



UNICAMP

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA

ENGENHARIA DE PROCESSOS

*Estudo da secagem em leito de jorro, com condições operacionais intermitentes, de grãos de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.), variedade “carioca”*

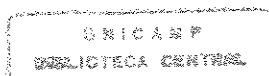
Carlos Alberto de Oliveira

ORIENTADORA: SANDRA CRISTINA DOS SANTOS ROCHA

Tese de Mestrado apresentada à Faculdade de Engenharia Química como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Química.

CAMPINAS

SETEMBRO DE 1999



96 t. 30

IADE	BC
CHAMADA:	
Ex.	
BO BO/	39519
2.	229199
	☐ 0 ☒ 2
3.	R\$ 11,00
	24-11-99
PO	

CM-00137135-3

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

OL4e Oliveira, Carlos Alberto de
 Estudo da secagem em leito de jorro, com condições operacionais intermitentes, de grãos de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.), variedade "carioca". / Carlos Alberto de Oliveira.--Campinas, SP: [s.n.], 1999.

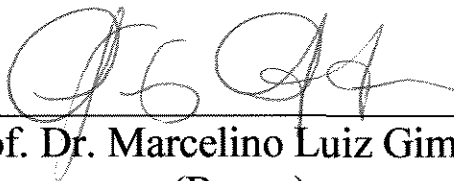
 Orientador: Sandra Cristina dos Santos Rocha
 Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Química.

 1. Secagem. 2. Feijão. 3. Grãos - Secagem. I. Rocha, Sandra Cristina dos Santos. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Química. III. Título.

Tese de Mestrado defendida e aprovada em 16 de Setembro de 1999
pela Banca Examinadora constituída pelos Professores Doutores:



Prof.^a. Dra. Sandra Cristina dos Santos Rocha
(Orientadora)



Prof. Dr. Marcelino Luiz Gimenes
(Banca)



Prof. Dr. Dermeval José Mazzini Sartori
(Banca)

Este exemplar corresponde à redação final da Tese de Mestrado em Engenharia Química defendida por Carlos Alberto de Oliveira e aprovada pela Comissão Julgadora em 16 de setembro de 1999.



Prof.^a Dr.^a Sandra Cristina dos Santos Rocha

Dedico este trabalho a minha esposa,

Flaviana Salles Ultchak

AGRADECIMENTOS

A Coordenação e Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES e a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP pelo apoio financeiro recebido para a realização desta dissertação.

A Universidade Estadual de Campinas pela oportunidade oferecida para a realização do Curso de Mestrado em Engenharia de Processos.

A Professora Dra. Sandra Cristina dos Santos Rocha pela orientação e amizade recebida no decorrer deste Curso.

Aos funcionários do Departamento de Termofluidodinâmica.

Em especial aos meus pais Manuel Neri de Oliveira e Maria Aparecida Gello de Oliveira, meu Avô José Gello Gabarro (em memória), pelo grande incentivo e apoio não só neste momento mas ao longo de todas as nossas vidas.

A minha esposa Flaviana Salles Ultchak pelo carinho, confiança, dedicação e compreensão durante todo este Curso.

RESUMO

A secagem de grãos consiste em retirar parte da água existente no produto de modo a diminuir seu teor de umidade, reduzindo a atividade biológica, crescimento de fungos, ataque de microorganismos e insetos, e possibilitando o seu armazenamento por longos períodos de tempo. O feijão comum (*Phaseolus vulgaris* L.) é um grão de elevado teor nutritivo, principalmente com relação à quantidade de proteínas, ferro e potássio, além de ser uma fonte de carboidratos, lipídios, fibras e vitaminas hidrossolúveis. A umidade do feijão recém colhido é demasiadamente alta para boas condições de conservação e armazenamento, necessitando, passar por um processo de secagem, antes da embalagem. Este trabalho teve como objetivo estudar e analisar o processo de secagem do feijão em leito de jorro, escala laboratorial, com condições operacionais contínuas e intermitentes quanto ao aquecimento e ao regime fluidodinâmico, do ar de secagem. Os experimentos em regime intermitente contemplaram dois tipos de regime: leito de jorro/leito fixo e leito de jorro/descanso. Uma montagem em escala de laboratório e operada em batelada foi utilizada, contendo um secador construído em acrílico, com a base cônica e a coluna cilíndrica. Para a obtenção dos dados experimentais utilizou-se a técnica de planejamento fatorial a 2 níveis, sendo avaliadas as influências das seguintes variáveis de processo: temperatura do ar de secagem, com valores de 80 e 60°C, umidade inicial dos grãos, com valores de 30 e 20%b.s., e tempo de intermitência da fonte de aquecimento e/ou fornecimento de ar, com valores de 40 e 20 minutos. Foram realizados dezesseis experimentos de secagem intermitente e obtidas as curvas de secagem, as curvas de taxas de secagem, a cinética de secagem, a variação da temperatura do grão e a análise da eficiência energética do processo. Os resultados obtidos foram comparados com os resultados da secagem do mesmo material, em condições contínuas do ar, ou seja, em leito de jorro durante todo o período de secagem. A comparação demonstrou que o produto obtido com secagem intermitente atende ao nível exigido de qualidade quanto à umidade final e temperatura do grão, para a faixa experimental dos parâmetros de processo investigadas. A análise energética do processo indica resultados promissores de melhora na eficiência de secagem para as condições intermitentes, principalmente trabalhando-se com leito de jorro/descanso, ou seja, intermitência com interrupção no suprimento de ar ao leito.

ABSTRACT

The drying of grains consists on removing part of the water from the product providing a decrease in its moisture content, and thus reducing biological activity, growth of fungus, attacks by microorganisms and insects, which allows the grains storage for long periods. Beans, type *Phaseolus vulgaris* L., have a high nutrition value, specially with a relation to quantify of proteins, iron and potassium. This type of the grains is also a carbohydrate, lipids, fibers and vitamins source. The moisture content of the post harvest bean is too high to good conditions of conservation and storage. The objective of this work was to study and analyse the drying of beans in a spouted bed, laboratory scale, in continuous and intermitent conditions of the drying air. Intermitence was applied in the heating supply to the bed and in the fluid-dynamic regime. The intermitent drying experiments were conducted in different conditions: spouted bed/fixed bed (intermitence in the dynamic regime) and spouted bed/"rest" (intermitence in the air supply). The dryer was made in plexyglass with a conical base and a cylindrical column. A 2^3 factorial planning technique was applied to the experimental data and the variables analysed were: air temperatures of 60°C and 80°C, initial moisture contents of 20 and 30% db, and intermitence of heating supply and/or air supply of 20 and 40 minutes. For 16 experimental runs the drying curves, drying rates and grain temperature curves were obtained. And the drying kinetics and the energetic efficiency of the drying processes were analysed. The results were compared to the ones obtained with continuous conditions of the drying air (spouted bed drying without intermitence). The results showed that the product obtained with intermitent drying attains the required quality for final moisture content and grains temperature, for the experimental conditions investigated. The energetic evaluation indicated satisfactory and improved results for the intermitent drying, mostly in the experiments of spouted bed/"rest".

SUMÁRIO

RESUMO	v
NOMENCLATURA	ix
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DA LITERATURA	6
2.1 - Feijão	6
2.1.1. Propriedades físicas do feijão	7
2.1.1.1 Calor específico	8
2.1.1.2. Forma e tamanho dos grãos	9
2.2. Umidificação de Grãos	11
2.3 - Secagem	12
2.4 - Cinética de Secagem	13
2.5 - Equações de Secagem Semi-Empíricas e Empíricas	17
2.6 - Características da Secagem de Grãos	20
2.7- Leito Fixo	23
2.8 - Leito de Jorro	24
2.8.1 - Requisitos Para Obtenção do Jorro	25
2.8.2 - Queda de Pressão	29
2.8.3 - Queda de Pressão no Jorro	30
2.8.4 - Estabilidade no Jorro	30
2.9 - Secagem Intermitente	31
2.10 - Eficiência energética da secagem	32

3. Materiais, Equipamentos e Métodos Experimentais	35
3.1. Material Utilizado	35
3.2 – Equipamentos e procedimento Experimental	36
3.2.1. Umidificação de Grãos	36
3.2.2. Sistema experimental	39
3.2.3. Medidas experimentais	45
3.2.4. Secagem	48
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	53
4.1. Caracterização do processo	53
4.1.1. Reumidificação dos grãos	53
4.1.2. Obtenção das Vazões de trabalho	54
4.2. Aquisição dos dados experimentais	57
4.3. Resultados e análises do experimento I - Leito de jorro/fixo	59
4.3.1. Efeito da umidade inicial do grão	59
4.3.2. Efeito da temperatura do ar de admissão no leito	64
4.3.3. Efeito do tempo de intermitência no regime fluidodinâmico	69
4.4. Resultados e análises do experimento II - Leito de jorro/descanso	74
4.4.1. Efeito da umidade inicial do grão	74
4.4.2. Efeito da temperatura do ar de admissão no leito	79
4.4.3. Efeito do tempo de intermitência no regime fluidodinâmico e do aquecimento do ar	84
4.5. Análise Estatística da Secagem	90
4.5.1. Análise da razão de umidade RU (X_f/X_0)	90
4.5.1.1. Efeitos das variáveis e suas interações: leito de jorro/fixo - variável resposta X_f/X_0	90
4.5.1.2. Efeitos das variáveis e suas interações: leito de jorro/descanso - variável resposta X_f/X_0	92
4.5.2. Análise da Eficiência de Secagem (ES) e dos Coeficientes de Secagem (CS,LM)	94
4.5.2.1. Efeitos das variáveis e suas interações: leito de jorro/fixo - variável resposta ES	97
4.5.2.2. Efeitos das variáveis e suas interações: leito de jorro/fixo - variável resposta CS	98

4.5.2.3. Efeitos das variáveis e suas interações: leito de jorro/fixo - variável resposta LM	99
4.5.2.4. Efeitos das variáveis e suas interações: leito de jorro/descanso - variável resposta ES	100
4.5.2.5. Efeitos das variáveis e suas interações: leito de jorro/descanso - variável resposta CS	102
4.5.2.6. Efeitos das variáveis e suas interações: leito de jorro/descanso - variável resposta LM	103
4.6. Análise da Taxa de Secagem - Comparação entre os Regimes Intermitentes Utilizados - leito de jorro/fixo e leito de jorro/descanso	106
4.7. Cinética de Secagem	111
4.7.1. Curvas de secagem	111
4.8. Comparação entre os tipos de secagem	132
5. Conclusões	137
5.1. Sugestões para trabalhos futuros	138
Referências Bibliográficas	140

NOMENCLATURA

E = esfericidade, em porcentagem

d_e = diâmetro de uma esfera de volume igual ao do objeto, m

d_c = diâmetro da menor circunferência que circunscreve a projeção do objeto em repouso, m

ρ = massa específica dos sólidos, kg/m^3

P_s = massa dos sólidos, kg

P_a = massa do picnômetro com água, kg

P_t = massa do picnômetro com os sólidos e água, kg

W = vazão mássica de ar, (Kg/min)

c_p = calor específico, $\text{J.kg}^{-1}.\text{°C}^{-1}$

C = capacidade calorífica, J.°C^{-1}

m = massa do corpo, kg

•
 $\dot{m}$ = taxa de secagem

X = teor de umidade do produto, decimal, base seca

X_0 = teor de umidade inicial do produto, decimal, base seca

X_e = teor de umidade de equilíbrio do produto, decimal, base seca

m = massa média de sólidos durante o processo

m_s = massa de sólido seco.

$k = D.\pi^2/R^2$ = constante de secagem, h^{-1} ou min^{-1}

t = tempo, h ou min

“a” = coeficiente, geralmente, dependente da temperatura e da variedade do produto.

D_1 = coeficiente de difusão do produto, $\text{m}^2.\text{s}^{-1}$

R_E = raio da esfera equivalente, m

RU = razão de umidade, adimensional

H_m = altura máxima de jorro, m

U_{mf} = mínima velocidade de fluidização, m/s

ΔP_M = queda de pressão máxima no leito, kN/m^2

U_M = velocidade superficial do gás, m/s
 U_{MS} = velocidade de jorro mínimo, m/s
 ΔP_s = queda de pressão do jorro estável, kN/m²
 T = temperatura, °C
 $E.S.C.$ = consumo energético específico, kJ/kg água
 $E.C.R.$ = taxa de consumo específico, adimensional
 $b.s.$ = base seca
 $b.u.$ = base úmida
 EF = eficiência energética, adimensional
 $EFF2$ = coeficiente de secagem, adimensional
 ΔH = calor latente de vaporização, kJ / kg
 F = média das flutuações adquirida pela placa, em volts (V)
 Y = queda de pressão em milímetros de água, mm H₂O
 Δh = queda de pressão na placa de orifício, cmH₂O
 P = pressão estática na linha, cmH₂O
 Q = vazão do ar, Kg/min
 CS = coeficiente de secagem, kg água / kJ
 LM = coeficiente de secagem, adimensional

Subscritos

so = sólidos
 ag = água
 v = vaporização
 e = equilíbrio
 g = grãos
 ter = térmica
 o = inicial
 f = final

Letras Gregas

θ = temperatura em que a água é vaporizada, °C

η = eficiência energética de um secador, adimensional

1. INTRODUÇÃO

No mecanismo de sobrevivência e perpetuação das espécies as sementes e os grãos representam um processo em que a vida pode ser reiniciada com um novo plantio dessas sementes. Assim, as sementes são consideradas produtos nobres de alto valor agregado e são portadoras de determinadas características genéticas que fazem com que cerca de 1/3 a 3/4 da população mundial se alimentem de grãos de cereais e leguminosas. Decorrente dessa importância, as sementes e os grãos fazem parte da estratégia de desenvolvimento de qualquer país.

Segundo VIEIRA (1988), no mundo existem cerca de 20 espécies de leguminosas de grãos utilizadas na alimentação, no entanto, as mais importantes são o guandu (*Cajanus cajan*), o feijão-macassar (*Vigna unguiculata*), a ervilha (*Pisum sativum*), a lentilha (*Lens esculenta*), o grão-de-bico (*Cicer arietinum*), a fava (*Vicia faba*), o amendoim (*Arachis hypogaea*), a soja (*Glycine max*) e o feijão (*Phaseolus vulgaris*). No Brasil, para a alimentação humana, somente o feijão comum e o feijão-macassar são realmente importantes, as outras leguminosas têm expressão reduzida como alimento ou são utilizadas como oleaginosas, como é o caso da soja e do amendoim.

A produção nacional de feijão na safra de 92/93 foi de 2,38 milhões de toneladas e a de 93/94 foi de 3,1 milhões de toneladas, constatando-se um aumento de 30% na produção e consumo de feijão decorrentes do plano REAL, implantado no Brasil em 1993, que provocou um aumento no poder aquisitivo das classes sociais de renda mais baixa, devido a esta leguminosa pertencer aos produtos da cesta básica. Assim, o feijão por fazer parte da alimentação diária da população brasileira, e por possuir um teor de proteína em torno de 22%, é denominado de “carne do pobre” (SILVA, 1995).

O feijão destaca-se como importante fonte de proteína na dieta alimentar do povo brasileiro, sendo um prato quase obrigatório da população rural e urbana. Devido a sua boa adaptação às mais variadas condições climáticas do Brasil, o feijoeiro faz parte da maioria

dos sistemas produtivos dos pequenos e médios produtores, cuja produção é direcionada ao consumo familiar e à comercialização.

Cultivado em todo território nacional em três safras anuais, o feijoeiro é uma das poucas culturas cujo mercado é auto-regulável: havendo excesso ou escassez de feijão em determinada safra, os produtores promovem o ajuste da área plantada na safra seguinte, compatibilizando, a curto prazo, a oferta com as necessidades de consumo. No Brasil os gêneros *Phaseolus* e *Vigna* são os mais cultivados, com a produção de grãos de tamanhos e cores variadas. Como cultivo de subsistência o feijoeiro é pouco tecnificado.

No período de 1985 a 1993, a menor produção mundial ocorreu em 1987, tendo sido produzidos 14 milhões de toneladas; a máxima produção deu-se em 1991, com 16,7 milhões de toneladas (FAO, 1993). A taxa anual de crescimento da produção mundial de feijão foi de 0,4% no período de 1985 a 1993 (YOKOYAMA *et alli.*, 1996). Considerando todos os gêneros e espécies de feijão, o Brasil é o segundo maior produtor de feijão do mundo, perdendo apenas para a Índia.

O feijão é cultivado em cerca de 100 países em todo o mundo, envolvendo grande número de gêneros, espécies e dificultando uma análise comparativa dos índices de produtividades por espécie. Tomando-se como referência a safra de 1993, as maiores produtividade foram obtidas nos Estados Unidos (1529 kg/ha) e na China (1359 kg/ha), enquanto o México (636 kg/ha), Brasil (635 kg/ha) e a Índia (421 kg/ha) apresentaram níveis inferiores à média mundial de 673 kg/ha.

No Brasil, 80% da produção de feijão é cultivada por pequenos agricultores usando tecnologia mais simples, que resultam em baixos rendimentos. Os médios e grandes agricultores, utilizadores em geral de melhor tecnologia de produção, preferem dedicar-se a culturas de menor risco, como soja, cana-de-açúcar e outras, evitando a do feijão. Nos últimos dois anos, a situação começa a modificar-se, graças em boa parte, à chamada terceira época de plantio do feijão, feita no outono-inverno (MATA, 1997). Nessa época não há grandes riscos para a cultura, porque ela tem que ser obrigatoriamente irrigada, o

que exige investimento e tecnologia mais avançada. Além disso, como nesta época não chove, as enfermidades deixam de se constituir num grande problema. Como resultado, a produção é garantida, atingindo altos rendimentos de 1,5 a 2,5 t/ha (VIEIRA, 1988).

A armazenagem no Brasil já foi alvo de diversos programas, inclusive de incentivos de construção de armazéns de grande porte para a estocagem de safra de grãos, nos quais estimava-se que 30% desta safra era perdida por falta de condições de armazenagem.

Os grãos, em geral, são colhidos no campo apresentando umidade contida elevada. Considerando a sua estocagem e condicionamento, se torna imprescindível utilizar um processo de secagem de forma a diminuir a umidade contida nos grãos.

A secagem é uma das operações mais utilizadas para condicionamento de produtos agrícolas com finalidade de armazenamento.

No Brasil existem basicamente dois métodos:

1. Secagem natural, que consiste em espalhar os grãos em uma camada (10 cm no máximo) expondo-os diretamente ao calor do sol e ao vento, com removimento periódico do produto, a fim de acelerar o processo de secagem (técnica de secagem predominante no Brasil). Depois de um certo período, quando a umidade estiver mais próxima dos 13% (para o feijão), os grãos podem ser amontoados e cobertos durante a noite, para que haja um período de difusão da umidade do interior do grão para a periferia (RAVA, 1991);
2. Secagem artificial, que consiste em utilizar secadores, os quais são equipamentos capazes de extrair a umidade contida no grão através do uso de calor provindo de uma fonte mensurável.

Nos dois métodos, a operação de secagem consiste na remoção de parte da umidade contida no produto recém colhido. O baixo teor de umidade permite o armazenamento do

produto por um período de tempo superior ao que normalmente ocorreria com um produto mais úmido, pelo motivo de evitar a ação de microorganismos e insetos. Por outro lado, a excessiva e severa remoção desta umidade causa danos às propriedades dos produtos, no que se refere às suas aplicações. Outro fator importante a ser questionado devido à secagem excessiva é o abaixamento do rendimento energético do processo. Portanto, para se estabelecer o ponto ótimo da operação de secagem, torna-se importante o conhecimento dos fatores que influenciam o mecanismo da operação, dando condições a um controle mais rígido de operacionalização, favorecendo à qualidade e a produtividade do grão especificamente.

No Brasil, no período em que se processa a secagem do feijão é comum constatar grandes perdas desse produto devido ao tempo ser chuvoso com dias de estiagem. Assim, devido às perdas sucessivas de um número significativo de toneladas de sementes de feijão, os agricultores têm escolhido a secagem mecânica e, em particular a secagem em leito fixo e camada delgada (MATA, 1997).

No estudo da secagem de grãos, o maior interesse se encontra nas características do secador e do produto final. Como os grãos, em geral, apresentam-se frágeis ao atrito e às altas temperaturas, durante a realização da secagem, o conhecimento e utilização da intermitência, empregada em secador que tenha a propriedade de boa homogeneização, como leito de jorro, pode se tornar altamente necessário e rentável.

