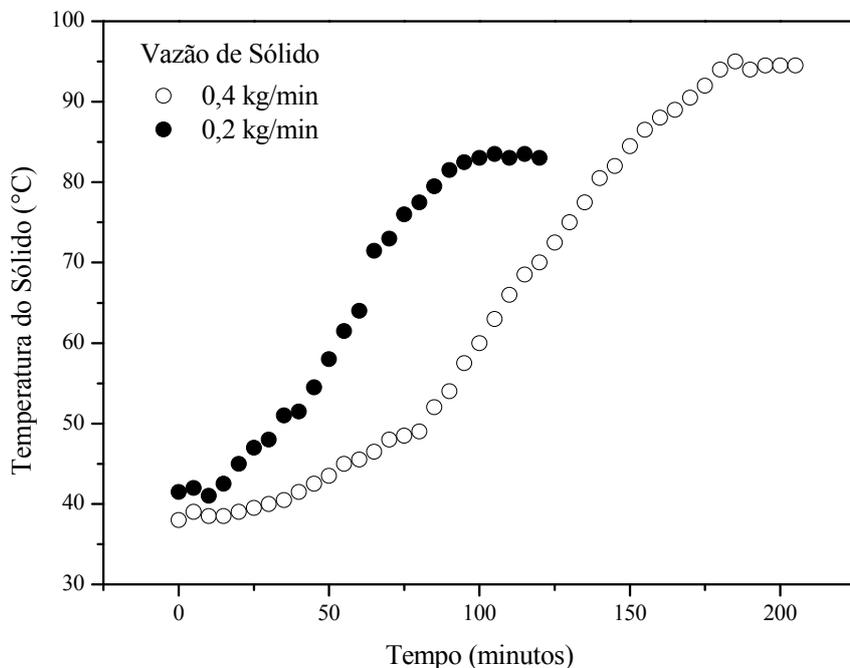
Na Figura 5 é apresentada a influência da velocidade do gás na evolução da temperatura do sólido com o tempo de secagem para a temperatura de entrada de $145 \text{ }^\circ\text{C}$ e vazão de sólidos de $0,4 \text{ kg/min}$. Observando as curvas experimentais, verifica-se, como esperado, que o aumento da velocidade proporciona um maior aquecimento e elevação da temperatura do sólido devido a uma maior energia térmica que é transportada para o interior do secador durante o processo de secagem.

Figura 5 - Temperatura do sólido em função do tempo ($T_g^E = 145 \text{ }^\circ\text{C}$ e $\dot{m}_s = 0,4 \text{ kg/min}$)



Para o caso em que se analisa o efeito da vazão mássica de alimentação de resíduo (Figura 6), nota-se que a temperatura do sólido aumenta de maneira muito mais lenta para a maior condição de vazão estudada (0,4 kg/min), até atingir um valor máximo ao término da secagem quando o equilíbrio entre as fases é estabelecido.

Figura 6 - Temperatura do sólido em função do tempo ($T_g^E = 145\text{ °C}$ e $v_g = 2\text{ m/s}$)



Em complemento a estes resultados, é possível verificar na Figura 7, que a temperatura da fase gasosa, especialmente para aquela condição de alimentação, apresenta os menores valores durante todo o experimento e tende ao equilíbrio para tempos longos de secagem. Isso porque, com o aumento da área de troca térmica, a corrente de ar aquecida em contato com uma maior quantidade de resíduo transfere mais energia para promover o aquecimento do sólido e dar início ao processo de evaporação da umidade.

As curvas de temperatura do ar de secagem em função do tempo se estabelecem de forma semelhante às curvas de temperatura do sólido apresentadas anteriormente. À medida que ocorre a secagem dos resíduos, a taxa de secagem diminui e menos umidade é transferida para a corrente de ar na forma de vapor. Em consequência, a temperatura da fase gasosa se eleva, atingindo valores mais acentuados ao término da secagem (Figura 8).

Figura 7 - Temperatura do ar de secagem em função do tempo ($T_g^E = 145\text{ }^\circ\text{C}$ e $v_g = 2\text{ m/s}$)