O tipo de feijão escolhido para a análise do sistema de secagem deste trabalho foi o feijão “carioca”, pelo motivo de ser um produto provindo de uma espécie conhecida e especificada, além do fato de ser o mais comercializado pelos revendedores.

O tipo de secador a ser utilizado, é caracterizado por promover uma distribuição de calor homogênea, indicado para operar com partículas grandes e ser simples do ponto de vista de sua operacionalização e controle.

Este trabalho teve como objetivo estudar e analisar o processo de secagem do feijão em leito fluidodinamicamente ativo, tendo ainda como objetivos específicos principais:

- Desenvolver um equipamento capaz de propiciar a reumidificação forçada rápida dos grãos de feijão, com manutenção das qualidades fisiológicas e visuais do grão.
- Analisar a cinética de secagem em leito de jorro operando em condições intermitentes quanto ao regime fluidodinâmico (leito de jorro/fixo) e quanto ao regime e a fonte de aquecimento (leito de jorro/descanso)
- Verificar a influência, individual e possíveis interações das variáveis operacionais temperatura do ar de entrada, umidade inicial dos grãos, tempo de intermitência no aquecimento e/ou tempo de intermitência no regime fluidodinâmico no processo de secagem;
- Analisar os aspectos de eficiência energética do processo de secagem em condições operacionais intermitentes quanto ao jorro e/ou aquecimento e comparar com a eficiência da secagem em leito de jorro.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1 - Feijão

O feijoeiro comum (*Phaseolus vulgaris* L.), a exemplo de outras importantes plantas alimentícias teve origem no Novo Mundo, tendo sido levado ao Velho Mundo após o descobrimento da América (ZIMMERMANN, 1996).

O feijão é uma leguminosa bastante difundida em todo território nacional. É plantado, preferencialmente, como cultura de subsistência em pequenas propriedades, muito embora tenha havido nos últimos anos crescente interesse de produtores de outras classes, em cujo sistema de produção são adotadas tecnologias avançadas, incluindo a irrigação por aspersão. O sistema de comercialização é o mais variado possível predominando um pequeno grupo de atacadistas, que concentra a distribuição da produção, gerando, muitas vezes, especulações quando ocorrem distorções na média de produção.

No panorama mundial, o feijoeiro comum (*Phaseolus vulgaris* L.), é a espécie mais cultivada entre as demais do gênero, contribuindo com cerca de 95% da produção mundial de *Phaseolus*. O grão de feijão constitui uma importante fonte de proteínas (20-28%), e calorias na dieta humana nos países em desenvolvimento, das regiões tropicais e subtropicais, particularmente nas Américas (47% da produção mundial) e no leste e no sul da África, que contribui com 10% da produção mundial.

Considerando apenas o gênero *Phaseolus*, o Brasil é o maior produtor do mundo, seguido pelo México. Segundo estimativas, baseadas nos dados da safra de 1994, 77% da produção brasileira de feijão foram provenientes do gênero *Phaseolus* e 23% do gênero *Vigna*.

Dependendo da região, o plantio de feijão é feito ao longo do ano em três épocas. A primeira, também conhecida como safra das “águas”, é plantada entre agosto e dezembro e concentra-se mais nos estados da região sul; a segunda safra, ou da “seca” abrange todos os

estados brasileiros e seu plantio ocorre entre janeiro e abril; a terceira safra, ou de inverno”, concentra-se na região tropical e é plantada de maio até julho ou agosto, dependendo do estado. Portanto, em alguma região do país, durante todo ano sempre haverá produção de feijão, o que contribui para a melhoria do abastecimento interno.

Segundo YOKOYAMA *et alli.* (1996), em 1994, nas regiões sul, sudeste e centro-oeste, a primeira safra ou das “águas”, ocupou 37% da área total plantada do país. Nesta área foram produzidos em torno de 42% da produção nacional de feijão. Nesta safra, as três regiões apresentaram uma produtividade média de 820 Kg/há. Já as regiões Norte e Nordeste cultivaram 8% da área total plantada no país, o que significou apenas 4% da produção nacional daquele ano. A produtividade média das duas regiões ficou em torno de 410 Kg/há. A colheita da safra das “águas” está concentrada entre os meses de Dezembro e Março, com uma produtividade média nacional considerando os últimos 5 anos 1990-1994 estimada em torno de 665 kg/há.

O feijão apresenta componentes e características que tornam seu consumo vantajoso do ponto de vista nutricional. Entre eles podemos citar o conteúdo protéico relativamente alto, o teor elevado de lisina, que exerce efeito complementar às proteínas dos cereais, a fibra alimentar, o alto conteúdo de carboidratos, minerais e complexos e a presença de vitaminas do complexo B (LAJOLO *et alli.*, 1996).

Outras características relevantes do feijão são a sua alta perecibilidade em relação à mudança de coloração do tegumento e a maior valorização comercial do produto novo.

2.1.1. Propriedades físicas do feijão

As principais características físicas de um produto necessárias à descrição da secagem são: teor de umidade de equilíbrio, calor específico e conhecer forma e tamanho.

2.1.1.1. Calor específico

A quantidade calor necessária para elevar a temperatura de um corpo de 1°C é denominada de capacidade calorífica do corpo, que é proporcional à sua massa. A capacidade calorífica por unidade de massa é denominada de calor específico sensível e é dado pela seguinte equação:

$$c_p = \frac{C}{m} \quad (\text{Eq. 2.1})$$

em que

c_p = calor específico, $\text{J.kg}^{-1}.\text{°C}^{-1}$

C = capacidade calorífica, J.°C^{-1}

m = massa do corpo, kg

Estudando a variação de calor específico em amêndoas de cacau, ALMEIDA (1979), concluiu que o calor específico aumenta com o teor de umidade e citou vários autores que observaram o aumento do calor específico com o teor de umidade para vários materiais biológicos.

Um estudo feito por MORAES (1991), determinou o calor específico do feijão variedade “carioca” com a variação do teor de umidade de 16 a 44% base seca, tendo estabelecido apenas quatro pontos experimentais obtendo uma relação linear com coeficiente de determinação de 97,67%. A equação encontrada foi:

$$c_p = 1091,141 + 485,369.U \quad (\text{Eq. 2.2})$$

2.1.1.2. Forma e tamanho de grãos

No processamento moderno de produtos agrícolas são utilizados vários métodos mecânicos, térmicos e elétricos para a caracterização e monitoramento dos processos de secagem. Há uma tendência sempre crescente da aplicação das propriedades desses materiais, por isso, torna-se necessário conhecer as características físicas básicas dos produtos com que se deseja trabalhar. Um conhecimento dessas propriedades pode contribuir com dados importantes e essenciais para a Engenharia, no projeto de máquinas, estruturas, processos e controles, na análise e determinação da eficiência de uma máquina ou na sua operação, no desenvolvimento de novos produtos de origem vegetal e na avaliação e retenção da qualidade do produto final (MOHSENIN, 1978).

No estudo de transferência de calor e massa, as soluções de alguns problemas são apresentadas na literatura, sob a forma de cartas ou gráficos. Entretanto, para o uso dessas soluções, torna-se necessário uma estimativa das formas e dimensões do material em estudo. Como os grãos e sementes, de modo geral, não tem um formato geométrico precisamente definido, muitas das soluções são analisadas assumindo-se o produto como uma forma esférica ou cilíndrica, o que nos leva a uma série de considerações, aproximações e erros.

CURRAY (1951), com o objetivo de minimizar esses erros, conceituou a esfericidade como sendo a proximidade que um material está de uma esfera e propôs duas maneiras para sua determinação (Figura 2.1), baseado na definição expressa pela seguinte equação:

$$E = \frac{d_e}{d_c} \cdot 100 \quad (\text{Eq. 2.3})$$

em que

E = esfericidade, em porcentagem

d_e = diâmetro de uma esfera de volume igual ao do objeto, m

d_c = diâmetro da menor circunferência que circunscreve a projeção do objeto em repouso, m

Baseado neste conceito, MOHSENIN (1978), propôs dois métodos para determinar a esfericidade:

Método 1

Considerando o objeto como um elipsóide e sendo o seu volume igual a $V_{elip} = 4/3 \cdot \pi \cdot (r_1 \cdot r_2 \cdot r_3)$, em que r_1 é o maior raio, r_2 é o raio médio e r_3 o menor raio e ainda levando em consideração que $a = 2 \cdot r_1$, $b = 2 \cdot r_2$ e $c = 2 \cdot r_3$ (Figura 2.1) tem-se:

$$E = \left[\frac{\text{Volume do sólido}}{\text{Volume da esfera circunscrita}} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (\text{Eq. 2.4})$$

$$E = \left[\frac{4/3 \cdot \pi \cdot \left(\frac{a}{2} \cdot \frac{b}{2} \cdot \frac{c}{2} \right)}{4/3 \cdot \pi \cdot \left(\frac{a}{2} \right)^3} \right]^{\frac{1}{3}} = \frac{(a \cdot b \cdot c)^{\frac{1}{3}}}{a} \quad (\text{Eq. 2.5})$$

Método 2

$$E = \frac{d_i}{d_c} \cdot 100 \quad (\text{Eq. 2.6})$$

em que

d_i = diâmetro da maior circunferência inscrita na projeção do objeto em repouso, m

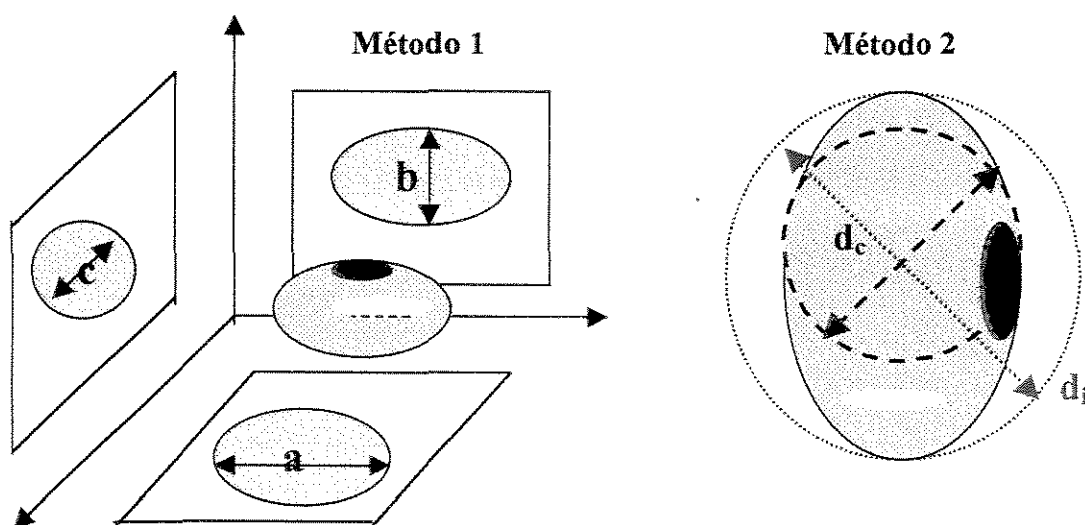


FIGURA 2.1 - Ilustração dos métodos de determinação da esfericidade definida para grãos

2.2. Umidificação de grãos

Visando padronizar o valor de umidade inicial dos grãos de feijão, que se pretende secar no secador em leito de jorro, e realizar o planejamento experimental incluindo a umidade inicial como variável, torna-se necessário a adição de água nos grãos em questão.

A adição de água ou umidificação dos grãos é limitada pela condição de equilíbrio da umidade absorvida do grão com as condições ambientes de trabalho. Portanto, umidade relativa do ambiente de trabalho, pressão de vapor e conteúdo de umidade são variáveis importantes de serem controladas.

Os cuidados com as propriedades físicas e fisiológicas dos grãos, durante a umidificação, são de grande importância, pois dependendo dos níveis das variáveis citadas, podem ser reveladas alterações mecânicas quanto a fissuras, enrugamento e também facilitam o ataque de fungos e insetos, fragilizando seu condicionamento e armazenamento.

Poucos estudos sobre a umidificação de grãos foram feitos, devido a dificuldade no controle da velocidade de absorção de água. Com o intuito de seguir os passos da natureza, LIMA (1995) desenvolveu um método empírico que consiste em espalhar os grãos de feijão formando uma monocada em uma bancada, previamente coberta por plástico e papel absorvente por cima, borrifando água por meio de uma pisseta aleatoriamente e homogeneizando os grãos. O tempo de repouso, à temperatura ambiente era de 24 horas. Uma vez reumidificados, os grãos foram submetidos a secagem em leito de jorro e não apresentaram diferenças notórias em relação grãos de feijão pós-colheita.

Segundo SOKHANSANJ *et alli.* (1984), os grãos trigo, cevada e canola, não perdem sua umidade mais facilmente se forem reumidificados, apresentando somente uma variação na taxa de secagem entre estes grãos e os grãos pós-colheita.

JINDAL e SIEBENMORGEN (1994), estudaram a secagem e reumidificação de arroz em leitos rasos a baixa temperatura, visando diminuir a reumidificação durante o processo de aeração fria forçada. De acordo com os autores, o modelo de equilíbrio prediz tanto a secagem quanto a reumidificação dos grãos de arroz, tornando possível então prever a taxa de reumidificação durante o processo de aeração forçada.

SHATADAL *et alli.* (1991), estudaram características da reumidificação da canola em camada fina e obtiveram ajuste das taxas de reumidificação com a equação de Page, variando-se operacionalmente a umidade relativa (80% e 90%) e a temperatura (7,5, 15, 22,5 e 30 °C). O teor de umidade inicial, no intervalo entre 5% e 10% em base úmida não teve efeito significativo na taxa de reumidificação.

2.3 - Secagem

Em muitos casos, a secagem de materiais é a operação final em um processo industrial, antecedendo imediatamente ao processo de empacotamento ou armazenagem. Muitos autores definem secagem como “operação unitária pela qual ocorre a remoção final

de água ou qualquer outro líquido de um material” (COULSON & RICHARDSON’S, 1991; FOUST *et alli.*, 1980; McCABE, 1993).

VAN’T LAND (1991), define secagem com mais clareza como sendo “uma operação unitária de separação líquido/sólido com um fornecimento de calor, ocorrendo a separação como resultado da evaporação do líquido”.

Ainda com relação ao conceito de secagem, MUJUMDAR (1987) afirma que o processo de secagem é uma mistura de ciência, tecnologia e arte ou conhecimento baseado em intensas observações experimentais.

Segundo COOK e DUMONT (1991), a secagem é complexa por agregar várias operações, tais como: difusão de massa, transportes de sólidos e de fluidos, fluxos de calor e de massa, mecanismos de jorro e fluidização, mistura, cristalização, psicrometria, vaporização, separação de sólidos e até mesmo combustão.

A indústria de processamento de materiais biológicos, em especial, opera com produtos finais que necessitam estar com baixos teores de umidade, em níveis geralmente não passíveis ao desenvolvimento e ação de microorganismos.

2.4 - Cinética de secagem

Conhecer a cinética de secagem do produto de interesse com base nos processos simultâneos de transferência de calor e massa, é indispensável como procedimento experimental, a fim de obter dados capazes de simular um secador industrial.

A secagem de sólidos, tendo como agente direto o ar, envolve duas etapas: a vaporização do líquido contido no sólido, seguido da remoção da umidade pela corrente de ar. Nestas etapas ocorrem dois processos essenciais e simultâneos: transferência de calor

para evaporar o líquido e transferência de massa no interior do sólido para a remoção da umidade.

SHERWOOD (1929), afirma que os mecanismos gerais da secagem são:

- 1 – Evaporação do líquido da superfície do sólido: resistência à difusão interna de líquido pequena, comparada à resistência para remover o vapor da superfície.
- 2 – Evaporação na superfície do sólido: grande resistência à difusão interna do líquido, comparada à resistência para remover o vapor da superfície.
- 3 – Evaporação no interior do sólido: grande resistência à difusão interna de líquido, comparada à resistência total para remover o vapor.

Investigar sobre a forma de secagem em um sólido pode se basear nesses mecanismos, cujo controle pode se dar pelas condições internas de migração de umidade, consequência de gradientes de concentração que dependem das características do sólido, ou na influência das condições externas sobre a velocidade de secagem, principalmente a temperatura, umidade e fluxo do ar.

O movimento do líquido, no interior do sólido, em direção a superfície ocorre por vários mecanismos, em função da estrutura do sólido, sendo possível a difusão em sólidos homogêneos, fluxo capilar em sólidos granulares e porosos, escoamento provocado por contração ou por gradiente de pressão, fluxo por gravidade, e, no caso do processo por contato direto com superfícies aquecidas, escoamento provocado por seqüências de vaporização e recondensação da umidade na superfície exposta.

A velocidade de evaporação do líquido contido num sólido varia de acordo com as condições impostas pelo processo de secagem. Para se verificar a influência das condições externas, deve-se então recorrer à experiência e obter dados relacionados aos termos de umidade do sólido e do tempo de secagem. A partir desses dados, pode ser construída a

curva de secagem, que é uma representação gráfica do conteúdo de umidade em função do tempo; e curvas de taxa de secagem, que indicam a variação do fluxo de água do material em função de sua umidade ou do tempo de secagem.

Os teores de umidade do material em base seca e úmida e o fluxo de secagem em base seca, podem ser estimados através do monitoramento do processo de secagem utilizando as equações 2.7, 2.8 e 2.9, respectivamente,

$$X_{bs}(t) = \left(\frac{m(t) - m_s}{m_s} \right) \quad (\text{Eq. 2.7})$$

$$X_{bu}(t) = \left(\frac{m(t) - m_s}{m_t} \right) \quad (\text{Eq. 2.8})$$

$$\frac{dm}{dt} = - \frac{m_s}{A} \cdot \frac{dX}{dt} \quad (\text{Eq. 2.9})$$

em que

X = teor de umidade do produto, decimal, base seca

m = massa média de sólidos durante o processo

m_s = massa de sólido seco.

Plotando num gráfico os valores de X_{bs} , contra o tempo, obtém-se uma curva típica, conforme ilustrada na Figura 2.2. Esta curva representa um caso geral, quando inicialmente o sólido perde umidade por evaporação da superfície saturada (controle convectivo) e ao final por evaporação da umidade no seu interior (controle por difusão interna).

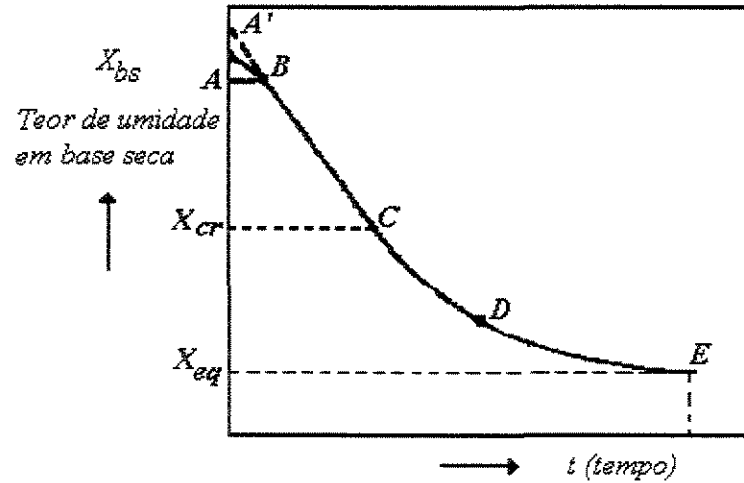
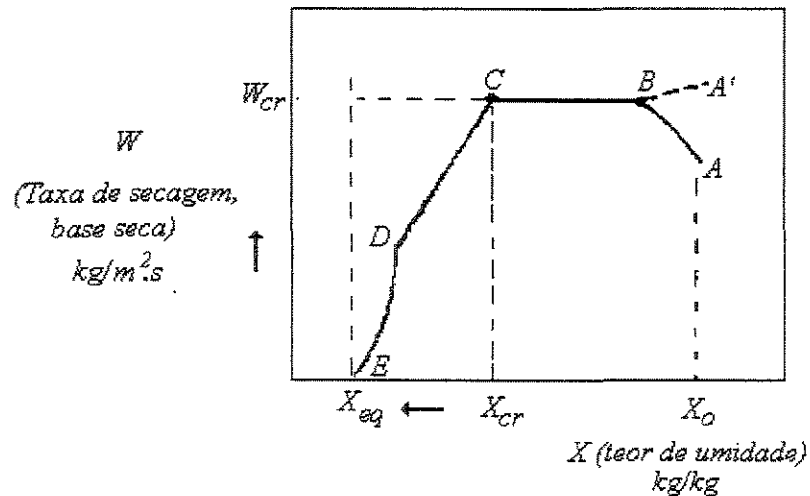


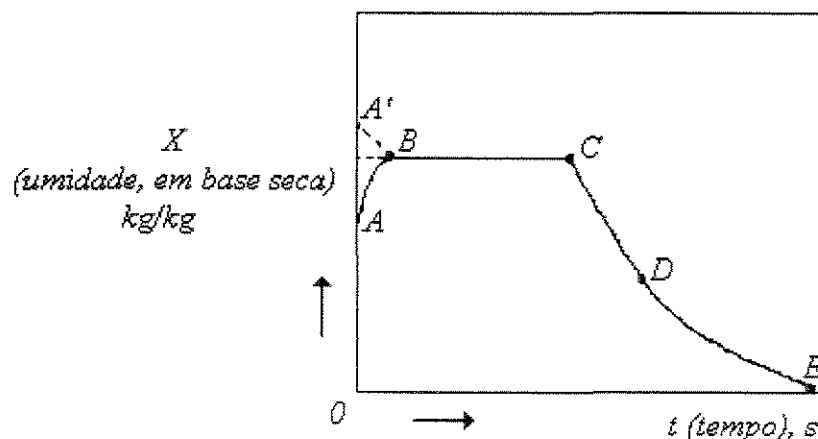
FIGURA 2.2 - Curva típica de secagem

As Figuras 2.3 e 2.4 ilustram os gráficos da variação da taxa ou velocidade de secagem com o teor de umidade livre do material e com o tempo de secagem, respectivamente. A umidade livre do material é estimada através da equação 2.10:

$$X_{\text{livre}} = X(t) - X_{\text{eq}} \quad (\text{Eq. 2.10})$$

onde, X_{eq} corresponde à umidade de equilíbrio do material nas condições operacionais.

FIGURA 2.3: Curva típica da taxa de secagem (W versus X)

FIGURA 2.4: Curva típica de secagem (X versus t)

Nas curvas de secagem e de taxa de secagem (Fig. 2.2, 2.3 e 2.4) os segmentos AB e A'B, são termos representativos do período de aquecimento do material, também pode se caracterizar por período de acomodação térmica do produto às condições de secagem. Os segmentos BC, CD e DE, representam, respectivamente, os períodos de velocidade constante, e o primeiro e o segundo período de velocidade decrescente.

O ponto C, onde o período da velocidade constante termina e da velocidade decrescente começa, é correspondente ao teor de umidade crítico do material, quando toda a superfície exposta do material se encontra inteiramente insaturada de líquido. No ponto D, tem início a última etapa do processo de secagem, onde a difusão interna da umidade é o mecanismo controlador. No ponto E, a taxa de secagem é praticamente nula e o sólido atinge sua umidade de equilíbrio.

2.5 – Equações de secagem semi-empíricas e empíricas

Uma simplificação da equação de difusão em coordenadas esféricas tem sido utilizada para poder prever o estudo de secagem de grãos. Ao invés de um número

infinito de termos da série, somente o primeiro termo é empregado para calcular a taxa de secagem (BROOKER *et alli*, 1974). Essa simplificação resulta na seguinte equação:

$$\frac{X - X_e}{X_0 - X_e} = \frac{6}{\pi^2} \cdot \exp(-k.t) \quad (\text{Eq. 2.11})$$

em que

$k = D.\pi^2 / R^2 = \text{constante de secagem, h}^{-1}$

$t = \text{tempo, h}$

Os resultados obtidos pela equação 2.13 são diferentes daqueles obtidos pela solução em série, porém essa diferença é menor que 5% se a razão adimensional $k.t$ for maior que 1,2, isto é:

$$D.\pi^2 / R^2 > 1,2 \quad (\text{Eq. 2.12})$$

Diversos pesquisadores tem utilizado uma equação de secagem baseada na solução analítica da equação de difusão com as considerações já apresentadas, onde “a” se constitui num recurso para a correção dos demais termos da série.

$$\frac{X - X_e}{X_0 - X_e} = a. \exp(-k.t) \quad (\text{Eq. 2.13})$$

em que “a” é um coeficiente geralmente dependente da temperatura e da variedade do produto.

HUSTRULID e FLIKKE (1959), determinaram a curva de secagem de milho em espiga. A equação por eles encontrada, equação 2.14, é semelhante à equação 2.11 para esferas. No entanto, a espiga tem um formato nada semelhante ao da esfera, assim para poder utilizar esta equação os pesquisadores determinaram as dimensões da espiga e a

converteram para as dimensões de uma esfera equivalente. O raio da esfera obtido desta maneira recebeu a denominação de raio da esfera equivalente.

$$\frac{X - X_e}{X_0 - X_e} = \frac{6}{\pi^2} \cdot \exp\left(-\frac{D_1 \cdot \pi^2 \cdot t}{R_E^2}\right) \quad (\text{Eq. 2.14})$$

em que

D_1 = coeficiente de difusão do produto, $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$

R_E = raio da esfera equivalente, m

BROOKER *et alli*, (1974), cita Hukill, o qual propôs que a taxa de secagem de um produto, em um meio com temperatura constante, é proporcional a diferença entre as umidades do grão e de sua umidade de equilíbrio. A equação proposta é análoga à lei de resfriamento de Newton, sendo freqüentemente utilizada para secagem de produtos agrícolas:

$$\frac{dX}{dt} = -k \cdot (X - X_e) \quad (\text{Eq. 2.15})$$

Separando as variáveis e integrando entre os limites apropriados de acordo com as condições de contorno, obtém-se a relação para estimar a razão de umidade do produto em função do tempo:

$$\frac{X - X_e}{X_0 - X_e} = \exp(-k \cdot t) \quad (\text{Eq. 2.16})$$

As equações 2.15 e 2.16 são denominadas equações de secagem do tipo exponencial e a constante k chamada de constante de secagem e tem unidade de t^{-1} .

PAGE (1949), sugeriu a seguinte equação para a secagem de milho em camada fina, uma vez que a equação 2.11 não satisfazia seus dados experimentais:

$$RU = \frac{X - X_e}{X_0 - X_e} = \exp(-k.t^n) \quad (\text{Eq. 2.17})$$

em que

RU = razão de umidade, adimensional

k = constante de secagem, h⁻¹

t = tempo de secagem, h

Vários estudos de secagem utilizam as equações 2.13 e 2.17, trabalhando com a razão (X/X₀) ao invés de considerar a umidade livre, tornando-se as equações:

$$RU = \frac{X}{X_0} = a. \exp(-k.t) \quad (\text{Eq. 2.18})$$

$$RU = \frac{X}{X_0} = \exp(-k.t^n) \quad (\text{Eq. 2.19})$$

em que

k = constante de secagem, min⁻¹

t = tempo de secagem, min

2.6 - Características da secagem de grãos

As sementes de feijão recém-colhidas geralmente apresentam teores de umidade inadequados (15 a 21%, feijão “das águas” e 18 a 27%, feijão “da seca”) para um armazenamento seguro, sendo uma das principais causas da deterioração de suas qualidades fisiológicas a ação de microorganismos que, compromete seu armazenamento e conseqüentemente seu valor comercial.

A fim de impedir a atividade biológica, principalmente de fungos, a secagem aparece como uma técnica eficiente e segura. Embora, na sua maioria seja realizada

utilizando processo natural, o que se torna inviável em dias chuvosos e nebulosos com alta umidade relativa e também exista a dificuldade de se manusear grandes quantidades, o produto obtido é não uniforme e de qualidade inadequada.

No Brasil a secagem de grãos por meio de secadores ainda não é predominante, sendo que grande parte da produção nacional ainda é proveniente do processo de secagem natural.

A secagem utilizando secadores demanda uma grande quantidade de energia para o aquecimento e transporte do ar. Contudo, BROOKER, BAKKER-ARKEMA E HALL (1974), afirmam que este tipo de secagem reduz perdas, proporciona o planejamento da colheita, prolonga o tempo de armazenamento não prejudicando o grau de germinação e propiciando um produto com maior padrão de qualidade.

BRUNELLO *et alli.* (1974), estudaram a secagem de malte de cevada em um secador tipo jorro cone-cilíndrico operando em regime descontínuo, utilizando três temperaturas de ar de secagem (60, 80 e 90°C) e três cargas de sólidos, tendo o malte umidade inicial de 80% b.s.. Demonstrou-se então que a secagem em leito de jorro pode ser conduzida em temperaturas mais elevadas que nos equipamentos clássicos e propôs-se um modelo semi-empírico, baseado na hipótese de que o transporte de massa se faz através de membranas semi-permeáveis, presentes nas células que contém o material dos grãos.

VISWANATHAN *et alli.* (1986), realizaram experimentos de secagem de milho, arroz, ervilha e trigo em leito de jorro cone-cilíndrico. Utilizaram leitos com diâmetro da coluna (Dc) de 0,10 m, 0,25 m e 0,31 m, todos com ângulo da base de 60°. Nos dois leitos maiores os experimentos foram realizados com um tubo interno modificado, o qual continha fendas ao longo de seu comprimento e na base, com a finalidade de obter uma melhor circulação de sólidos. A massa de sólidos utilizada nos experimentos foi bastante variada: desde 0,067 kg até 9,88 kg e as operações foram realizadas em batelada e contínuo. A partir dos dados obtidos, desenvolveram uma correlação empírica para a taxa de

secagem, com validade para temperatura do ar até 130°C, para auxiliar o projeto de secadores de leito de jorro.

CREMASCO, ROCHA E MASSARANI (1987), obtiveram dados dinâmicos e as curvas de secagem para milho em leito de jorro cônico com tubo interior. O leito utilizado possuía $D_c = 0,626$ m e diâmetro de entrada do fluxo de ar, D_i , igual a 0,053 m. O equipamento mostrou-se adequado à redução da umidade do milho, sem prejudicar a qualidade do grão. Segundo os autores, "o leito de jorro pode ser uma opção para o pequeno produtor, desde que em sua propriedade haja uma rotatividade de plantio (soja, milho, arroz, feijão), de modo que o secador possa sempre estar ativo durante o período da entressafra".

A secagem de arroz em leito de jorro cônico foi estudada por CREMASCO E MASSARANI (1987). Os dados foram obtidos em uma unidade piloto, com ângulo de 60° operando a temperaturas do ar entre 80 e 110°C, com tubo interior para cargas superiores a 18 kg, tendo $D_c = 0,626$ m e $D_i = 0,053$ m. Um economizador em leito fixo foi usado, com fins de aproveitar energeticamente o ar de secagem.

KALWAR E RAGHAVAN (1993), realizaram experimentos de secagem de milho em leito de jorro bidimensional com placas internas. O leito bidimensional é uma modificação dos tradicionais leitos cônico-cilíndricos e tem como principal objetivo minimizar o problema de 'scale-up' apresentado pelos leitos convencionais. Utilizaram dois leitos geometricamente similares: um em escala de laboratório, com ângulo da base de 60° e 0,50 m de largura, 0,04 m de profundidade, 1,50 m de altura e outro em escala piloto, com mesmo ângulo da base e dimensões de 0,75m, 0,06 m e 2,0 m respectivamente. Concluíram que a taxa de secagem foi influenciada pela temperatura do ar à entrada, temperatura inicial do grão, massa de grãos no leito, teor de umidade inicial dos grãos, tempo médio de recirculação das partículas, umidade relativa do ar à entrada e geometria do leito. Segundo os autores a secagem na escala piloto foi muito mais rápida do que na escala de laboratório, proporcionalmente à massa utilizada em cada uma; a cinética de secagem foi do tipo camada delgada e a equação de Page descreveu bem o processo, sendo que nos parâmetros

do modelo, determinados empiricamente, foram consideradas a geometria do leito e as características de operação.

Apesar dos diversos trabalhos publicados sobre a secagem de grãos em leito de jorro, deve-se atentar para o fato de que estes não são amplamente utilizados na prática, devido principalmente ao baixo rendimento energético do processo. Portanto, torna-se necessário o estudo incessante na busca de tecnologias eficientes e metodologias de operação que os tornem economicamente viáveis de serem implantados na secagem de grãos para o pequeno e médio produtor.

2.7. Leito fixo

Relacionados com facilidade de operação, custos de implantação, consumo de energia e características do produto final, os secadores são devidamente escolhidos e classificados para cada aplicação.

Os secadores de leito fixo são colunas, geralmente verticais, recheadas de partículas, de forma que um fluido atravesse o leito, geralmente no sentido do topo da coluna, sem carregá-las. Isto significa que a carga de partículas presentes no leito produz uma pressão estática que é superior à vazão de gás aplicada.

Embora o leito fixo proporcione muitas vantagens, devido ao leito de partículas permanecer estático (sem atrito entre os grãos) e a facilidade de construção, o produto obtido utilizando este tipo de secador não apresenta propriedades e características finais uniformes.

2.8 - Leito de jorro

Considera-se leito de jorro, um recipiente aberto no topo cheio com partículas de tamanho relativamente grande. Um fluido é injetado verticalmente por uma abertura central na base. Se a taxa de vazão do fluido for suficientemente alta, causará um fluxo de partículas subindo rapidamente pela concavidade central do leito. Estas partículas, depois de atingirem um certo nível do leito, voltam a região anular, localizada entre o centro côncavo e a parede da coluna, onde caem lentamente para baixo, até certo ponto, onde retornam ao fluxo central estabelecendo assim um movimento cíclico e sistemático de partículas, dando origem a um sistema hidrodinâmico único que é mais adequado para certas aplicações do que configurações sólido-fluido mais convencionais.

Um diagrama esquemático de um leito de jorro é mostrado na figura 2.5, indicando a direção do movimento dos sólidos.

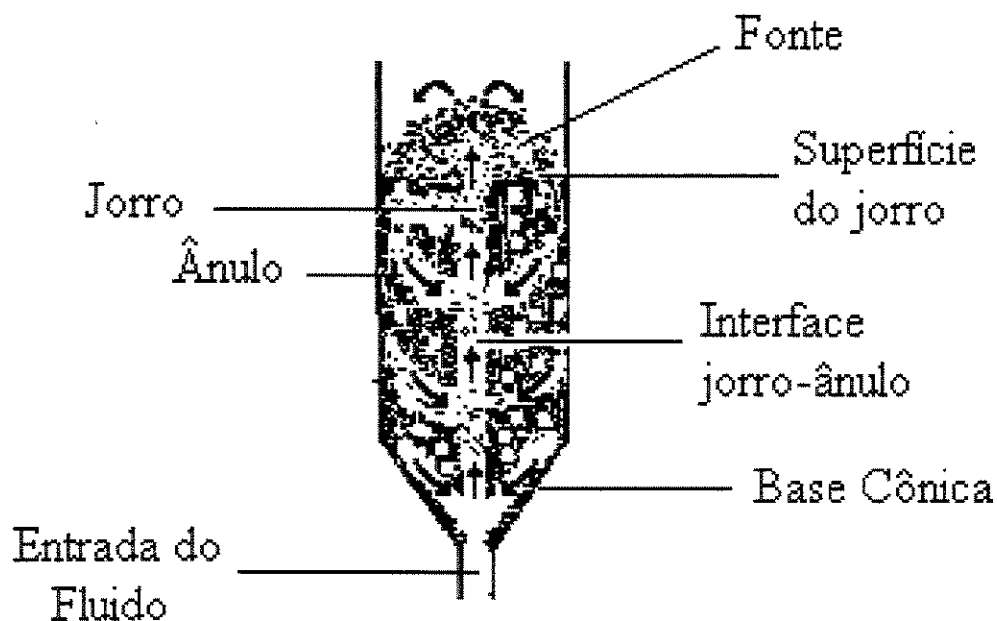


FIGURA 2.5 - Esquema de um leito de jorro (Mathur e Epstein)

O termo leito de jorro foi criado por Gishler e Marthur, 1962. Esses autores desenvolveram a técnica primeiramente para secagem de trigo, onde utilizaram ar muito mais quente do que em secadores de trigo convencionais sem prejudicar a qualidade dos

grãos. Com essa realização, tornou-se possível ampliar o uso dessa técnica, estudando-se as características de um leito de jorro usando uma variedade de sólidos com ar e água. Com base nesses estudos preliminares, esses investigadores afirmaram acertadamente que "o mecanismo do fluxo de sólidos bem como do fluxo de gás, é diferente da fluidização, mas tem os mesmos propósitos para partículas grandes, assim como a fluidização tem para partículas finas."

O primeiro leito de jorro comercial foi instalado no Canadá em 1962, para secagem de ervilhas, lentilhas e linho. Desde então foram construídas unidades em muitos outros países para uma variedade de outras aplicações, além da secagem, como por exemplo, cristalização por evaporação, mistura de sólidos, resfriamento, recobrimento de partículas e granulação.

2.8.1 - Requisitos para obtenção do jorro

O jorro, o qual é um fenômeno observável, ocorre numa faixa definida de velocidade do gás para uma dada combinação de gás, sólidos e configuração do leito. A Figura 2.6 ilustra a transição de um leito fixo para um leito de jorro, depois para um leito borbulhante e para o regime "slugging", os quais ocorrem com o sucessivo aumento da velocidade do gás.

Essas transições podem ser representadas quantitativamente com o gráfico da altura do leito versus velocidade do gás, ou diagramas de fase, mostrado na Figura 2.7.

A linha representando a transição entre um leito fixo e um leito fluidizado ou leito de jorro, é mais reprodutível na direção do decréscimo da velocidade do que no sentido oposto. Dependendo do material, fluido e geometria do leito, haverá uma altura máxima de jorro (H_m). A velocidade mínima de jorro nessa altura do leito pode ser de até 50% maior do que a mínima velocidade de fluidização (U_{mf}).

Os diagramas de fase indicam também que, para um determinado sólido, gás e diâmetro da coluna, existe um máximo no tamanho da abertura da entrada de gás, além do qual o jorro não mais ocorre, e o leito passa diretamente do estado de leito fixo para o estado de leito agregativamente fluidizado.