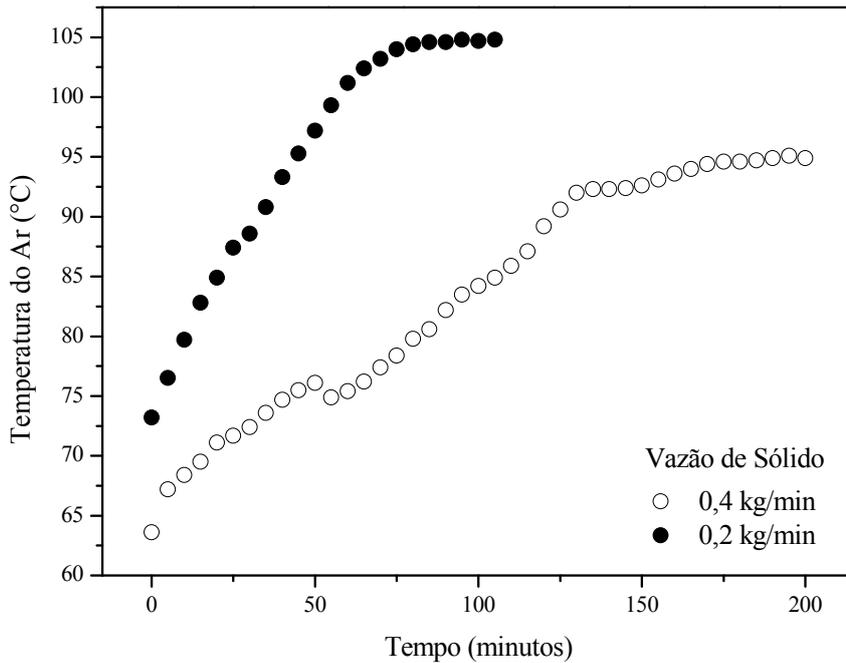
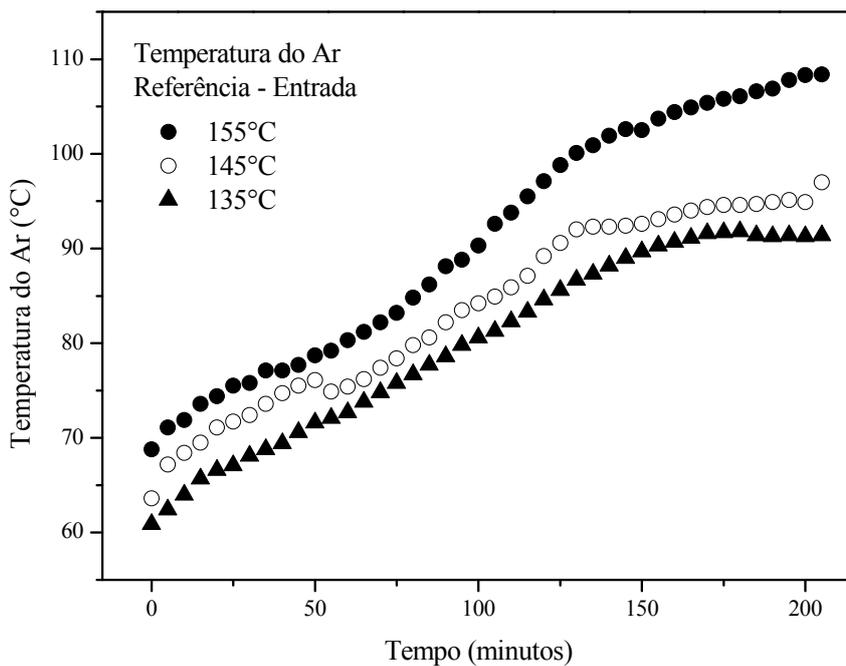
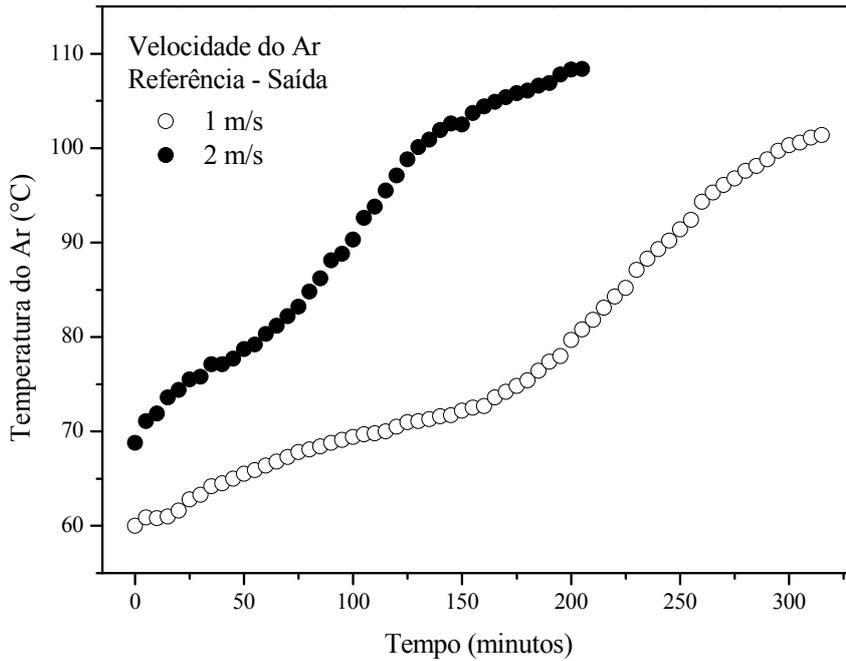


Figura 8 - Temperatura do ar de secagem em função do tempo ($v_g = 2\text{ m/s}$ e $\dot{m}_s = 0,4\text{ kg/min}$)