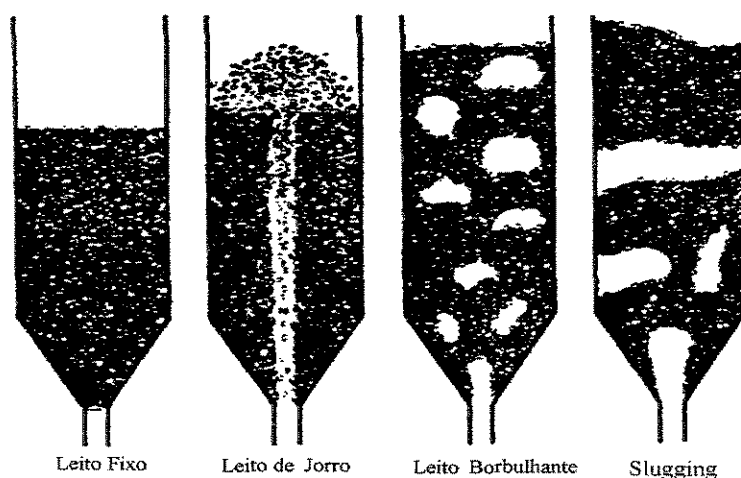


FIGURA 2.6: Transição das fases com o aumento do fluxo de gás. (Mathur e Epstein, 1974)

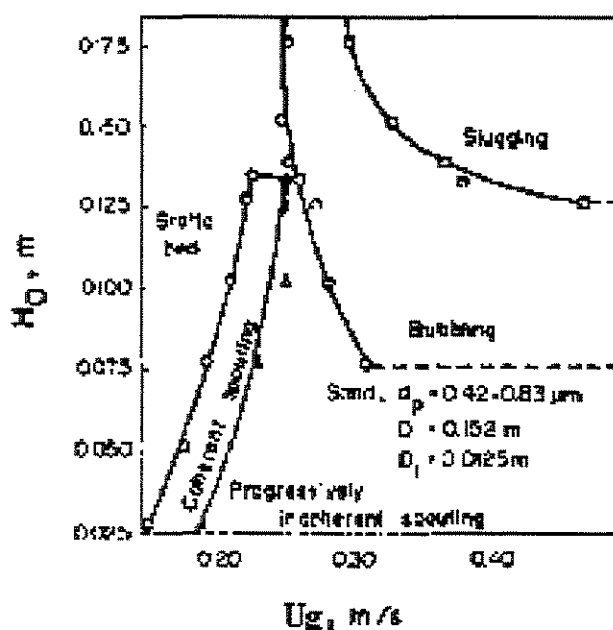


FIGURA 2.7: Diagramas de fase (Mathur e Epstein, 1974)

O mecanismo de transição de um leito estático para o de jorro é melhor descrito com referência ao gráfico da queda de pressão no leito versus velocidade superficial do gás de entrada do leito. Os dados experimentais de LAMA *et alli.*(1967), são mostrados na Figura 2.8:

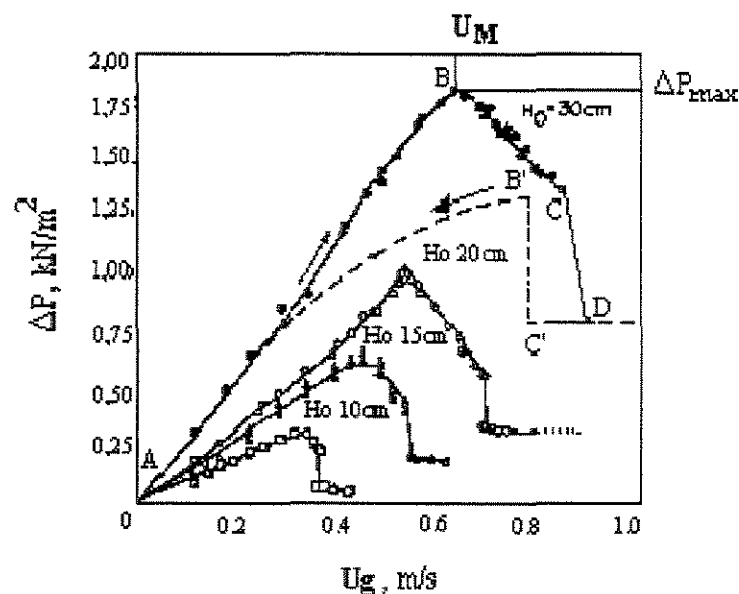


FIGURA 2.8: Curva típica da queda de pressão versus taxa de fluxo de gás. (Mathur e Epstein, 1974)

(1) em baixas taxas de fluxo, o gás sobe sem perturbar as partículas, a queda de pressão é crescente com o aumento do fluxo de gás, como acontece em leito fixo. (região AB);

(2) a uma certa vazão, a velocidade do jato se torna suficientemente alta para empurrar para trás as partículas nas proximidades da entrada do gás, causando o aparecimento de uma cavidade relativamente vazia, que se forma acima da entrada de ar, formando um arco compacto que oferece grande resistência ao fluxo de gás. Apesar disso a queda de pressão continua crescente;

(3) com mais um leve aumento da vazão de gás, a cavidade se alonga para um jorro interno, e o arco compacto continua existindo acima do jorro interno, fazendo com que a

queda de pressão no leito aumente até alcançar um valor máximo (ΔP_M) no ponto B, com uma velocidade superficial correspondente (U_M);

(4) Quando a vazão do fluido é aumentada além do ponto B, a altura do jorro interno torna-se grande em comparação ao leito compactado acima do jorro. A queda de pressão, entretanto, diminui ao longo de BC;

(5) A velocidade do jato continua aumentando até atingir o ponto C, onde os sólidos são deslocados do núcleo central causando uma evidente expansão do leito. Essa expansão às vezes resulta em uma diminuição brusca na queda de pressão, e é usualmente acompanhada pela expansão e contração alternada do jorro interno;

(6) depois, com um ligeiro aumento da vazão, além do ponto C, num ponto denominado de jorro incipiente, o jorro interno rompe através da superfície do leito. Quando isso acontece, a concentração de sólidos na região diretamente acima do jorro interno diminui abruptamente, causando uma redução bem definida da queda de pressão até o ponto D, onde o leito entra em regime com a estabilidade do jorro;

(7) com aumento ainda maior na vazão, o gás adicional passa através da região do jorro, e a fonte se torna mais alta, oferecendo menos resistência ao fluxo sem nenhum efeito significativo na queda de pressão total, que a partir desse ponto permanece constante.

A velocidade do jorro incipiente (C) e o início do jorro (D) não são exatamente reprodutíveis. A velocidade mais reprodutível é a velocidade de jorro mínimo (U_{MS}), que é obtida pelo decréscimo gradativo da velocidade do gás. O leito permanece no estado de jorro até o ponto C', que representa a condição de jorro mínimo. Uma leve redução da velocidade do gás causa o colapso do jorro e a queda de pressão sobe rapidamente para o ponto B'.

Diminuindo-se mais ainda a vazão, ocorre um constante decréscimo na queda de pressão ao longo de B'A. Entretanto, esta curva principal fica abaixo daquela obtida com o

aumento da vazão, já que a energia requerida pelo jato de gás para penetrar os sólidos não é mais consumida durante o colapso do jorro.

2.8.2 - Queda de pressão

Os valores da queda de pressão de interesse prático no projeto e operação de um leito de jorro, são os correspondentes aos pontos B e D na Figura 2.8, que são, respectivamente, a queda de pressão máxima ($-\Delta P_M$) obtida do jorro inicial e a queda de pressão do jorro estável ($-\Delta P_s$), que determina a potência operacional requerida para o processo. Outro parâmetro de processo importante é a vazão ou velocidade de jorro mínimo ou incipiente (U_{MS}).

TABELA 2.1: Equações empíricas para variáveis de processo em leito de jorro

Equação	Autor
$\frac{U_M}{U_{MF}} = 1 - \left(\frac{D_i^2}{D_c^2} \right)^{0.7 - \left(\frac{H}{H_m} \right)}$ Para $H/H_m < 0.7$ e para $H/H_m \geq 0.7$, $\frac{U_M}{U_{MF}} = 1$	PALLAI E NÉMETH (1969)
$\frac{-\Delta P_M}{H\rho_b g} = 1 + 0.062 \left(\frac{D_b}{D_i} \right)^{2.54} \left(\frac{D_b}{D_i} - 1 \right) \left(\tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \right)$ onde, $D_b = D_i + 2H \tan\left(\frac{\theta}{2}\right)$	GELPERIN ET AL (1960)
$\frac{\Delta P_M}{\Delta P_s} = 1 + 6.65 \left(\frac{H}{D_i} \right)^{1.2} \left(\tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \right)^{0.5} (Ar)^{0.2}$ onde $-\Delta P_s$ é dado pela relação: $\frac{-\Delta P_s}{H\rho_b g} = \frac{7.68 \left(\tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \right)^{0.2}}{Re^{0.2} \left(\frac{H}{D_i} \right)^{0.33}}$	MUKHLENOV E GORSHTAIN (1965)

Alguns autores propõem equações empíricas visando descrever variedades de sólidos quanto às características físicas e diversas geometrias de leitos. Algumas equações mostradas na Tabela 2.1.

2.8.3 - Queda de pressão no jorro

No estado de jorro estável, a queda de pressão através do leito, surge de duas resistências paralelas, isto é, aquela onde o transporte na fase diluída está ocorrendo e a da região anular, no qual ocorre um movimento na descendente do leito compactado com fluxo de gás em contracorrente.

O gradiente de pressão na vertical aumenta de zero na base para um máximo no topo do leito. A queda de pressão total através do leito pode ser obtida pela integração do perfil do gradiente de pressão longitudinal na altura do leito.

2.8.4 - Estabilidade no jorro

O regime de jorro estável é criticamente dependente de certas condições, que se não forem satisfeitas, o movimento dos sólidos se torna aleatório, passando para o estado de fluidização agregativa, e com aumento do fluxo de gás, para *slugging*. O jorro pode ser alcançado somente dentro de certos limites de propriedades dos sólidos, e mesmo um material que esteja dentro desses limites, a estabilidade ainda dependerá do diâmetro da coluna e do diâmetro da entrada de gás. Mas a maior e principal restrição para a estabilidade do jorro é imposta pela altura do leito, pois a ação do jorro para qualquer propriedade de sólidos e geometria da coluna, termina além de uma certa altura máxima. Portanto, um leito de jorro estável pode ter uma altura menor do que a altura máxima e tornar-se instável com altas vazões de gás.

2.9 - Secagem intermitente

Em um recente estudo, MUJUMDAR *et alli.* (1996), afirmam que a secagem pode ser processada utilizando três regimes de trabalho diferentes: descontínuo, contínuo e intermitente.

Intermitência nas condições operacionais durante o processo de secagem, é o mesmo que interromper ao longo do tempo uma ou mais variáveis importantes como: aquecimento do ar de entrada, regime de operação, e, vazão de ar, objetivando realizar uma secagem “suave”, isto é, reduzir as perdas devido a danos mecânicos, homogeneizar o fluxo de calor no secador e, conseqüentemente, otimizar o consumo de energia utilizada pelo processo de secagem.

ZHANG e LITCHFIELD (1991), desenvolveram um trabalho visando otimizar a secagem intermitente de milho em um secador em camada delgada em escala laboratorial. Descreveram a influência dos períodos de interrupção na taxa de secagem e otimizaram o processo utilizando o controle pela taxa de secagem e pela eficiência energética. Neste trabalho, os autores concluíram que o processo de secagem intermitente apresenta um consumo energético muito menor que o processo contínuo, exceto quando utilizado para altas taxas de secagem.

A deformação em materiais porosos usando a técnica de simulação na secagem intermitente foi estudada por ZHANG e MUJUMDAR (1992). O estudo envolveu intermitência no aquecimento de ar visando otimizar o gasto energético no processo de secagem. Os resultados da simulação são comparáveis aos dados experimentais, tornando-se possível a previsão da utilização do regime intermitente na secagem de materiais porosos.

JUMAH e MUJUMDAR (1996), desenvolveram um estudo de simulação e modelagem matemática para secagem de grãos de milho em regime contínuo, e intermitente quanto ao jorro e aquecimento do ar, em leito de jorro rápido rotativo. Concluíram que o emprego da secagem intermitente apresenta vantagens significativas, tais

4.3.2. Efeito da temperatura do ar de admissão no leito

A análise das Figuras 4.7a a 4.10a, permite verificar a influência da temperatura do ar de entrada no processo de secagem em leito de jorro/fixo. Verificou-se uma pronunciada influência desta variável na umidade final do grão, bem como na razão de umidade, fazendo com que a secagem ocorra mais rápida para temperaturas do ar mais elevadas, e como é esperado, obtendo-se umidades finais menores (Tabela 4.1). Nos intervalos de tempo de secagem onde predominou o regime de leito fixo, notou-se uma diminuição na taxa de secagem em comparação com os intervalos de tempo referentes ao regime de jorro. Isto ocorreu devido a uma diminuição na vazão de ar quente admitida no leito secador que foi de 75%, diminuindo assim a transferência de calor por convecção no período de intermitência no regime de jorro.

É interessante verificar que, de forma geral, durante a realização dos ensaios de secagem, ocorreram pontos de reumidificação, devido à condensação de vapores d'água durante o período de intermitência do regime fluidodinâmico.

As Figuras 4.7b a 4.10b, mostraram a influência da T_{ar} no aquecimento do grão. Como é esperado, pode-se notar um maior aquecimento no grão para operações realizadas a temperaturas do ar de entrada no nível superior, 80°C. Nas figuras 4.7b e 4.10b, verificou-se a influência da intermitência no regime, apresentando pontos com gradientes de até 15°C na temperatura do grão para a mesma condição experimental, fato que pode ser explicado pela diminuição da vazão de ar quente admitido no leito secador.

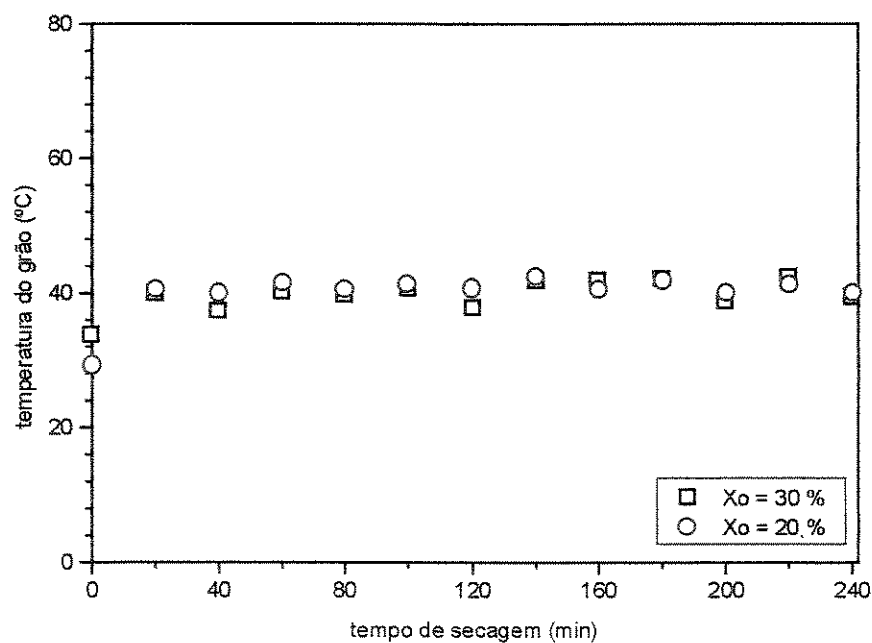
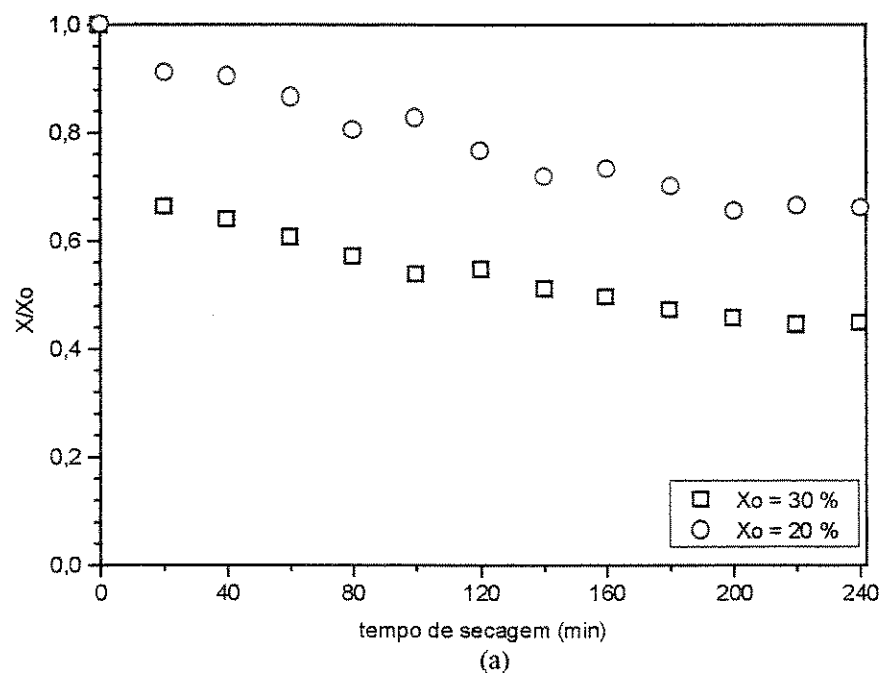
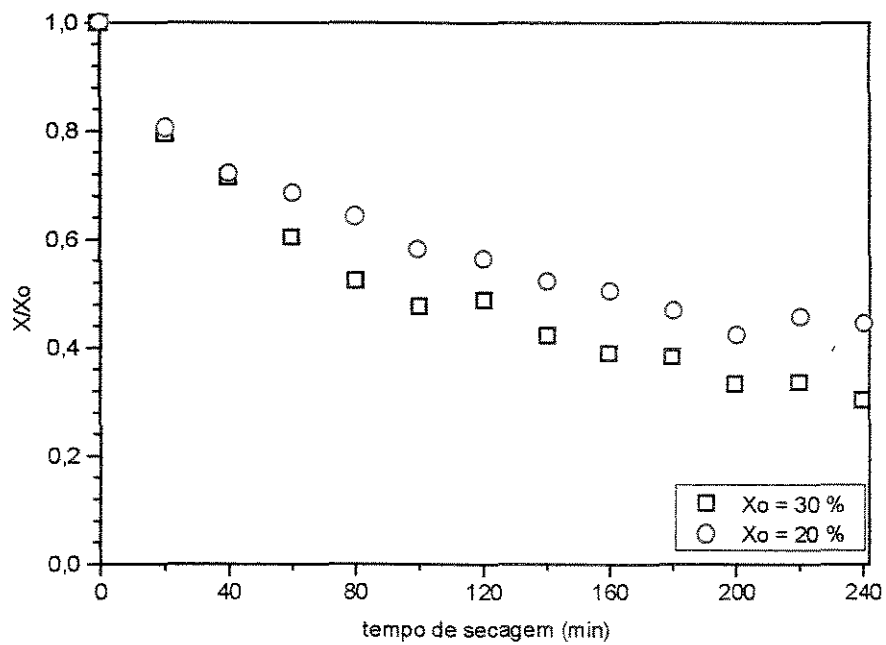
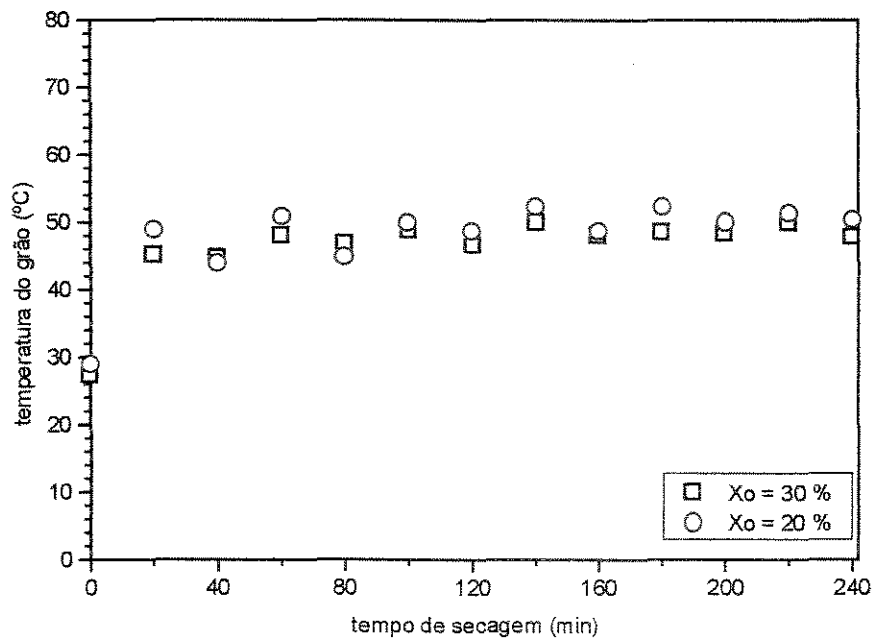


FIGURA 4.6 - Influência da umidade inicial condições: $T_a = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t_i = 20\text{ min}$ – Leito Jorro/fixo – (a) Umidade do grão em função do tempo (b) Temperatura do grão em função do tempo

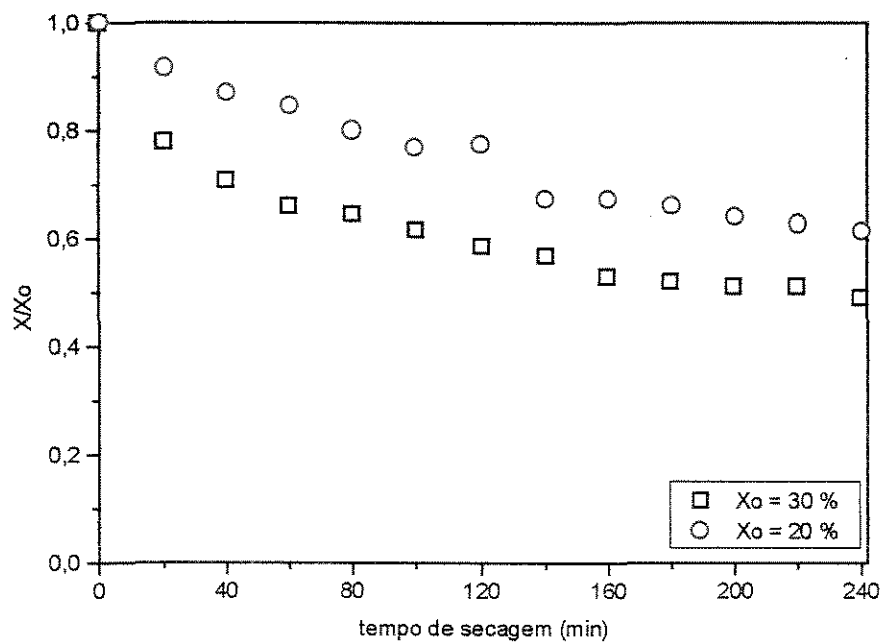


(a)

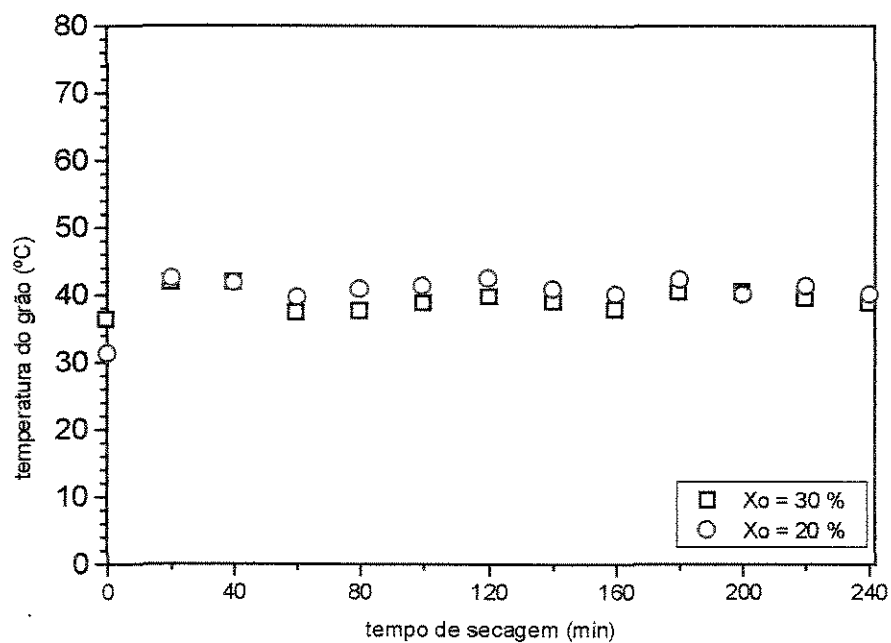


(b)

FIGURA 4.5 - Influência da umidade inicial condições: Tar = 80 °C, ti = 20 min – Leito Jorro/fixo – (a) Umidade do grão em função do tempo (b) Temperatura do grão em função do tempo

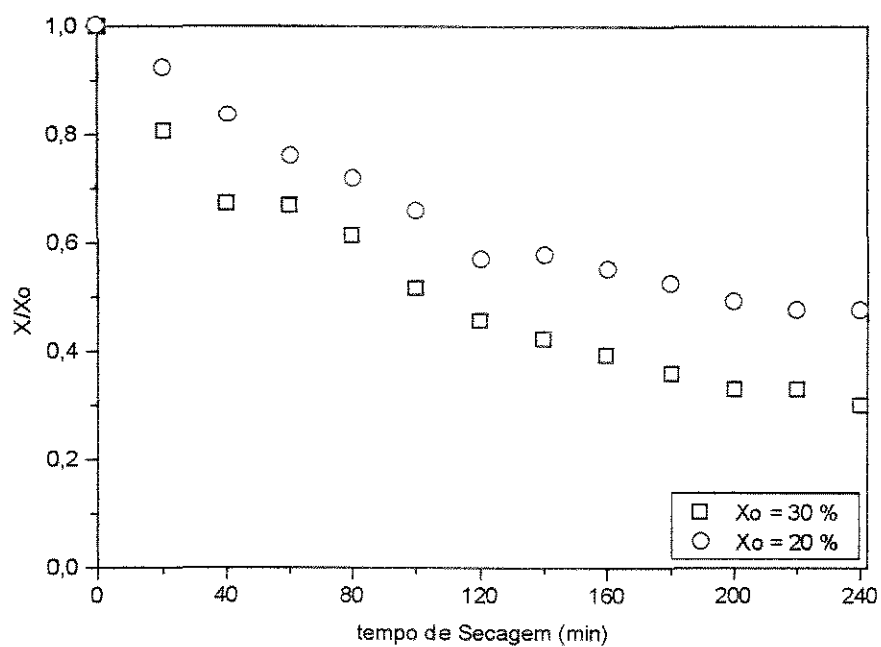


(a)

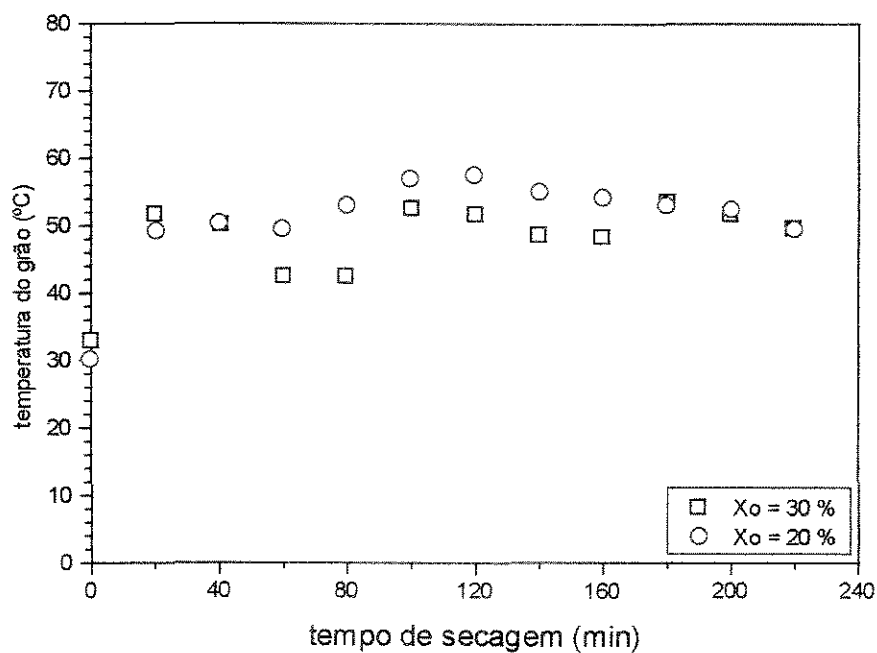


(b)

FIGURA 4.4: - Influência da umidade inicial condições: $T_a = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t_i = 40\text{ min}$ – Leito Jorro/fixo – (a) Umidade do grão em função do tempo (b) Temperatura do grão em função do tempo



(a)



(b)

FIGURA 4.3 - Influência da umidade inicial condições: $T_{ar} = 80^{\circ}\text{C}$, $t_i = 40\text{ min}$ – Leito Jorro/fixo– (a) Umidade do grão em função do tempo (b) Temperatura do grão em função do tempo

4.3. Resultados e análises do experimento I – leito de jorro/ fixo

O experimento I foi realizado em condições operacionais intermitentes de secagem, interrompendo-se parcialmente a vazão de ar de entrada, proporcionando a configuração de leito de jorro e de leito fixo.

4.3.1 - Efeito da umidade inicial do grão

As Figuras 4.3a a 4.6a, representam a influência da umidade inicial na curva de secagem dos grãos de feijão “carioca”, e as Figuras 4.3b a 4.6b, a mesma influência na temperatura do grão para o regime fluidodinâmico de jorro/fixo. Verificou-se pelos gráficos obtidos, que a secagem se processa mais rapidamente, quanto maior for o teor de umidade inicial do grão, e que após 180 minutos de secagem a variação da razão de umidade se torna, muito pequena. Isto se deve ao fato de haver um maior gradiente de concentração para que ocorra a transferência de massa de água, do grão para o agente de secagem, no caso do maior teor de umidade inicial.

Em relação ao aquecimento do grão de feijão, as Figura 4.3b a 4.4.6b, mostram flutuações em torno dos valores médios de 50°C para os ensaios realizados a 80°C e 38°C para os ensaios realizados a 60°C da temperatura do grão para os dois teores de umidades iniciais estudados.

fluidodinâmico. Estas variáveis foram analisadas em dois níveis, resultando 8 ensaios de secagem para cada experimento, os quais foram apresentados nas Tabelas 4.2 e 4.3.

Os ensaios de secagem foram igualmente realizados para dois tipos de experimentos: experimento I, que consistiu em utilizar o conceito de intermitência somente para o regime fluidodinâmico, caracterizado por leito de jorro/fixo; experimento II, no qual empregou-se intermitência no regime fluidodinâmico e na fonte de aquecimento, interrompendo-se totalmente o fornecimento de ar quente para o leito secador, caracterizando um regime intermitente de leito de jorro/descanso.

Os dados experimentais de umidade inicial apresentados nas Tabelas 4.2 e 4.3, foram utilizadas para os níveis especificados em 20 e 30% em base seca. Os valores apresentaram alguma oscilação, não ultrapassando 10% de variação. Esta oscilação foi considerada satisfatória, visto que o processo de reumidificação forçada utilizado não permite estabelecer um procedimento experimental de forma a se atingir os valores de umidades desejados com precisão, e mesmo os grãos provindos diretamente da colheita não apresentam a uniformidade nos valores de umidade inicial exigidos no planejamento experimental.

Os resultados dos experimentos foram analisados através de gráficos, além da técnica de planejamento fatorial. As variáveis respostas foram definidas como sendo a razão de umidade ao final da secagem X_f/X_0 (RU), a eficiência de secagem (ES), e os coeficientes de secagem (CS) e (LM). As Tabelas 4.2 e 4.3 também fornecem os resultados das umidades finais e das razões de umidades para os experimentos I e II.

Pode-se verificar que os ensaios de secagem realizados com temperatura do ar de admissão no leito secador no nível superior (80°C), resultou em umidades finais dos grãos menores.

É interessante observar que os valores finais obtidos de conteúdo de umidade no grão para os experimentos I e II, na maioria dos ensaios de secagem realizados, atingiram valores que são adequados para o seu armazenamento, na faixa de 9% a 13,5% b.s. (JORDÃO *et alli.*, 1976).

TABELA 4.3 – Especificação das variáveis medidas e monitoradas durante a realização do experimento II: Leito de jorro / descanso

Ensaio de Secagem	X_0 (% b.s.)	T_a (°C)	t_i (min)	W_{jorro} (Kg/min)	W_{descanso} (Kg/min)	X_f (% b.s.)	X_f/X_0
1	32,52 (30)	80	40	2,44	0	12,41	0,38
2	22,54 (20)	80	40	2,44	0	11,58	0,51
3	31,40 (30)	60	40	2,44	0	17,44	0,55
4	21,78 (20)	60	40	2,44	0	15,35	0,70
5	30,03 (30)	80	20	2,44	0	11,85	0,39
6	20,64 (20)	80	20	2,44	0	13,85	0,67
7	30,11 (30)	60	20	2,44	0	13,11	0,45
8	20,06 (20)	60	20	2,44	0	12,83	0,64

4.2. Aquisição dos dados experimentais – Planejamento fatorial

Neste trabalho empregou-se o método de planejamento fatorial com três fatores a dois níveis, ou seja, cada variável foi utilizada em dois valores, um nível superior (+) e outro nível inferior (-). Esta técnica permite avaliar a influência das variáveis de forma separada e possíveis interações nas respostas do processo analisado.

As variáveis do processo estudadas neste trabalho foram a umidade inicial do grão, a temperatura do ar de secagem e tempo de intermitência da fonte de aquecimento e/ou do regime

umidade inicial em torno de 20% b.s. O mesmo comportamento verificou-se na curva da Figura 4.2, a partir de 2,34 kg/min, a queda de pressão permanece, praticamente constante para o teor de umidade de em torno de 30% b.s. A queda de pressão foi fixada a partir do cálculo de um valor médio para o regime de jorro estável, cujo valor foi de 2,44 kg/min. Baseando-se ainda na curva de fluidodinâmica, fixou-se a vazão de operação em leito fixo em 0,50 kg/min, de forma garantir o leito de grãos totalmente estático e com o menor consumo de energia.

Nas Tabelas 4.2 e 4.3 encontram-se os dados experimentais das variáveis controladas e medidas nos experimentos I e II, respectivamente.

TABELA 4.2 – Especificação das variáveis medidas e monitoradas durante a realização do experimento I: Leito de jorro / fixo

Ensaio de Secagem	X ₀ (% b.s.)	T _a (°C)	t _i (min)	W _{gorro} (Kg/min)	W _{fixo} (Kg/min)	X _f (% b.s.)	X _f /X ₀
1	31,73 (30)	80	40	2,44	0,5	9,47	0,30
2	19,33 (20)	80	40	2,44	0,5	9,17	0,47
3	28,53 (30)	60	40	2,44	0,5	13,98	0,49
4	21,19 (20)	60	40	2,44	0,5	13,00	0,61
5	29,97 (30)	80	20	2,44	0,5	9,02	0,30
6	20,77 (20)	80	20	2,44	0,5	9,23	0,44
7	29,11 (30)	60	20	2,44	0,5	13,05	0,44
8	19,62 (20)	60	20	2,44	0,5	12,99	0,66

utilizada na execução dos ensaios de secagem, 3,20 kg, nos teores de umidades de 20% e 30% b.s.

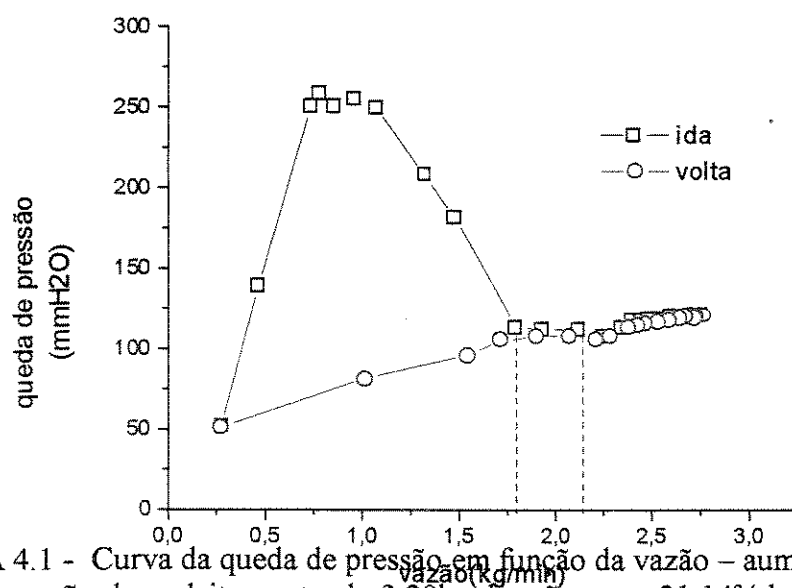


FIGURA 4.1 - Curva da queda de pressão em função da vazão – aumentando e diminuindo a vazão de ar: leito contendo 3,20kg de grãos com 21,14% b.s. de umidade

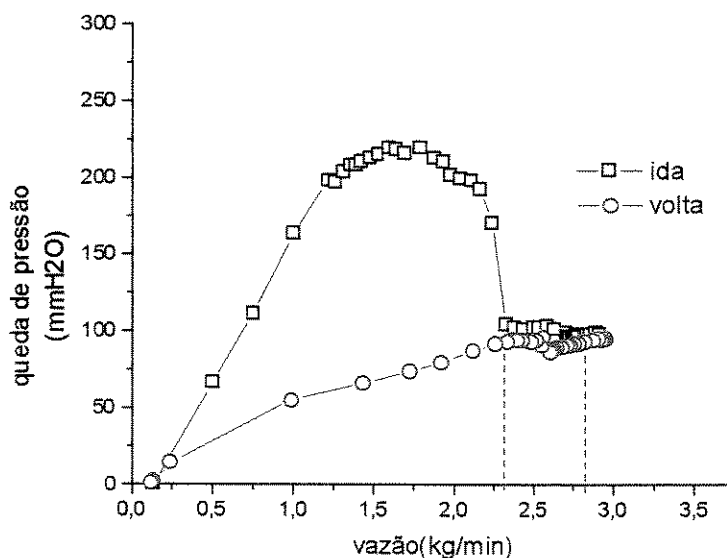


FIGURA 4.2 - Curva da queda de pressão em função da vazão – aumentando e diminuindo a vazão de ar: leito contendo 3,20kg de grãos com 31,27% b.s. de umidade

A curva de queda de pressão em função da vazão, Figura 4.1, mostra que a partir de 1,60 kg/min, a queda de pressão no leito permanece, praticamente inalterada. Sendo assim, calculou-se a vazão de operação para o regime fluidodinâmico de jorro para os ensaios realizados com

Para a obtenção dos valores de umidades finais no processo de reumidificação, foram feitas 6 amostragens, em triplicata, em cada bandeja e em vários pontos da mesma, calculando-se um valor médio.

Verificou-se que os valores das umidades finais para cada bandeja apresentaram-se com variações satisfatórias.

Tabela 4.1. Dados experimentais para a determinação do tempo de reumidificação para padronização da umidade inicial dos grão de feijão

Ensaio	Massa (g)	Umidade inicial (%) b.s.	Tempo do ensaio (h)	Temperatura da água (°C)	Umidade bandeja 01(%) b.s.	Umidade bandeja 02(%) b.s.	Umidade bandeja 03(%) b.s.
1	3000	13,34	6	50	16,59	14,72	14,88
2	3000	11,45	6	60	21,28	16,83	17,44
3	3000	12,18	6	60	19,98	14,54	15,29
4	3000	13,51	4	60	17,11	16,99	17,88
5	3000	11,87	8	40	13,52	13,77	14,42
6	3000	11,62	6	50	14,28	14,92	15,35
7	3000	12,18	6	50	14,37	13,46	14,68
8	3000	15,70	30	60	44,89	28,52	31,52
9	3000	13,52	20	60	28,65	-	-
10	3000	16,42	20	60	30,03	-	-
11	3000	19,62	20	60	31,95	-	-
12	3000	12,54	6	60	21,94	-	-

4.1.2 – Obtenção das vazões de realização dos experimentos

As vazões utilizadas nos experimentos I e II, foram determinadas a partir da obtenção das curvas de jorro, Figuras 4.1 e 4.2, aumentando e diminuindo a vazão de ar para a massa de grãos

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados referentes a caracterização do processo, obtenção das curvas e taxas de secagem, planejamento estatístico, incluindo avaliação energética, estudo da cinética e comparação entre os tipos de secagens realizadas para grãos de feijão variedade “carioca” são descritos a seguir.

4.1. Caracterização do processo

4.1.1. Reumidificação de grãos

O tempo de reumidificação para a padronização da umidade inicial, a fim de controlar esta variável de processo nos dois níveis (20 e 30% b.s), foi obtido em testes preliminares, através da modificação nas variáveis: umidade inicial dos grãos e temperatura da água de aquecimento, para uma massa de 3000 g. em cada bandeja. A Tabela 4.1 apresenta os valores das variáveis citadas anteriormente e os valores obtidos para as umidades finais do grão, por bandeja.

Os testes preliminares realizados empiricamente, indicaram os ensaios 9, 10 e 11 como satisfatórios para a obtenção do conteúdo de umidade final em torno de 30% b.s. e os ensaios 2, 3 e 12 para o conteúdo de umidade em 20% b.s.

Dessa maneira, as condições de operação determinadas para os experimentos de reumidificação foram: para teor de conteúdo umidade em 30% b.s., massa de grãos 3000 g, tempo do ensaio de 20 horas, umidade inicial dos grãos de 13-19% b.s., mantendo uma bandeja com carga de grãos e as outras bandejas vazias. Para o teor de umidade em 20% b.s, massa de grãos 3000 g, tempo de ensaio 6 horas, umidade inicial dos grãos de 10-13% b.s., realizado com apenas uma bandeja com grãos, mantendo as demais vazias.

Coefficiente de secagem LM

$$LM = \frac{E_{ev,ag}}{EM} \quad (\text{Eq. 3.10})$$

em que

[LM] = adimensional

Através da análise estatística dos resultados foram verificadas as possíveis interações das variáveis estudadas nas quatro respostas e, através de experimentos posteriores envolvendo apenas as condições operacionais que apresentaram influência significativa nas respostas sem comprometimento da qualidade do grão, realizou-se uma otimização do processo em estudo.

- o calor específico dos grãos de feijão foi calculado pela equação 2.2.

O coeficiente de secagem, CS, foi definido como a quantidade de água evaporada por quantidade de energia fornecida à operação.