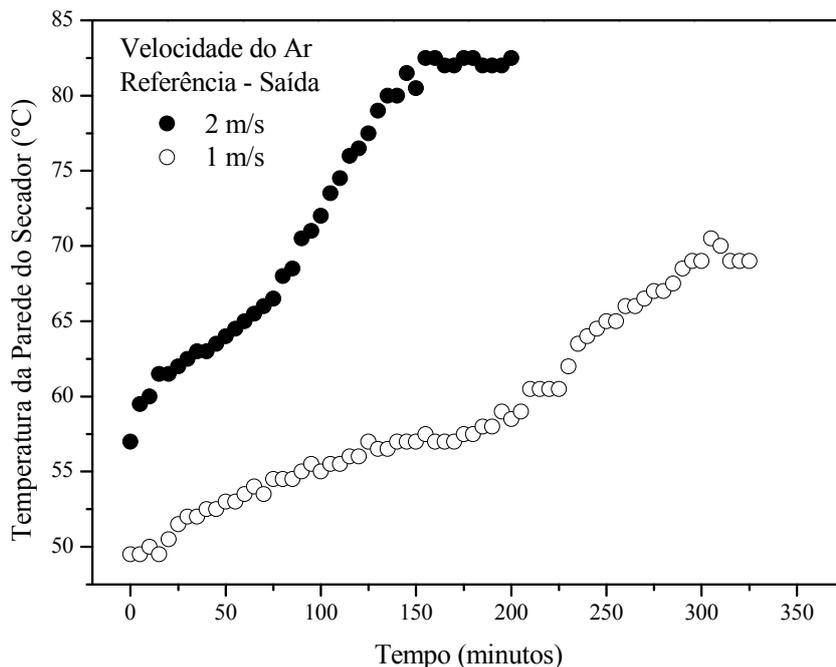
No regime transiente, quando a temperatura da corrente de ar obtida na saída do secador é função apenas do tempo, é possível observar que esta variável atinge os valores mais acentuados durante todo o processo de secagem nos experimentos em que a velocidade do gás é maior ($v_g = 2\text{ m/s}$), conforme pode ser observado na Figura 9. Resultados similares também foram observados por Ademiluyi *et al.* (2010).

Figura 9 - Temperatura do ar de secagem em função do tempo ($T_g^E = 155\text{ }^\circ\text{C}$ e $\dot{m}_s = 0,4\text{ kg/min}$)



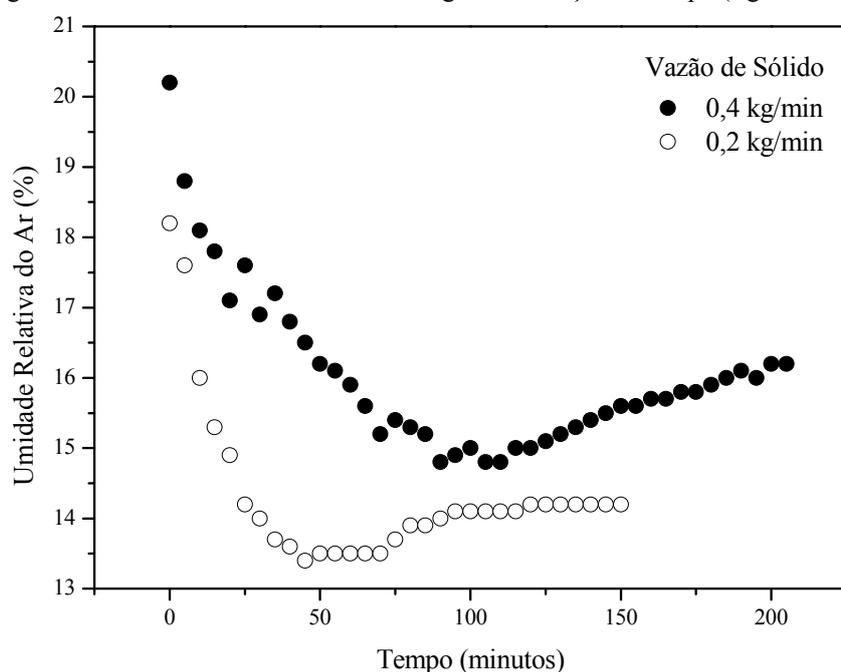
A influência do aumento da velocidade do ar também pode ser verificada na temperatura da parede do secador ao longo do processo de secagem (Figura 10), cujo ponto de medida localizava-se na saída do equipamento. Pode-se constatar que em ambos os casos apresentados, o mecanismo convectivo, influenciado pelas condições fluidodinâmicas do sistema, exerce influência expressiva na transferência de calor parede-fluido. Os elevados valores de temperatura encontrados para ambos os casos, principalmente ao término do processo, indicam que a resistência à transferência de calor é pequena e que a perda de energia pelas paredes do equipamento é significativa.