O coeficiente de secagem, LM, definido por LIMA (1997) como a razão entre a energia gasta para vaporizar a água e a energia mecânica necessária para bombear o ar, foi utilizado para comparar os experimentos I e II através dos aspectos fluidodinâmicos, que foram diferentes em cada um. Portanto, para este trabalho:

Eficiência de secagem

$$ES = \frac{E_{aq,g} + E_{ev,ag}}{ET} \quad (\text{Eq. 3.8})$$

em que

$$E_{aq,g} = m_g \cdot c_{p,grão} (T_{gf} - T_{gi})/t_{aq,g}$$

$$E_{ev,ag} = \Delta H_{v,ag} \cdot (m_{sg,ev}/\text{tempo de secagem})$$

$$ET = E_{ter} + EM$$

$$E_{ter} = W \cdot c_{p,água} \cdot (T_a - T_{ao})$$

$$EM = \Delta P_L \cdot Q$$

Coeficiente de secagem CS

$$CS = \frac{M_{ag,ev} / \text{tempo de secagem}}{ET} \quad (\text{Eq. 3.9})$$

em que

$$[CS] = \text{kg/kJ}$$

- a energia necessária para aquecer os grãos foi definida com base no tempo utilizado para aquecê-los de sua temperatura inicial até a temperatura final, que permanece praticamente constante até o final do ensaio de secagem: $m_g \cdot c_{p,grão} (T_{gf} - T_{gi})/t_{aq,g}$;
- a energia necessária para evaporar a água foi considerada como o produto entre o calor de vaporização da água e a quantidade de água evaporada por tempo de secagem: $\Delta H_{v,ag} \cdot (m_{sg,ev}/\text{tempo de secagem})$;
- a energia térmica oferecida à operação foi calculada como $W \cdot c_{p,água} \cdot (T_a - T_{ao})$;
- a energia total fornecida para a operação foi considerada como a soma da energia térmica e da energia mecânica, utilizada para bombear o ar: $\Delta P_L \cdot Q$;
- o calor latente de vaporização foi considerado como aquele necessário para evaporar a água livre. Segundo MUTHU e CHATTOPADHYAY (1993), o calor latente de vaporização pode ser considerado como aquele necessário para evaporar a água livre, quando o teor de umidade do grão não é muito baixo (para umidades superiores a 25% b.s., conseguiu-se menos de 1% de erro). Os autores acima, obtiveram as seguintes expressões em ASAE (1982), para o calor de vaporização em função da temperatura:

$$\Delta H_{v,ag} = 2502,535259 - 2,38576424 \cdot T \quad \text{para } 0^\circ \text{C} \leq T_g \leq 65,56^\circ \text{C} \quad (\text{Eq. 3.6})$$

$$\Delta H_{v,ag} = [7329155,98 - 15,9959641 \cdot (T + 173)^2]^{1/2} \quad \text{para } 65,56^\circ \text{C} \leq T_g \leq 260^\circ \text{C} \quad (\text{Eq. 3.7})$$

em que

$\Delta H_{v,ag}$ = calor latente de vaporização, kJ / kg

- o calor específico do ar foi obtido em SMITH e VAN NESS (1975);

A escolha dos limites para a temperatura do ar de secagem foram baseados em estudos preliminares, que indicaram temperatura do grão abaixo do limite para manutenção de suas propriedades físico-químicas e organolépticas de 39°C (ZIMMERMANN, 1996), para a secagem realizada com temperatura do ar de 60°C. O limite superior de 80 °C, foi escolhido a fim de verificar possíveis danos térmicos no produto e sua influência no processo de secagem. Também, esses valores foram escolhidos para tornar possível a comparação dos resultados, com os obtidos por LIMA (1995) em leito de jorro sem intermitência.

Aplicou-se a técnica de planejamento fatorial para analisar e quantificar as influências das variáveis de processo na variável resposta. Segundo BOX, HUNTER e HUNTER (1978), planejamento fatorial consiste na realização de experimentos com todas as combinações possíveis dos valores das variáveis. As variáveis de processo deste trabalho, foram avaliadas em dois níveis, isto é cada variável possui dois valores, um chamado de nível superior (+), valor maior, e outro nível inferior (-), valor menor. Neste trabalho foi aplicada esta técnica em um processo com quatro variáveis de processo (umidade inicial, temperatura de secagem, tempo de intermitência no aquecimento e tempo de intermitência no regime fluidodinâmico) em dois níveis, e quatro variáveis resposta (razão de umidade dos grãos, eficiência energética e dois coeficientes de secagem). Foram feitos dois planejamentos tipo 2^3 (8 ensaios de secagem). O primeiro planejamento (2^3) vinculou-se às seguintes variáveis: umidade inicial, temperatura de secagem e tempo de intermitência no regime fluidodinâmico, nomeado de experimento I – leito de jorro/leito fixo. O segundo planejamento trabalhou com as variáveis umidade inicial, temperatura de secagem e tempo de intermitência no aquecimento simultâneo ao tempo de intermitência no regime fluidodinâmico, denominado experimento II – leito de jorro/descanso.

A eficiência energética e um coeficiente de secagem foram calculados baseados na definição de PASSOS, MUJUMDAR e RAGHAVAN (1989). A eficiência de secagem, ES, foi determinada como a energia necessária para aquecer os grãos e evaporar a água em relação à energia total fornecida à operação. Foram feitas algumas considerações para os cálculos energéticos:

O cálculo da umidade foi feito a partir da equação 2.7.

A massa das cápsulas de evaporação vazias foi obtida em balança analítica digital após 24 horas de permanência em estufa a $(105 \pm 3)^{\circ}\text{C}$ e 1 hora no dessecador.

3.2.4. Secagem

Para a realização dos ensaios de secagem dos grãos de feijão, uniformizou-se os teores de umidades iniciais. Para controlar a umidade inicial, foi necessário proceder a umidificação dos grãos provindos da safra, de maneira a tornar a massa inicial de água contida nos grãos nos valores especificados para os experimentos. Em seguida, inseriu-se no leito secador uma massa de grãos de 3,20 kg. A secagem dos grãos foi monitorada ao longo da altura do leito com medidas de temperatura e queda de pressão, bem como o acompanhamento visual do regime fluidodinâmico. Os limites superiores e inferiores das variáveis do processo: tempo de intermitência no aquecimento, tempo de intermitência no regime fluidodinâmico e temperatura da secagem foram determinados em experimentos preliminares com os valores de 20 (limite inferior) e 40 minutos (limite superior), para o tempo de intermitência, 20% e 30% em base seca, para a umidade inicial e 60°C e 80°C para a temperatura do ar de admissão no leito secador.

Os tempos de intermitência de cada intervalo foram fixados em 20 e 40 minutos, pois testes preliminares indicaram variações no comportamento hidrodinâmico no leito de grãos durante a secagem.

Os valores da umidade inicial foram fixados baseados no fato de que os grãos provindos da safra colhida durante o período da “seca” não excede o valor de umidade de 20% b.s., enquanto que os grãos colhidos durante o período das “chuvas”, atinge valores de 30% b.s.

Temperatura do grão

A amostra retirada do leito secador foi imediatamente colocada em um calorímetro para a determinação de sua temperatura.

O calorímetro é constituído de uma garrafa térmica de 180 mm de altura, com um termopar padrão tipo “T” (Cu-Ct), com 150 mm de haste, introduzido através de um furo no centro de sua tampa, conectado a um indicador digital calibrado da marca Cole Parmer (Figura 3.5).

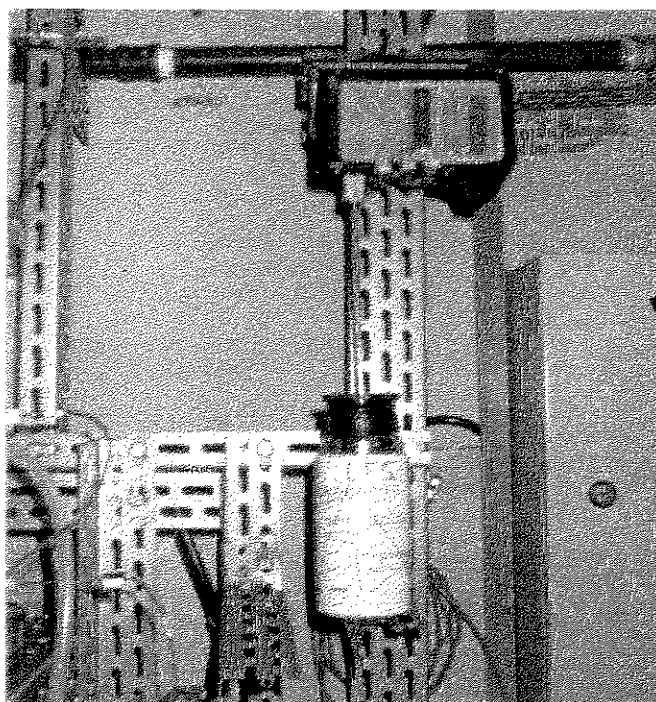


FIGURA 3.6 – Vista do sistema de medição da temperatura do grão

Umidade do grão

A umidade do grão foi determinada pelo método estático, que consistiu em deixar as amostras em cápsulas de evaporação, em estufa a 105°C por 24 horas. A massa utilizada para a determinação da umidade foi a mesma para a determinação da temperatura do grão, ou seja, aproximadamente 10 gramas.

Vazão de ar no leito secador

A vazão de ar admitida no leito secador foi determinada através de uma placa de orifício construída em aço inox, com borda esquadrinhada e tomada de pressão de canto, confeccionada segundo DIN, instalada na linha à saída do compressor. Para o cálculo da vazão utilizou-se a equação 3.5, apresentada anteriormente.

Temperatura do ar

As temperaturas do ar de entrada e saída do leito secador foram obtidas por termopar tipo “T”, (Cu-Ct), conectados a um multímetro digital da marca IOPE.

Queda de pressão no leito

A queda de pressão no leito secador foi obtida através da placa aquisitora de dados utilizando como interface o *software* “Labtech 9.0”.

Amostragem dos grãos

As variáveis temperatura do grão e conteúdo de umidade foram obtidas por meio de amostragens ao longo do processo de secagem. A amostragem de partículas foi feita utilizando um amostrador construído em acrílico, com uma cavidade na parte superior de seu comprimento, introduzido no leito através de um orifício na sua parte cilíndrica. O amostrador consistia de um copo cilíndrico, de altura de 80 mm, e diâmetro de 20 mm, preso a uma haste de altura de 60 mm, com rosca externa, de capacidade para aproximadamente 10 g de feijão, cuja vista aparece na Figura 3.5.

Foram retiradas 13 amostras durante cada ensaio de secagem, ao longo de 240 minutos. Os tempos em que foram retiradas as amostras variaram de acordo com cada tipo de experimento, experimento I – leito de jorro/leito fixo e experimento II – leito de jorro/descanso.

$$\text{Canal 01 : } Y = 164,8.X - 157,8 \quad (\text{Eq. 3.2})$$

$$\text{Canal 02 : } Y = 3567,3.X - 13218,38 \quad (\text{Eq. 3.3})$$

$$\text{Canal 03 : } Y = 151,0.X - 157,28 \quad (\text{Eq. 3.4})$$

Nessas equações, X representa a média das flutuações em volts (V) adquirida pela placa e Y, a queda de pressão ou a pressão estática, em milímetros de água (mm H₂O).

Através de medidas de pressão estática na linha e de queda de pressão na placa de orifício, tomadas pelos transdutores absoluto e diferencial, respectivamente, foi possível calcular a vazão. A equação de calibração da vazão obtida foi (OWER e PANKHURST, 1977):

$$Q = 13,4255 \cdot \sqrt{\frac{\Delta h}{T + 273,15}} - \frac{5,1781}{P + 1018,57} \cdot \frac{\sqrt[3]{\Delta h}}{\sqrt{T + 273,15}} \quad (\text{Eq. 3.5})$$

onde Δh = queda de pressão na placa de orifício (cmH₂O);

P = pressão estática na linha (cmH₂O);

T = temperatura do ar na linha (°C);

Q = vazão do ar (Kg/min).

3.2.3. Medidas experimentais

Nos experimentos de secagem foram realizadas medidas experimentais visando controlar e acompanhar o processo de secagem. Na sequência são apresentadas as medidas realizadas.

O leito de dimensões mostradas na Figura 3.5, foi construído em acrílico para possibilitar a observação visual do regime de operação desejado. O projeto do leito permite operá-lo com dois diferentes ângulos de base cônica: 45° e 60° . Experimentos preliminares determinaram a utilização do ângulo de 60° , o qual forneceu as melhores taxas de circulação de sólidos, sem provocar danos mecânicos aparentes nos sólidos. Com o intuito de se fazer medidas de pressão e temperatura no leito, foram instalados vários pontos de medidas, os quais foram utilizados para verificar a queda de pressão e acompanhar os valores de temperaturas no leito. Um ponto na entrada e outro logo acima da superfície dos sólidos contidos no leito secador, conectados por tubos de borracha de silicone ao transdutor diferencial e esse ligado a um sistema de aquisição de dados, permitiu o acompanhamento da queda de pressão no leito em tempo real, e quatro pontos instalados ao longo da altura do leito, proporcionaram a obtenção do perfil de temperatura, através de termopares conectados a um indicador digital de temperatura, graduado em graus Celsius.

A placa aquisitora de dados foi gerenciada pelo software *Labtech – Versão 9.0*, o qual permitiu tratar as medidas de pressão com os transdutores absoluto e diferencial em tempo real. O software permite a leitura e interpretação de todos os sinais enviados à placa e é capaz de realizar operações matemáticas em linha durante a aquisição dos dados, além do gerenciamento de arquivos de dados para cada canal ou um dado agrupamento deles. Três canais foram ligados dos transdutores ao computador. Uma interface gráfica permite que o usuário trabalhe com os dados adquiridos de diversas formas, através da inserção de diferentes ícones nesta interface e relacionando-os entre si. Estes ícones representam diversas funções, como transformação de dados, cálculos matemáticos, gravação em arquivo ou visualização gráfica da aquisição em tempo real. Para cada canal, medindo-se a voltagem média respectiva a cada valor da queda de pressão, foi feita a regressão linear, obtendo-se então a equação de uma reta, que representa a calibração do equipamento de medida. Os canais utilizados para obtenção de vazão e queda de pressão no leito foram apenas três – um para medida da queda de pressão no leito; outro para medida da queda de pressão na placa de orifício e para medida da pressão estática na linha. As equações de calibração dos canais são:

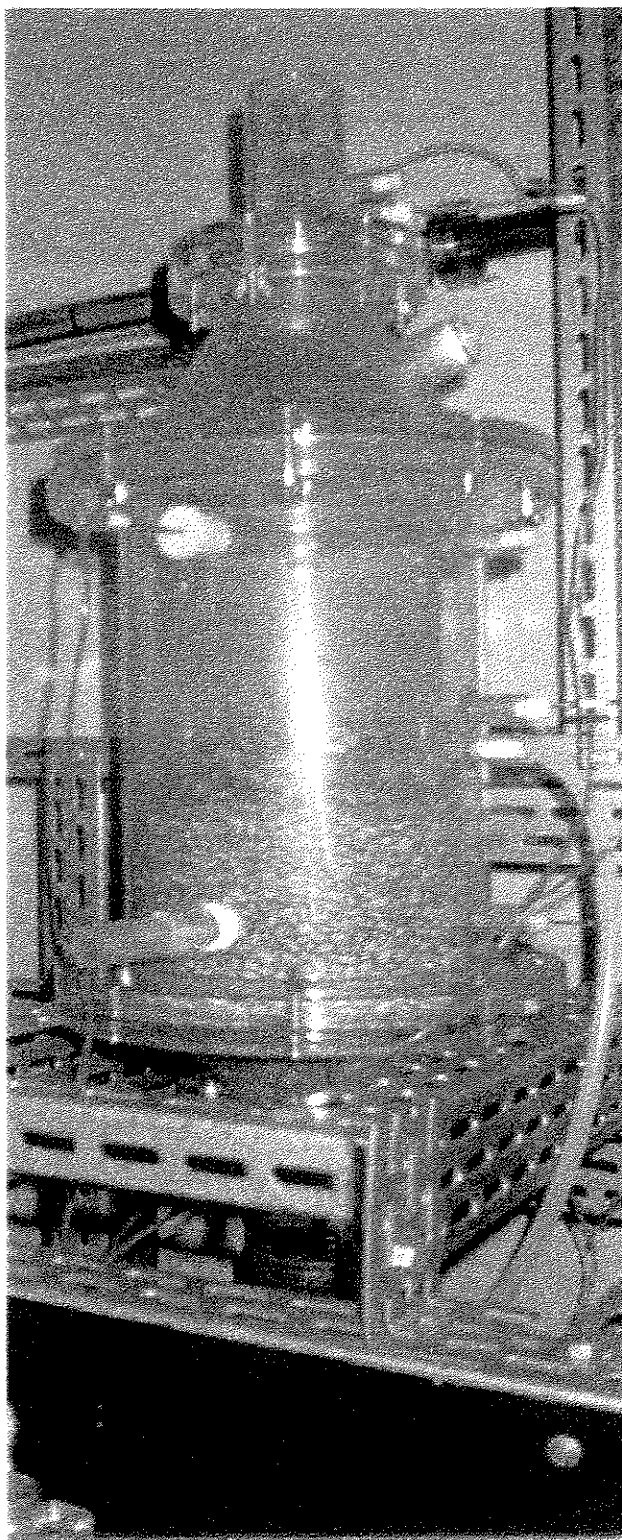
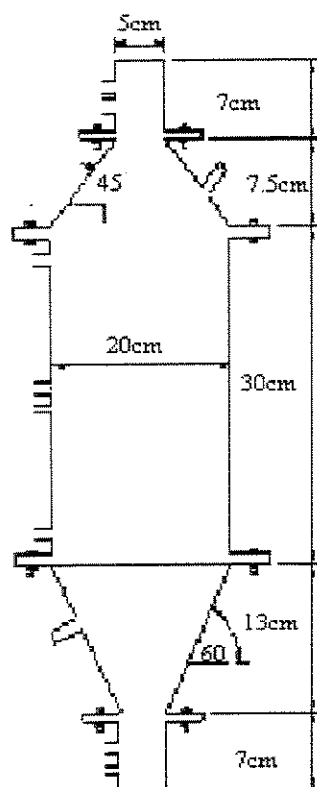


FIGURA 3.5 – Dimensões do leito utilizado e vista do leito carregado com grãos de feijão