Figura 10 - Temperatura da parede do secador em função do tempo ($T_g^E = 155\text{ }^\circ\text{C}$ e $\dot{m}_s = 0,4\text{ kg/min}$)



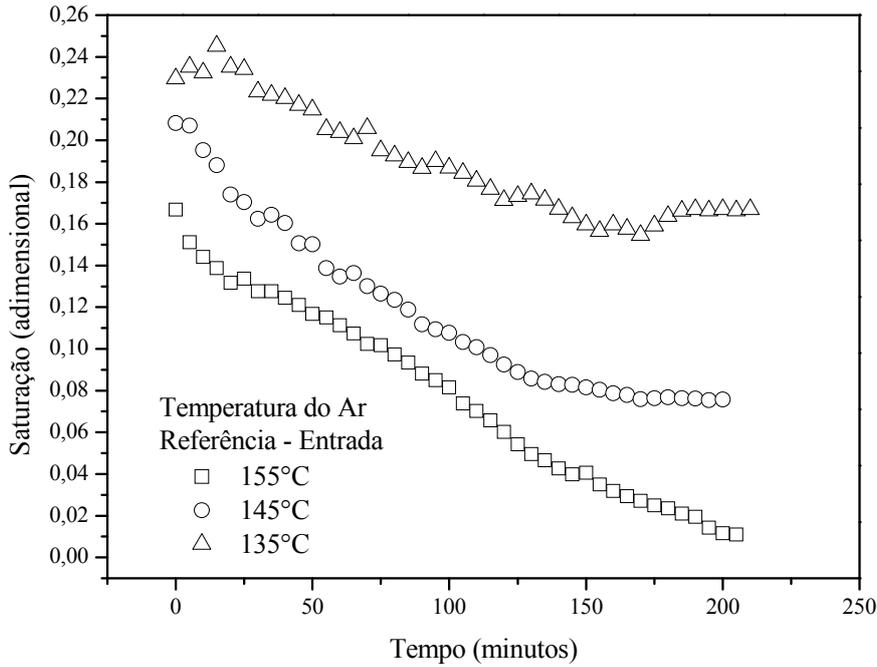
A partir das medidas de umidade relativa do ar de secagem determinadas na saída do secador rotativo, conforme mostra a Figura 11, foram obtidos perfis experimentais de umidade da fase gasosa em função do tempo de secagem para as duas condições de vazão de sólido. Para ambos os casos avaliados, quando se inicia a transferência de umidade contida no material para a corrente de ar na forma de vapor, a umidade relativa da fase gasosa decresce exponencialmente até um momento em que aparenta ser o estado estacionário ($t=50$ minutos e $t=100$ minutos para a menor e maior condição de vazão de sólido, respectivamente). Entretanto, quando a parcela de água existente no sólido torna-se pequena, a umidade relativa aumenta até o momento em que se iguala ao valor obtido na entrada do equipamento.

Figura 11 - Umidade relativa do ar de secagem em função do tempo ($T_{gE} = 155$ °C e $v_g = 2$ m/s)



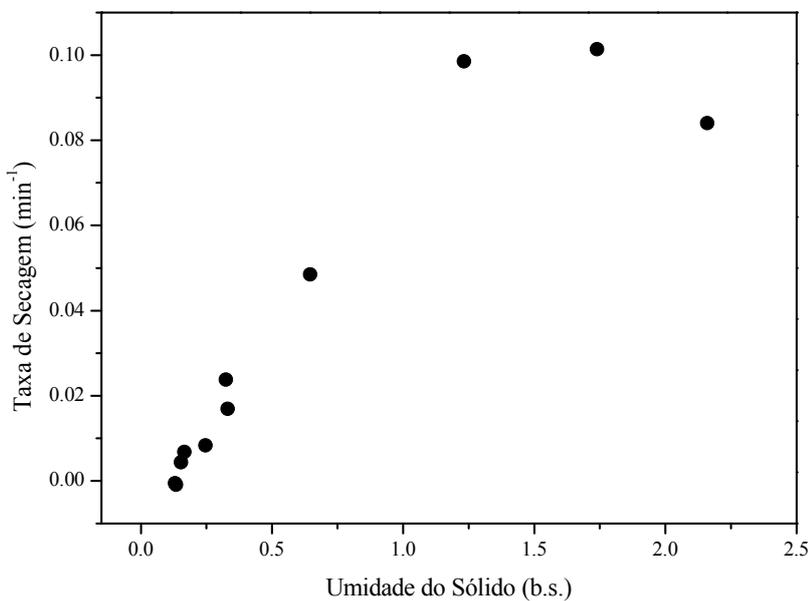
O grau de saturação da fase gasosa (relação entre a umidade absoluta real do ar e a umidade absoluta do ar saturado) em função do tempo apresenta comportamento decrescente semelhante. Neste caso, a corrente de ar deixa o secador com baixo grau de umidade nos instantes finais do processo de secagem, sugerindo uma menor transferência de massa entre as fases durante este período (Figura 12). Ainda merece ser destacado que o incremento da energia térmica favorece a elevação da pressão de vapor do sistema gás-líquido, nas mesmas condições de vazão de sólido e velocidade do gás. Isso implica em valores mais reduzidos de saturação que são encontrados para as maiores temperaturas de entrada de ar.

Figura 12 - Saturação do ar em função do tempo ($v_g = 2 \text{ m/s}$ e $\dot{m}_s = 0,4 \text{ kg/min}$)



Através das medidas de umidade do sólido em função do tempo, tornou-se possível a obtenção das curvas de cinética e de taxa de secagem dos resíduos cítricos no secador rotativo. A Figura 13 mostra, como exemplo, a taxa de secagem do resíduo cítrico em função da umidade em base seca para a temperatura de entrada do ar de 145 °C, vazão mássica de sólido de 0,2 kg/min e velocidade do ar de 2 m/s. É possível verificar que, inicialmente, o sólido apresenta uma fase de aquecimento, seguido do período à taxa constante e da prevalência do período à taxa decrescente nas etapas finais do processo. Estes resultados também foram observados para as demais condições operacionais estudadas.