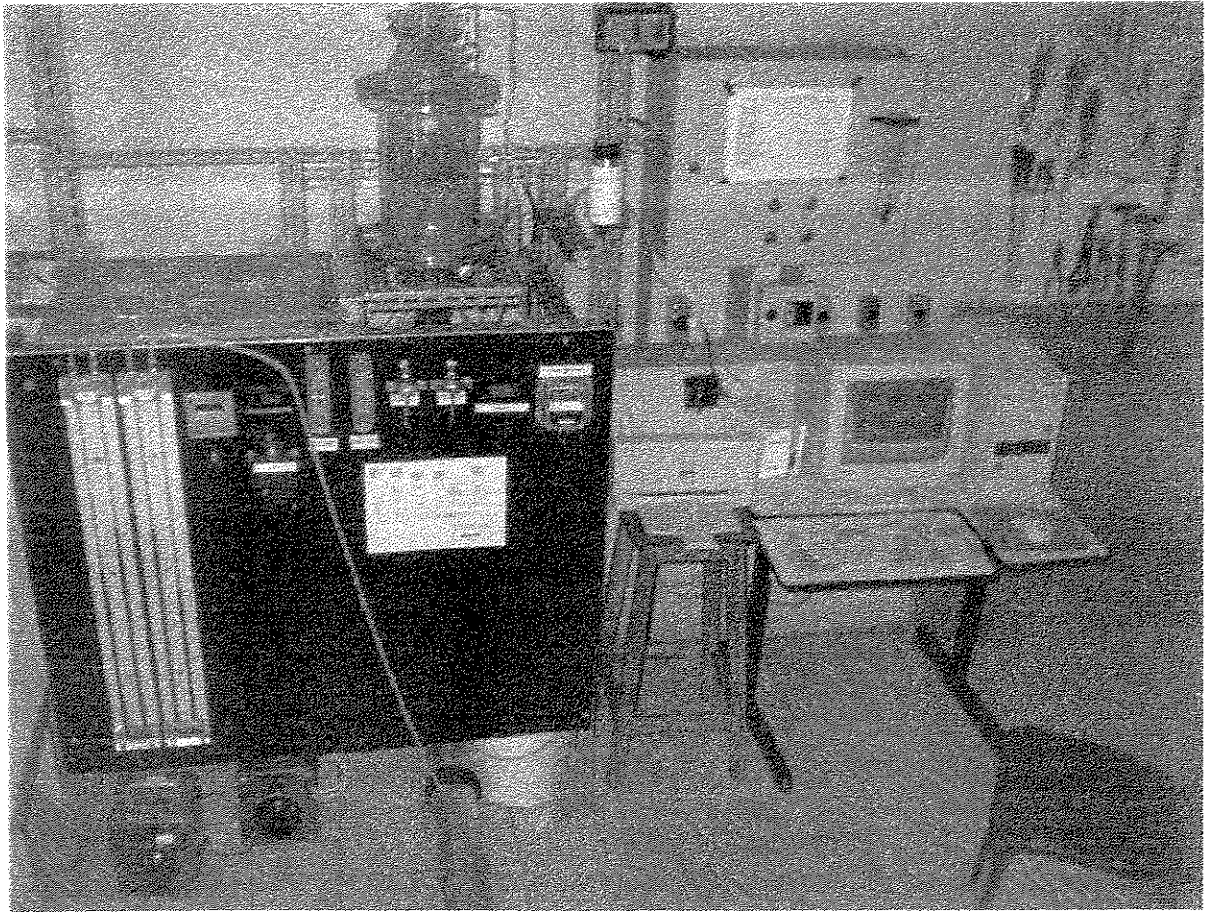


FIGURA 3.4 – Vista do sistema experimental

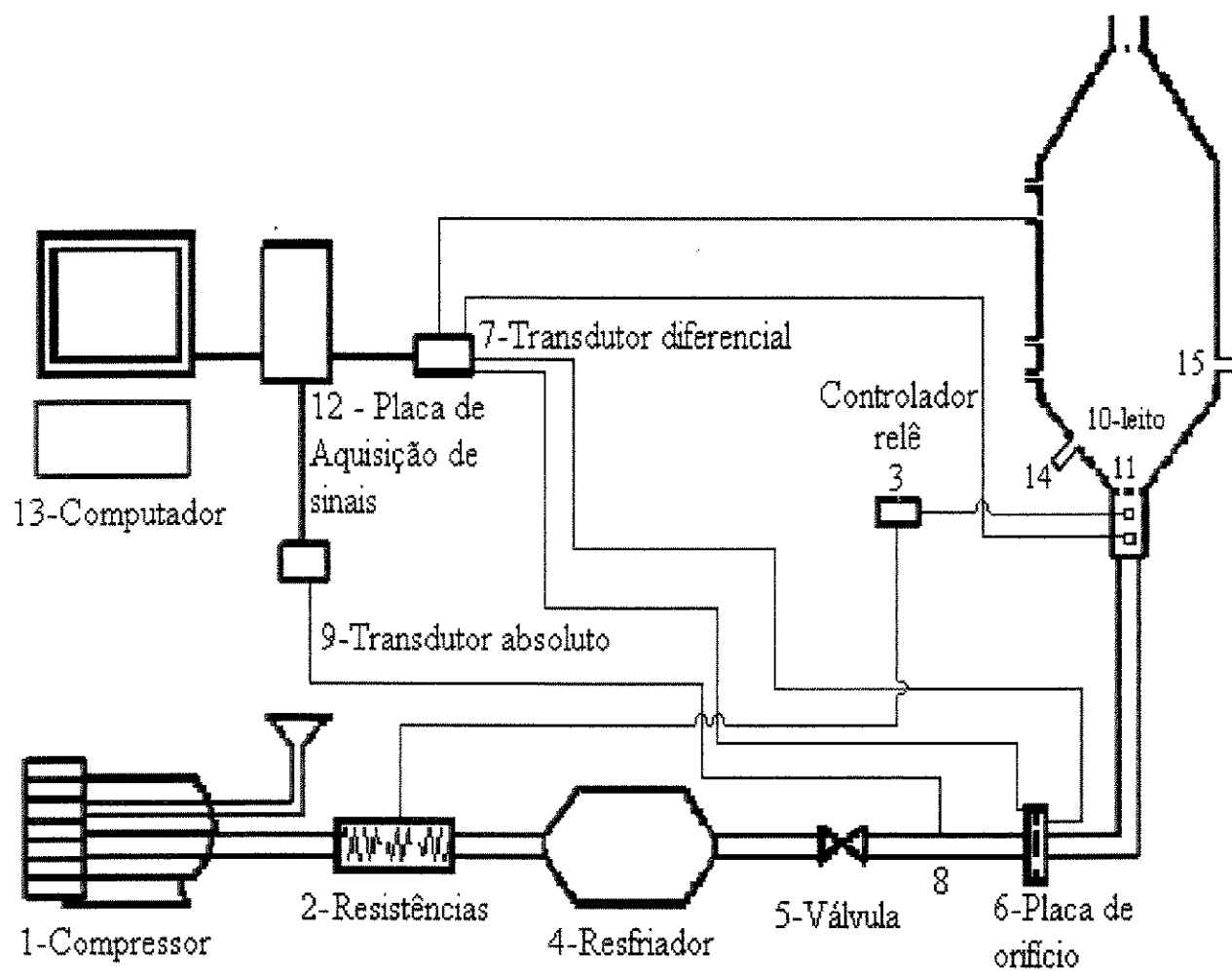


FIGURA 3.3 – Esquema do Sistema Experimental

O sistema de secagem é composto por um compressor do tipo ibram® 7,5 cv (1), que forneceu ar para o sistema, o qual foi aquecido por um conjunto de três resistências (2). Em (3), a temperatura do ar foi controlada através de um controlador com relê liga-desliga. O resfriador (4) foi utilizado para manter a temperatura nos valores desejados. O resfriador utilizado foi feito com aletas de alumínio e tubos de cobre, sendo o fluido refrigerante a água. A vazão do ar foi controlada pela válvula (5) e medida pela queda de pressão na placa de orifício (6) – através de um transdutor diferencial (7), e da pressão estática na linha (8), dada pelo transdutor absoluto (9). Os transdutores foram conectados à placa de aquisição de sinais analógico/digital PCL-711S (12). O ar então chega à entrada do leito (10). A placa distribuidora (11) foi utilizada para proporcionar uma distribuição uniforme do ar. A amostragem de partículas foi feita utilizando um amostrador construído em acrílico com rosca externa (15). Para descarregar o leito de sólidos utilizou-se uma saída (14). A tubulação usada foi de duas polegadas nominal, de ferro galvanizado.

O umidificador é composto de um reservatório marca PERMATEX® com capacidade de 250 litros. Os grãos foram acondicionados em quatro bandejas cujas estruturas foram feitas de cantoneiras e tela de aço inox, com o fundo suportada por duas barras de aço inox chato soldadas às cantoneiras. Cada bandeja tem capacidade máxima de 10 Kg de grãos de feijão, perfazendo um total de 40 Kg a capacidade total do umidificador.

Um controlador de temperatura da marca SYSCON modelo Rex-C410 acoplado a uma resistência elétrica que dissipa aproximadamente 3500W a 220V, mantém a temperatura da água na temperatura de trabalho, 60°C.

Em uma balança semi-analítica, mediu-se a massa de 3,00 kg, para cada bandeja. Distribuiu-se os grãos de feijão de maneira uniforme. As bandejas foram colocadas no interior do reservatório, já com uma altura de 11 a 12 cm de água (com base no fundo do reservatório). Ligou-se a bomba de recirculação com o sistema de aquecimento já com a temperatura fixa no valor desejado. O processo de umidificação teve seu início, e ao longo de 20 horas, foram feitas amostragens de aproximadamente 15g cada uma, de 8 em 8 horas, a fim de acompanhar o aumento da massa de água no interior dos grãos.

Com esse procedimento, foi estabelecida a metodologia para a reumidificação controlada de grãos e sementes fixando o tempo de reumidificação em 20 horas para obtenção do teor de umidade em torno de 30% b.s. e 6 horas para o teor de umidade de 20% b.s., sem interrupções.

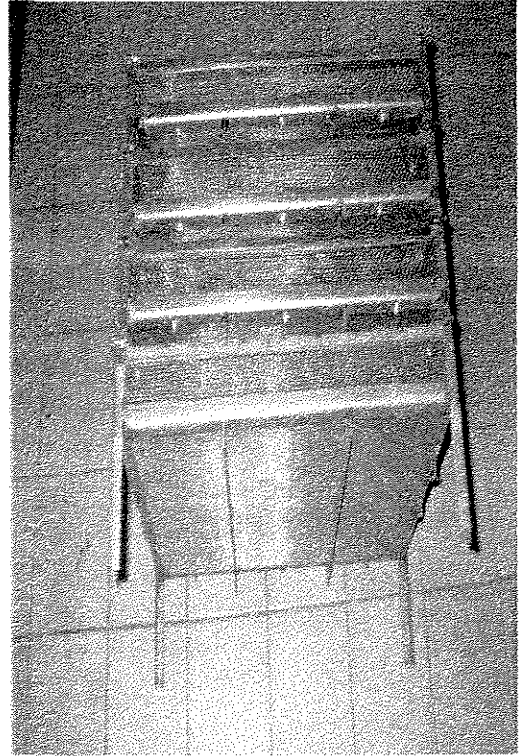
3.2.2. Sistema experimental

Os equipamentos utilizados neste trabalho foram projetados e construídos de forma a permitir o acompanhamento visual durante a realização dos experimentos de secagem.

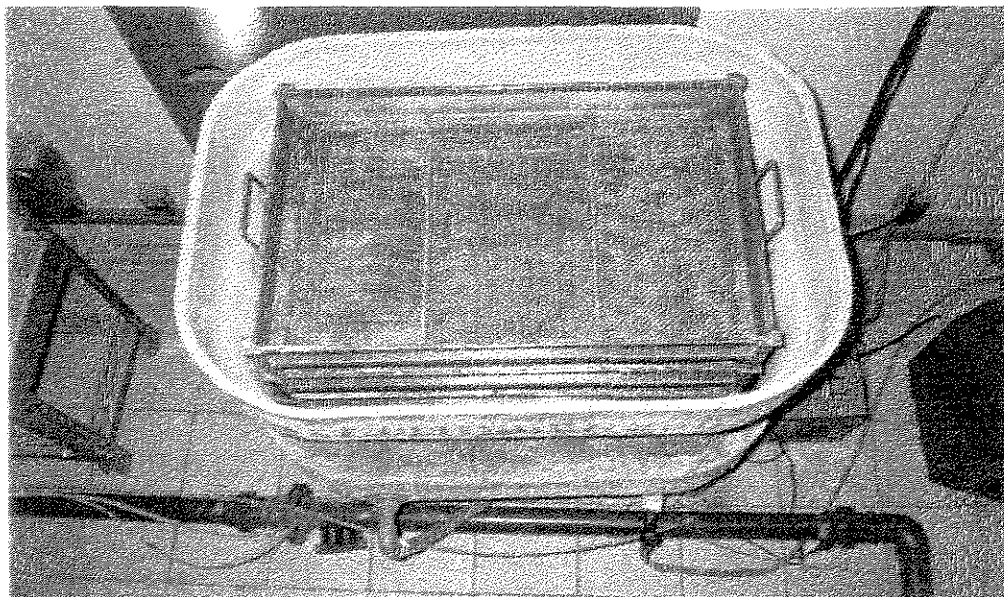
Um esquema do sistema de secagem está apresentado na Figura 3.3 e a Figura 3.4 mostra a montagem experimental.



(a)

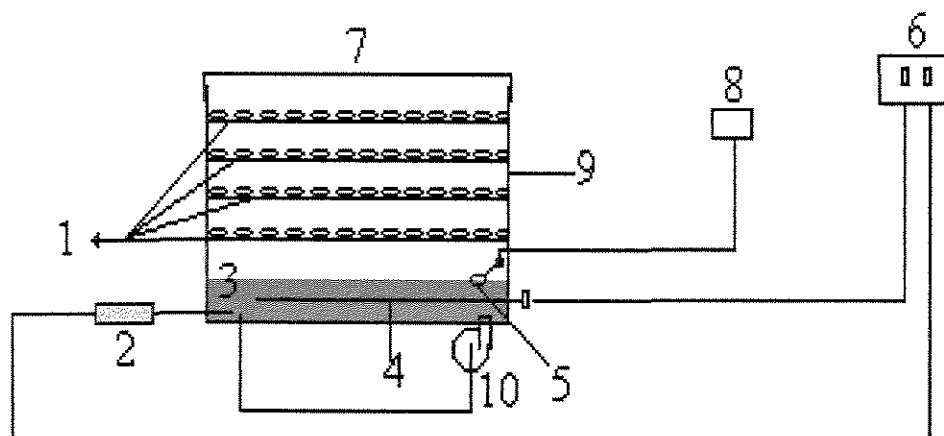


(b)



(c)

FIGURA 3.2 – Umidificador de grãos: (a) Vista de cima, resistência blindada tipo “U” e bóia controladora de nível; (b) Peneiras em inox; (c) Reservatório com as peneiras



- 1 - peneiras em inox com carga de grãos
- 2 - termopar tipo "J"
- 3 - água
- 4 - resistência em inox blindada tipo "U"
- 5 - bóia controladora de nível
- 6 - controlador de temperatura da água
- 7 - tampa vedada da caixa
- 8 - alimentação de água
- 9 - reservatório de umidificação
- 10 - bomba de recirculação da água

FIGURA 3.1: Esquema do Umidificador de Grãos

TABELA 3.1 – Propriedades físicas do feijão variedade “carioca”

Material	Massa Específica (kg/m ³)	Diâmetro Médio (mm)	Esfericidade
Feijão Carioca	755±5	7,34 ±0,23	0,460±0,003

3.2. Equipamentos e procedimentos experimentais

3.2.1. Umidificação de grãos

Os grãos disponíveis utilizados nos testes, apresentaram teores de umidade abaixo do necessário para o desenvolvimento dos experimentos. Desta forma, um sistema de reumidificação de grãos tornou-se necessário.

O grão de feijão é um material higroscópico e, portanto, sua umidade pode ser modificada quando exposta a um ambiente, cuja pressão parcial de vapor é diferente da pressão parcial de vapor contida no seu interior. Este comportamento foi utilizado como princípio para construção de um umidificador de grãos, cujo esquema está apresentado na Figura 3.1 e a Figura 3.2 mostra a montagem experimental.

3. MATERIAIS, EQUIPAMENTOS E MÉTODOS EXPERIMENTAIS

O sistema experimental utilizado neste trabalho encontra-se no laboratório de Fluidodinâmica e Secagem do Departamento de Termofluidodinâmica da Faculdade de Engenharia Química da Universidade Estadual de Campinas.

3.1. Material utilizado

Os experimentos foram realizados com feijão do gênero *Phaseolus vulgaris* L, variedade “carioca”, obtidos junto à empresa Broto Legal Ltda. Esses grãos possuem as seguintes características: forma oblonga-curta, tegumento com cor creme marmorizado com listras havana e massa média de 34 gramas para 150 grãos.

A massa específica foi determinada por picnometria. A equação utilizada para o cálculo foi:

$$\rho = \frac{P_s}{(P_a + P_s) - (P_t)} \quad (\text{Eq. 3.1})$$

onde ρ = massa específica dos sólidos;

P_s = massa dos sólidos;

P_a = massa do picnômetro com água;

P_t = massa do picnômetro com os sólidos e água.

A esfericidade foi determinada através do método 1, equação 2.5.

O diâmetro médio, foi medido com o uso de um paquímetro.

As propriedades físicas do feijão são apresentadas na Tabela 3.1.

de secagem é a razão entre a energia necessária para aquecer o grão e evaporar a água e a energia total fornecida à operação. Neste mesmo trabalho, um outro coeficiente foi definido, EFF2, como sendo a razão entre a quantidade de água evaporada e a energia total fornecida à operação. A energia total fornecida à operação inclui a energia necessária para aquecer o ar e a energia mecânica para bombeá-lo.

apenas a energia necessária para aquecer o ar) e a massa de água removida no mesmo período:

$$ESC = \frac{\dot{E}_{aq,a}}{\dot{W}_{aq,ev}} \quad (\text{Eq. 2.21})$$

Outra definição do autor é a taxa de consumo energético (ECR), que relaciona o consumo energético específico ao calor latente de vaporização da água em θ , temperatura em que a água é vaporizada. O calor latente no caso, é aquele necessário para vaporizar a água livre.

$$ECR = \frac{ESC}{\Delta H_{va,\theta}} \quad (\text{Eq. 2.22})$$

A eficiência energética é então definida como o inverso da taxa de consumo energético, sendo mais elevada quanto maior for a performance energética do secador:

$$EF = \frac{1}{ECR} \quad (\text{Eq. 2.23})$$

O autor fornece ordens de grandeza para os critérios acima estabelecidos. Para secadores convectivos na indústria de alimentos, operando sem sistema de recuperação de energia, os valores de ESC se encontram entre 3300 e 6500 kJ/kg, ECR na faixa de 1,5 a 3,0 e a eficiência energética, EF, entre 0,3 e 0,7.

PASSOS, MUJUMDAR e RAGHAVAN (1989), utilizaram uma definição de eficiência de secagem visando a comparação dos secadores de grãos de leite de jorro e de leite de jorro fluidizado, ambos com geometria cone-cilíndrica. Para os autores, a eficiência

como: - redução no gasto de energia, quando comparado com o regime contínuo; - aumento da qualidade final dos grãos, diminuindo danos mecânicos e térmicos.

2.10. Eficiência energética da secagem

A operação de secagem utilizando secadores convectivos proporciona altos gastos de energia, uma vez que para a evaporação da umidade contida no grão, uma grande quantidade de energia é gasta e não recuperada. Um critério fundamental para a avaliação de secadores é então sua eficiência energética (LIMA, 1995).

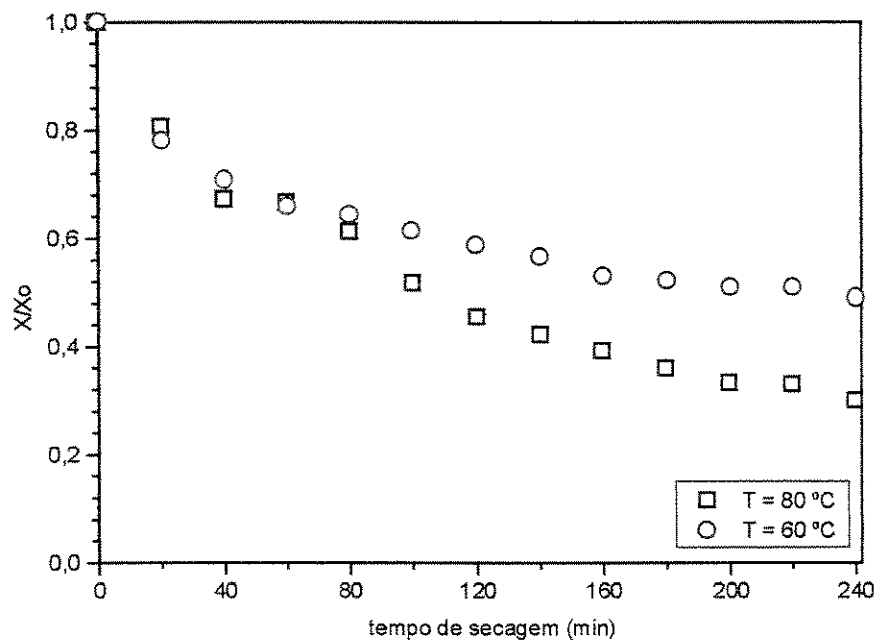
STRUMILLO e KUDRA (1986), afirmam que a secagem consome até 70% da energia total nas indústrias de produtos derivados de madeira, é responsável por cerca de 50% do consumo energético das indústrias têxteis e utiliza cerca de 60% do total de energia no processo de produção de milho nas fazendas. Segundos os autores RICHARDSON e JENSON (1976), para os 17 tipos de secadores industriais para sólidos que pesquisaram, concluíram que dentre eles apenas 5 contribuíam com 99% da energia total consumida pelo grupo: flash, torre cilíndrica, rotatório contínuo e batelada e leito fluidizado.