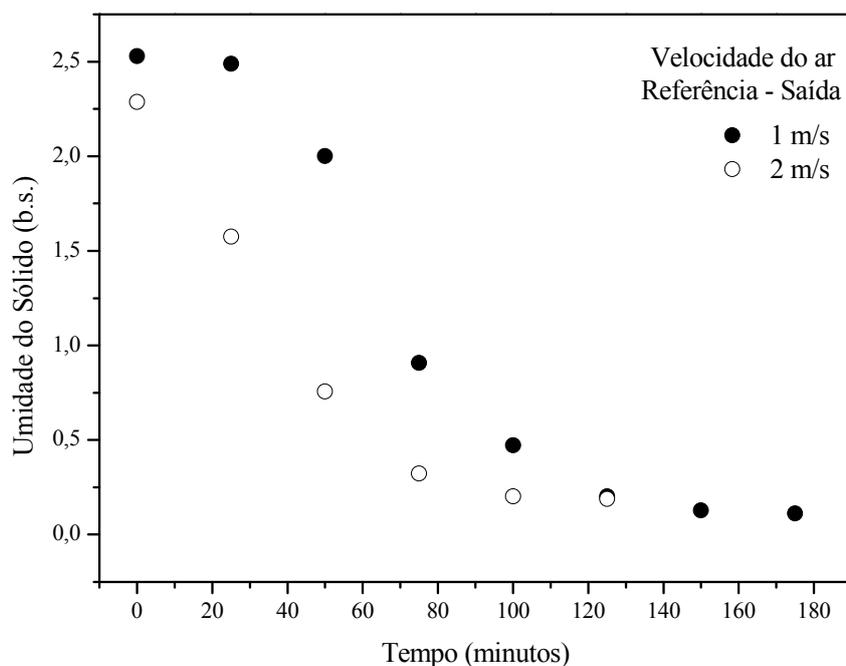
Figura 13 - Taxa de secagem do resíduo cítrico



Uma vez que o período de aquecimento do sólido deve-se a este estar a uma temperatura abaixo da temperatura de bulbo úmido do ar, o período à taxa constante, nestes casos, é caracterizado pelo equilíbrio entre a transferência de massa e energia, o qual é ocasionado pela existência de água de superfície presente no resíduo cítrico. Na etapa seguinte (período à taxa de secagem decrescente), quando a umidade crítica é atingida, prevalecem os mecanismos difusivos de transferência de massa e a umidade contida no interior do resíduo sólido difunde através da estrutura do material para ser evaporada em sua superfície, diminuindo significativamente a taxa de secagem.

Os dados obtidos de cinética de secagem do resíduo cítrico no secador rotativo são apresentados nas Figuras 14 a 16. As curvas de umidade do resíduo sólido em função do tempo indicam a influência da velocidade do gás na cinética de secagem, mostrando, mais uma vez, a importância do fenômeno convectivo no processo (Figura 14).

Figura 14 - Umidade do sólido em função do tempo ($T_g^E = 155\text{ }^\circ\text{C}$ e $\dot{m}_s = 0,2\text{ kg/min}$)



A Figura 15 apresenta as curvas de cinética de secagem para as temperaturas de entrada do gás estudadas. Ao se analisar simultaneamente as Figuras 15 e 16, verifica-se que a importância da velocidade mostra-se preponderante em relação à variação da temperatura de entrada do ar, que não apresenta influência qualitativamente significativa no processo de secagem dos resíduos cítricos no secador rotativo.

Figura 15- Umidade do sólido em função do tempo ($v_g = 2 \text{ m/s}$ e $\dot{m}_s = 0,2 \text{ kg/min}$)

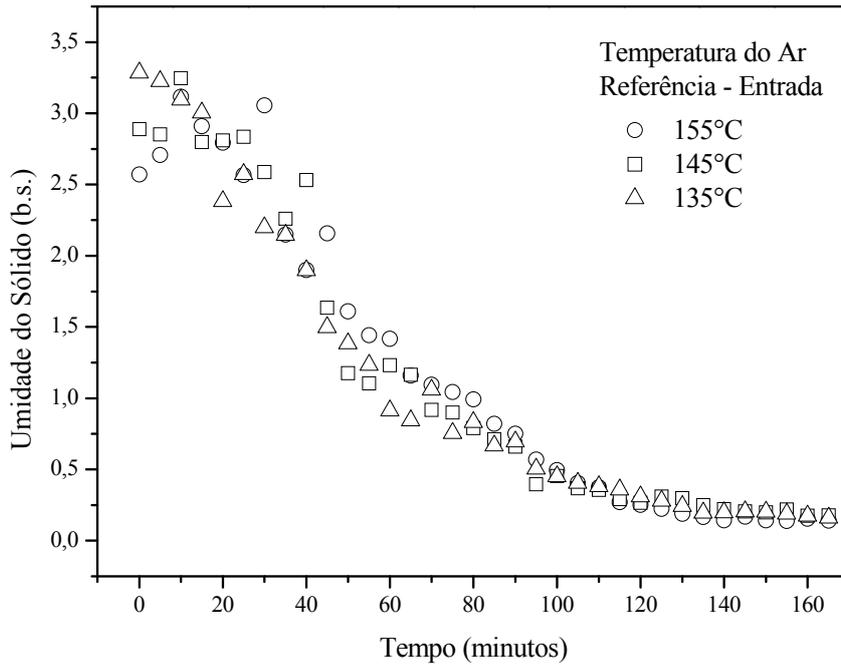
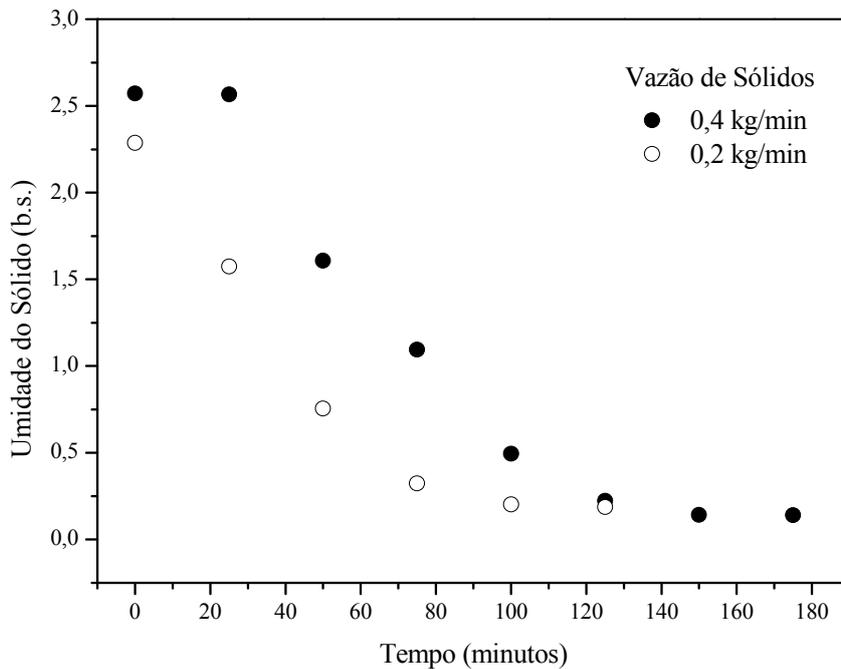


Figura 16 - Umidade do sólido em função do tempo ($v_g = 2 \text{ m/s}$ e $T_{gE} = 155^\circ \text{ C}$)



A Figura 16 traz as curvas de umidade do resíduo em função do tempo para as duas vazões de sólido estudadas. Verifica-se que o conteúdo de umidade presente no sólido é sempre maior para a maior condição de alimentação ($\dot{m}_s = 0,4 \text{ kg/min}$), resultando em tempos mais longos de secagem. Nessa situação, aumentando a retenção de sólidos no interior do secador, o gás satura de umidade e consome mais rapidamente a sua capacidade de remoção de água e, por conseguinte, os coeficientes globais de transferência de massa tendem a apresentar valores menos expressivos. Estes resultados também foram observados por outros autores (AUDU, 1983; TAIWO *et al.*, 2010).

É ainda importante ressaltar que, para os resultados apresentados pelas curvas de cinética de secagem e também para os demais obtidos pelas outras condições operacionais empregadas, obteve-se um teor de umidade em base seca próximo a 0,4 kg água/kg sólido seco. Este valor confere uma reduzida presença de umidade no produto final, o que proporciona um armazenamento seguro em diferentes condições de estocagem e, principalmente, um material seco que pode ser aproveitado como um subproduto em diversos processos, principalmente os citados no item 2 deste trabalho.

5 Conclusões

Os estudos experimentais de secagem dos resíduos cítricos em secador rotativo de escoamentos concorrentes, o qual operou com alimentação contínua e recirculação da fase sólida, proporcionaram curvas de umidade e temperatura em função do tempo com comportamento esperado. Após o início do processo, as temperaturas da parede do secador e das fases sólida e fluida elevam-se rapidamente à medida que a umidade contida no resíduo é transferida para a corrente de ar. Este fenômeno se estabelece até o momento no qual o sólido atinge baixo grau de umidade. Os perfis de umidade relativa do ar em função do tempo exibiram duas regiões distintas: uma região transiente, referente ao período em que há uma maior transferência de massa e um novo patamar de umidade, quando a taxa de secagem é próxima a zero e as fases existentes no processo tendem ao equilíbrio. Assim, a secagem dos resíduos cítricos em secador rotativo pode ser controlada através do monitoramento das variáveis de saída, como por exemplo, a umidade relativa e a temperatura da fase gasosa.

As curvas de umidade do sólido em função do tempo apresentaram característica exponencial decrescente. A partir dos dados de taxa de secagem em função da umidade do resíduo sólido foi possível observar a existência de dois períodos de taxa de secagem: período de taxa constante e período de taxa decrescente. Verificou-se ainda, nas condições operacionais estudadas, que a velocidade do fluido mostrou-se mais influente em relação à variação da temperatura de entrada do ar na cinética de secagem do resíduo sólido no secador rotativo.

O equipamento utilizado mostrou-se adequado para a secagem de um material coesivo e heterogêneo, constituído por partículas de diferentes formas, tamanhos, geometrias e massa específica. Merece ser destacado ainda que, apesar de apresentar características termofísicas heterogêneas, o material estudado responde ao processo de secagem da mesma maneira que outros materiais considerados usuais e homogêneos. Assim, o equipamento e os procedimentos experimentais empregados neste trabalho podem ser utilizados também para estes casos, e o resíduo sólido cítrico não requer modificações em suas características, equipamentos e condições especiais e diferentes para que a secagem possa ser estudada.

Finalmente, a secagem apresentou-se como uma alternativa ambiental-tecnológica viável para o tratamento térmico de resíduos sólidos cítricos, empregando-se a técnica de leito móvel através de secador rotativo. Obteve-se como produto final um material seco com reduzido teor de umidade, proporcionando seu uso como sub-produto em diferentes técnicas de aproveitamento.

Nomenclatura

c_p	calor específico	[J/g.K]
ρ_{ap}	densidade aparente	[g/cm ³]
ρ_r	densidade real	[g/cm ³]
\dot{m}_s	vazão mássica de resíduo	[kg/min]
T_g	temperatura do gás	[°C]
T_p	temperatura da parede	[°C]
T_s	temperatura do sólido	[°C]
T_g^E	temperatura de entrada do gás	[°C]
UR	umidade relativa do ar	[-]
v_g	velocidade do gás	[m/s]
Y_g	umidade do gás	[% , b.u.]
Y_s	umidade do sólido	[% , b.u.]

Agradecimentos

Os autores agradecem o CNPq pelo auxílio financeiro.

Referências

- ADAPA, P. K.; SCHOENAU, G. J.; ARINZE, E. A. Fractionation of alfafa into leaves and stems using a three pass rotary drum dryer. **Biosystems Engineering**, v. 91, n. 4, p. 455–463, 2004.
- ADEMILUYI, F. T. *et al.* Effects of drying parameters on heat transfer during drying of fermented ground cassava in a rotary dryer. **Drying Technology**, v. 28, n. 4, p. 550–561, 2010.
- ARJONA, R.; OLLERO, P.; VIDAL, F. Automation of an olive waste industrial rotary dryer. **Journal of Food Engineering**, v. 68, n. 2, p. 239–247, 2005.
- AUDU, T. O. K. Determination of the optimum parameter of rotary dryer for gari processing. **The Chemical Engineering Journal**, v. 26, n. 2, p. 157–163, 1983.
- BACELOS, M. S.; JESUS, C. D. F.; FREIRE, J. T. Modelling and drying of carton packaging waste in a rotary. **Drying Technology**, v. 27, n. 9, p. 927–937, 2009.
- BAKER, C. G. J. The design of flights in cascading rotary dryers. **Drying Technology**, v. 6, n. 2, p. 631–653, 1988.
- CARVALHO, M. S. L.; SILVA, M. G. C. Infectious hospital waste: evaluation of a tray dryer for volume and microbiological load reduction. **Drying Technology**, v. 24, n. 4, p. 517–522, 2006.
- CELMA, A. R.; CUADROS, F.; LÓPEZ-RODRIGUES, F. Characterization of industrial tomato by-products from infrared drying process. **Food and Bioproducts Processing**, v. 87, n. 4, p. 282–291, 2009.
- BAMPIDIS, V. A.; ROBINSON, P. H. Citrus by-products as ruminant feeds: A review. **Animal Feed Science and Technology**, v. 128, n. 3-4, p. 175-217, 2006.

- DAHAKAL, R. P.; GHIMIRE, K. N.; INOUE, K. Adsorptive separation of heavy metals from an aquatic environment using orange waste. **Hydrometallurgy**, v. 79, n. 3-4, p. 182–190, 2005.
- DOYMAZ, I.; GOREL, O.; AKGUN, N. A. Drying characteristics of the solid by-product of olive oil extraction. **Biosystems Engineering**, v. 88, n. 2, p. 213-219, 2004.
- FERREIRA-LEITÃO, V. *et al.* Biomass Residues in Brazil: Availability and Potential Uses. **Waste and Biomass Valorization**, v. 1, n. 1, p. 65–76, 2010.
- FINZER, J. R. D.; LIMAVERDE, J. R.; LIMAVERDE Jr., J. R. Pastelike materials drying in a rotary dryer with inert bed. **Perspectiva**, v. 26, n. 95, p. 55–59, 2002.
- GUERRERO, O. C.; BRITTO, J. C. Re-use of industrial orange wastes as organic fertilizers. **Bioresource Technology**, v. 53, n. 1, p. 43–51, 1995.
- HEERDEN, I. V. *et al.* Microbial, chemical and physical aspects of citrus wastes composting. **Bioresource Technology**, v. 81, n. 1, p. 71 – 76, 2002.
- HIMMELBLAU, D. M. **Process Analysis by Statistical Methods**. New York: John Wiley, 1970. 463 p.
- IGUAZ, A. *et al.* Mathematical modeling and simulation for the drying process of vegetable wholesale by-products in a rotary dryer. **Journal of Food Engineering**, v. 59, n. 2, p. 151–160, 2003.
- KELLY, J. J. Flight design in rotary dryers. **Drying Technology**, v. 10, n. 4, p. 979–993, 1992.
- KROKIDA, M. K.; MAROULIS, Z. B.; KREMALIS, C. Process design of rotary dryers for olive cake. **Drying Technology**, v. 20, n. 4–5, p. 771–788, 2002.
- KUDRA, T. *et al.* Drying of pulp and paper sludge in a pulsed fluid bed dryer. **Drying Technology**, v. 20, n. 4-5, p. 917–933, 2002.
- LANGRISH, T. A. G.; PAPADAKIS, S. E.; BAKER, C. G. J. Residence times of two- and three-component mixtures in cascading rotary dryers. **Drying Technology**, v. 20, n. 2, p. 325–350, 2002.
- LOHRASBI, M. *et al.* Process design and economic analysis of a citrus waste biorefinery with biofuels and limonene as products. **Bioresource Technology**, v. 101, n. 19, p. 7382–7388, 2010.
- LOPEZ, A. *et al.* Thin-layer drying behaviour of vegetable wastes from wholesale market. **Drying Technology**, v. 18, n. 4-5, p. 995-1006, 2000.
- MAMMA, D.; KOURTOGLOU, E.; CHRISTAKOPOULOS, P. Fungal multienzyme production on industrial by-products of the citrus-processing industry. **Bioresource Technology**, v. 99, n. 7, p. 2373–2383, 2008.
- MARÍN, F. R. *et al.* By-products from different citrus processes as a source of customized functional fibres. **Food Chemistry**, v. 100, n. 2, p. 736–741, 2007.
- NONHENBEL, G.; MOSS, A. A. H. **Drying of solids in the chemical industry**. London: Butterworth, 1971. 400 p.
- PASSOS, M. L. *et al.* Drying of black liquor in spouted bed of inert particles. **Drying Technology**, v. 22, n. 5, p. 1041–1067, 2004.
- PERAZZINI, H. **Secagem de resíduos cítricos em secador rotativo**. 2011. 86 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2011.
- PERAZZINI, H.; BÉTTEGA, R.; FREIRE, J. T. Hygroscopic properties of solid waste from orange juice industry. In: INTERNATIONAL DRYING SYMPOSIUM, 17., 2010, Magdeburg, Germany. **Anais...** Magdeburg: IDS, 2010.
- PINACHO, P. A. *et al.* Study of drying systems for the utilization of biodegradable municipal solids waste as animal feed. **Waste Management**, v. 26, n. 5, p. 495–503, 2005.
- RAEISSI, S. *et al.* Ethane as an alternative solvent for supercritical extraction of orange peel oils. **Journal of Supercritical Fluids**, v. 45, n. 3, p. 306–313, 2008.

- REYES, A. *et al.* Drying kinetics of sludge from a wastewater treatment plant. **Drying Technology**, v. 22, n. 9, p. 2135–2150, 2004.
- SAHRAOUI, N. *et al.* Valorization of citrus by-products using Microwave Steam Distillation (MSD). **Innovative Food Science and Emerging Technologies**, v. 12, n. 2, p. 163–170, 2011.
- SENEVIRATHNE, M. *et al.* Effective drying of citrus by-product by high speed drying: A novel drying technique and their antioxidant activity. **Journal of Food Engineering**, v. 92, n. 2, p. 157–163, 2009.
- SHAHHOSSEINI, S.; CAMERON, I. T.; WANG, F. Y. A dynamic model with on-line identification for rotary sugar drying process. **Drying Technology**, v. 19, n. 9, p. 2103–2129, 2001.
- SREENATH, H. K.; CRANDALL, F. G.; BAKER, R. A. Utilization of Citrus By-Products and Wastes as Beverage Clouding Agents. **Journal of Fermentation and Bioengineering**, v. 80, n. 2, p. 190–194, 1995.
- SONG, Y.; THIBAUT, J.; KUDRA, T. Dynamic characteristics of solids transportation in rotary dryers. **Drying Technology**, v. 21, n. 5, p. 755–773, 2003.
- TAIWO, A. F. *et al.* Effects of drying parameters on the drying kinetics of fermented ground cassava using a rotary dryer. **International Journal of Food Engineering**, v. 6, n. 6, 2010.
- TRIPODO, M. M. *et al.* Citrus waste recovery: a new environmentally friendly procedure to obtain animal feed. **Bioresource Technology**, v. 91, n. 2, p. 111–115, 2004.
- VEGA-GÁLVEZ, A. *et al.* Mathematical modeling on the drying process of yellow squat lobster fishery waste for animal feed. **Animal Feed Science and Technology**, v. 151, n. 3-4, p. 268–279, 2009.
- XU, Q.; PANG, S. Mathematical modeling of rotary drying of woody biomass. **Drying Technology**, v. 26, n. 11, p. 1344–1350, 2008.