A eficiência energética de um secador, η (STRUMILLO e KUDRA, 1986), pode ser definida como:

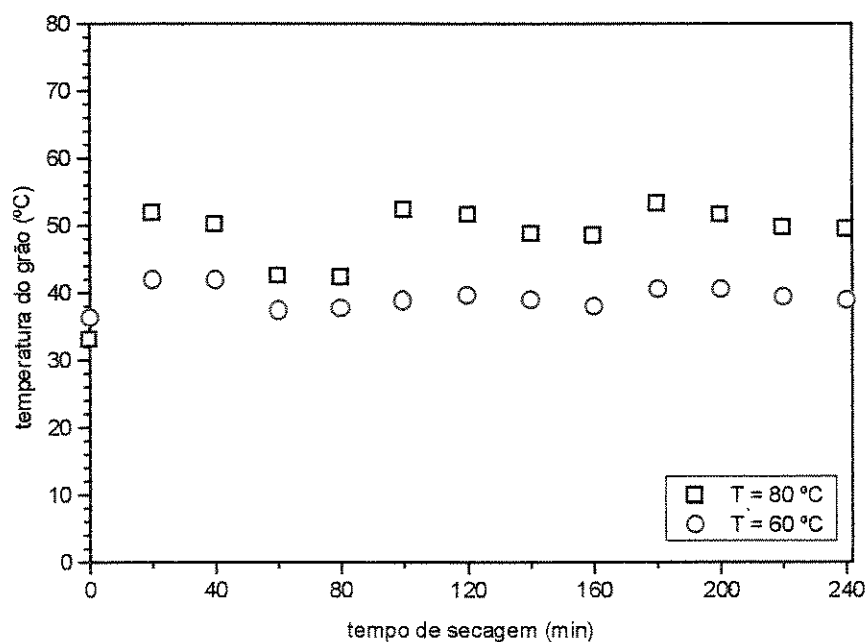
$$\eta = \frac{\text{energia necessária para evaporação da umidade em } T_{so}}{\text{energia total fornecida à operação}} \quad (\text{Eq. 2.20})$$

sendo T_{so} = temperatura de alimentação dos sólidos.

BIMBINET (1982), estabeleceu também alguns critérios para a avaliação energética de secadores convectivos. Em seu trabalho ele definiu um consumo energético específico (ESC), como a razão entre a energia térmica para operar o secador (no caso, considera

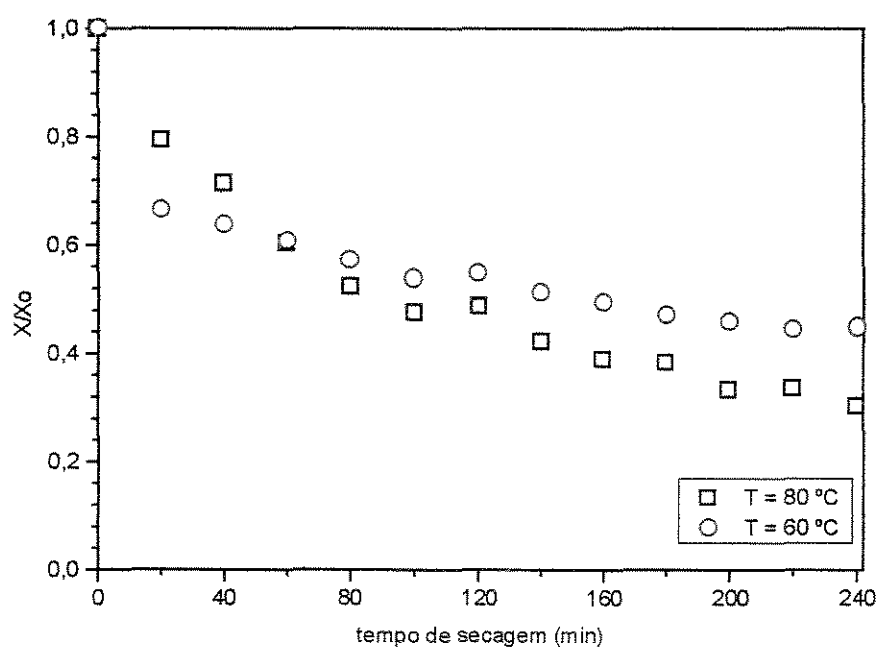


(a)

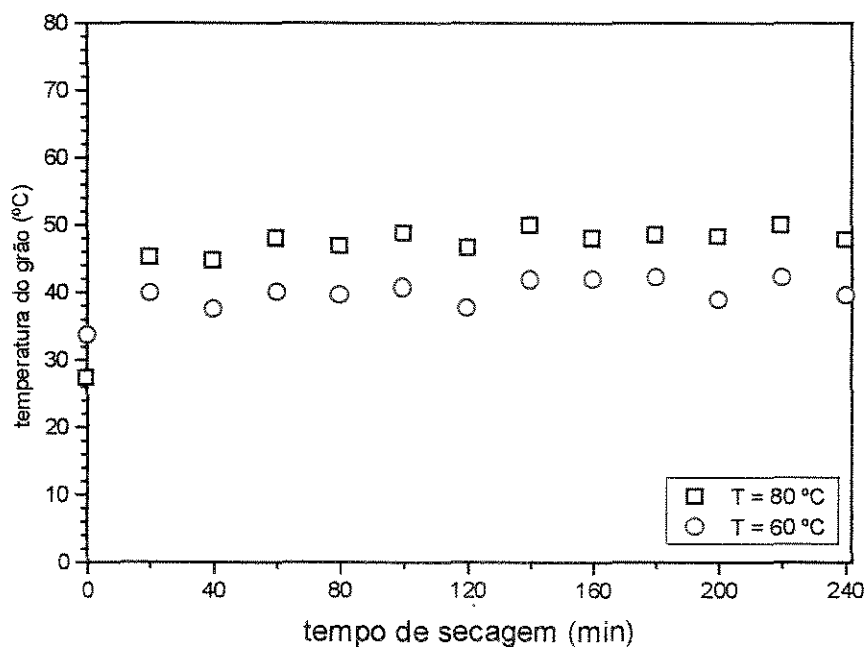


(b)

FIGURA 4.7 - Influência da temperatura do ar de entrada. Condições: $t_i = 40$ min ; $X_0 = 30$ %
b.s. – Leito Jorro/fixo – (a) Umidade do grão em função do tempo (b) Temperatura do grão em função do tempo

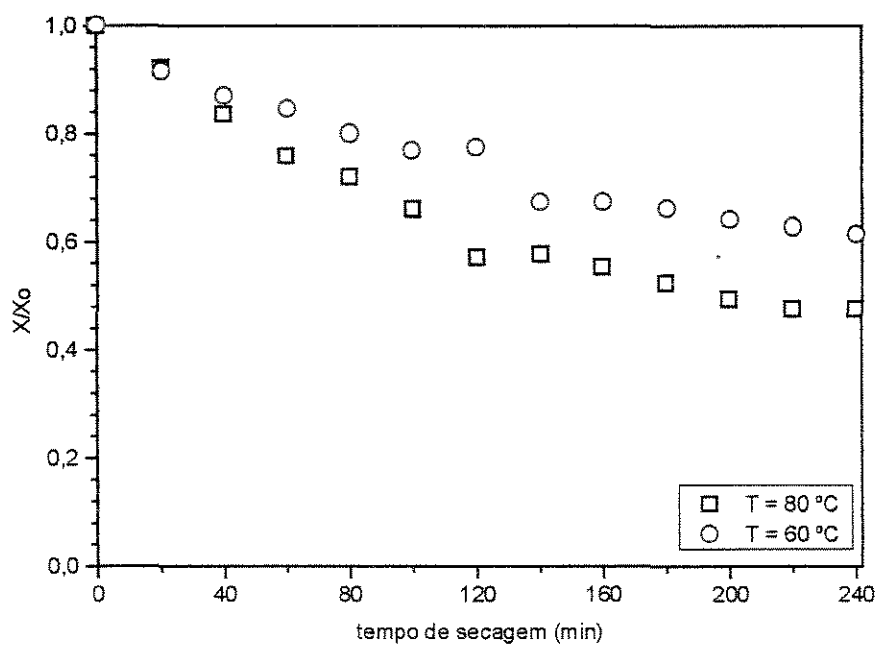


(a)

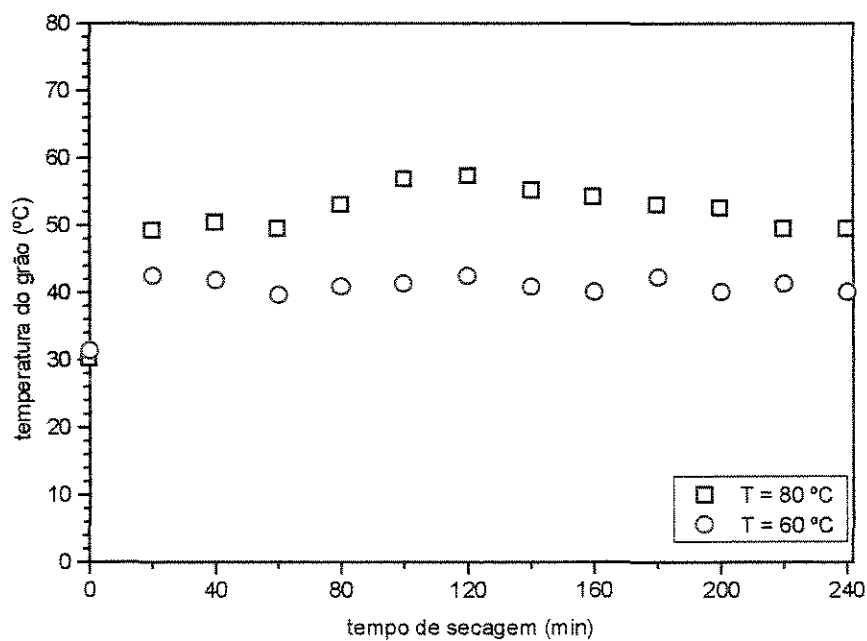


(b)

FIGURA 4.8 - Influência da temperatura do ar de entrada. Condições: $t_i = 20$ min ; $X_o = 30$ %
b.s. – Leito Jorro/fixo – (a) Umidade do grão em função do tempo (b) Temperatura do grão em função do tempo

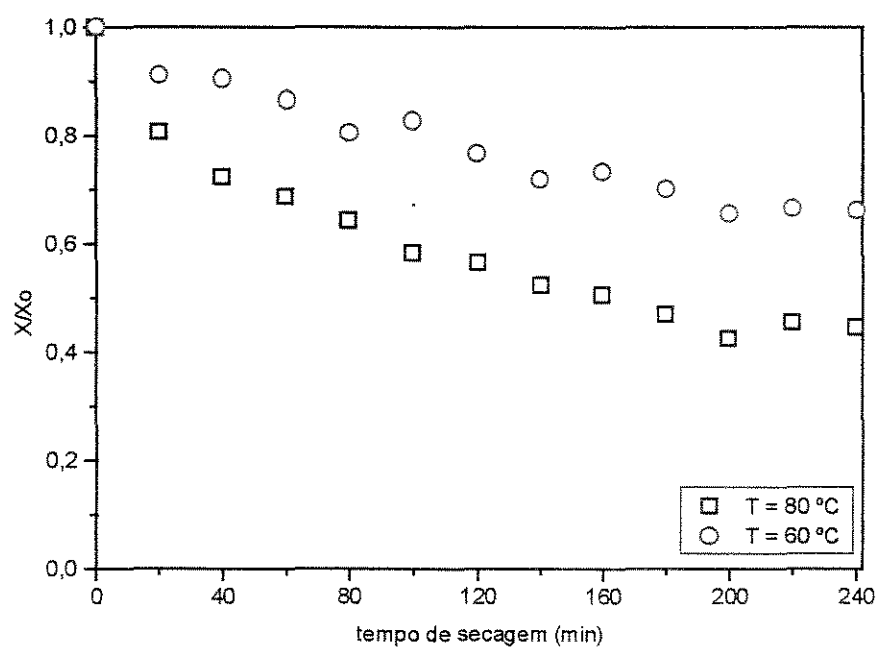


(a)

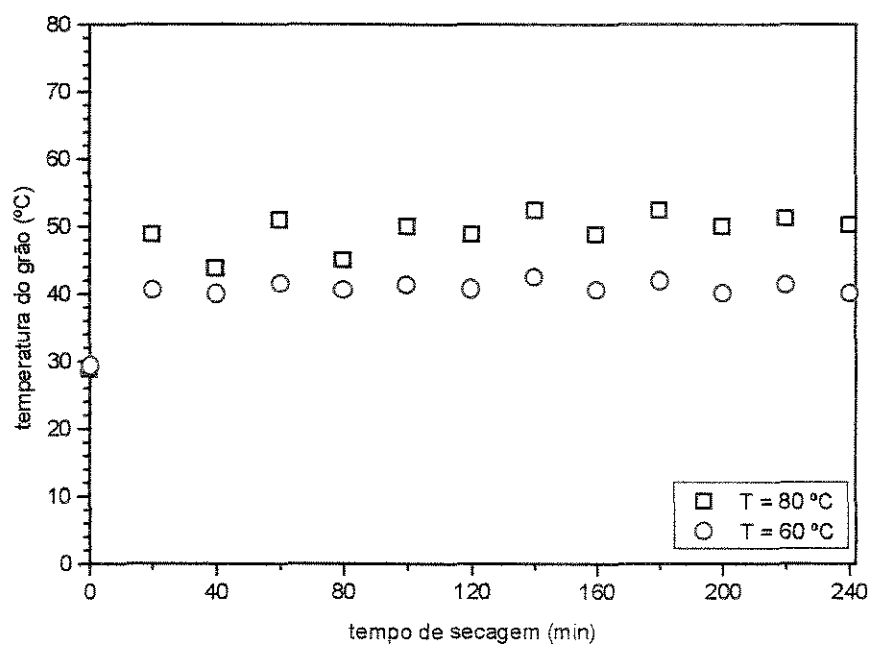


(b)

FIGURA 4.9 - Influência da temperatura do ar de entrada. Condições: $t_i = 40\text{ min}$; $X_o = 20\%$ b.s. – Leito Jorro/fixo – (a) Umidade do grão em função do tempo (b) Temperatura do grão em função do tempo



(a)



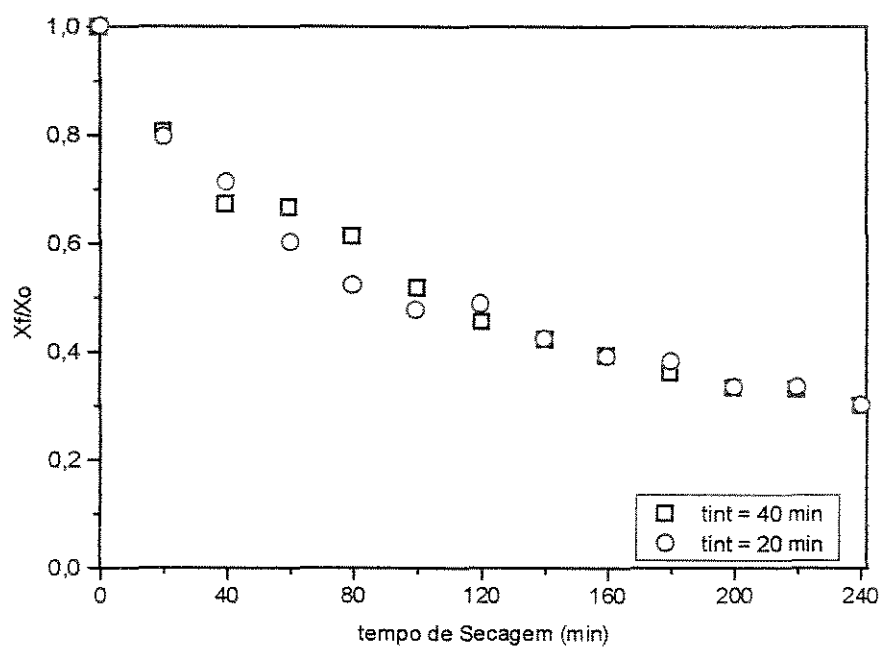
(b)

FIGURA 4.10 - Influência da temperatura do ar de entrada. Condições: $t_i = 20$ min ; $X_0 = 20$ %
b.s. – Leito Jorro/fixo – (a) Umidade do grão em função do tempo (b)
Temperatura do grão em função do tempo

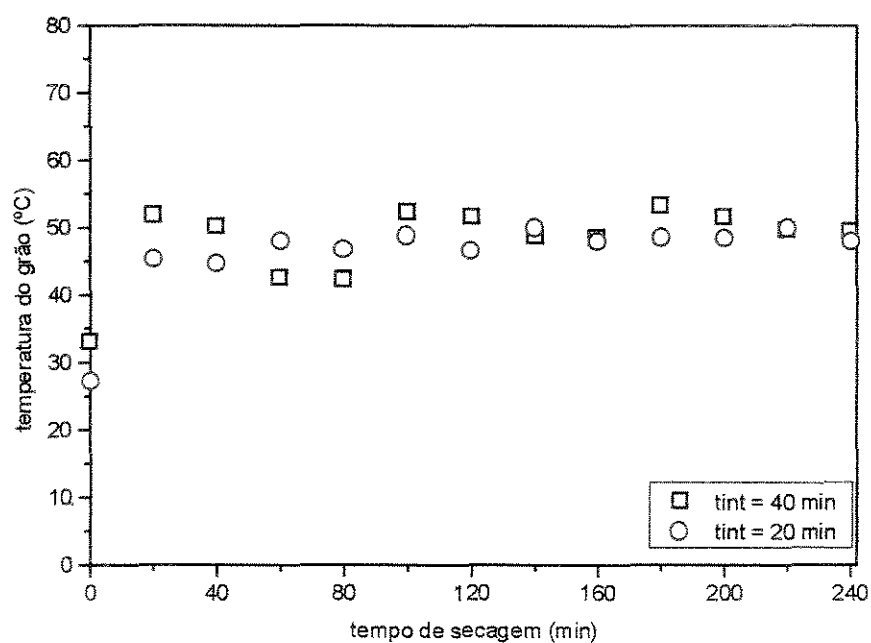
4.3.3. Efeito do tempo de intermitência do regime fluidodinâmico

A variável tempo de intermitência dos ensaios de secagem foi utilizada de forma a obter os regimes de leito de jorro e leito fixo. Para isto foi necessário uma alteração na vazão de ar quente em dois níveis, caracterizando assim o regime de intermitência na secagem.

As Figuras 4.11a a 4.14a representam a influência do tempo de intermitência na curva de secagem dos grãos de feijão e as Figuras 4.11b à 4.14b, a mesma influência na temperatura dos grãos para as condições operacionais intermitentes do leito secador em regime leito de jorro/fixo. Observa-se que não houve influência do tempo de intermitência no processo de secagem.

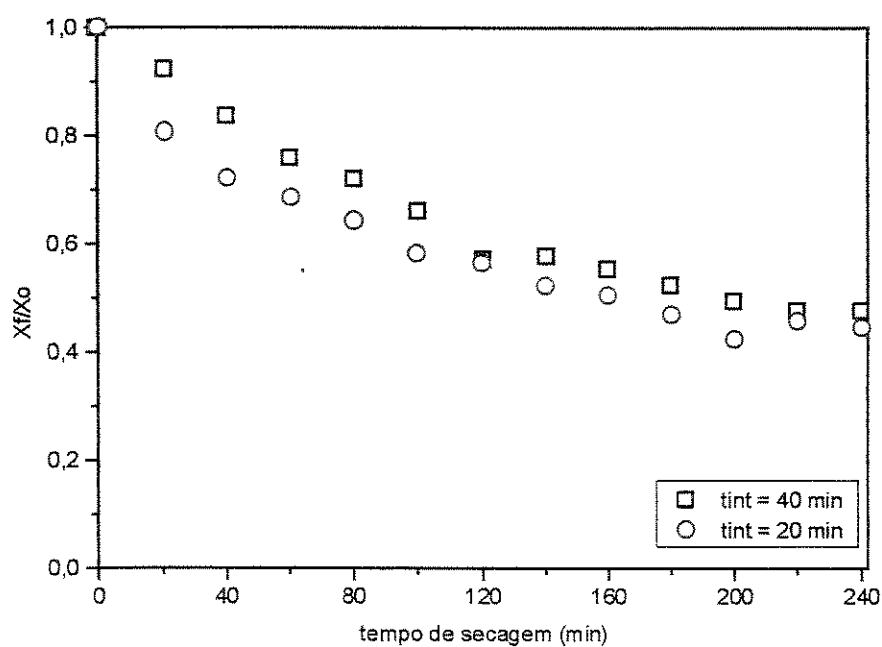


(a)

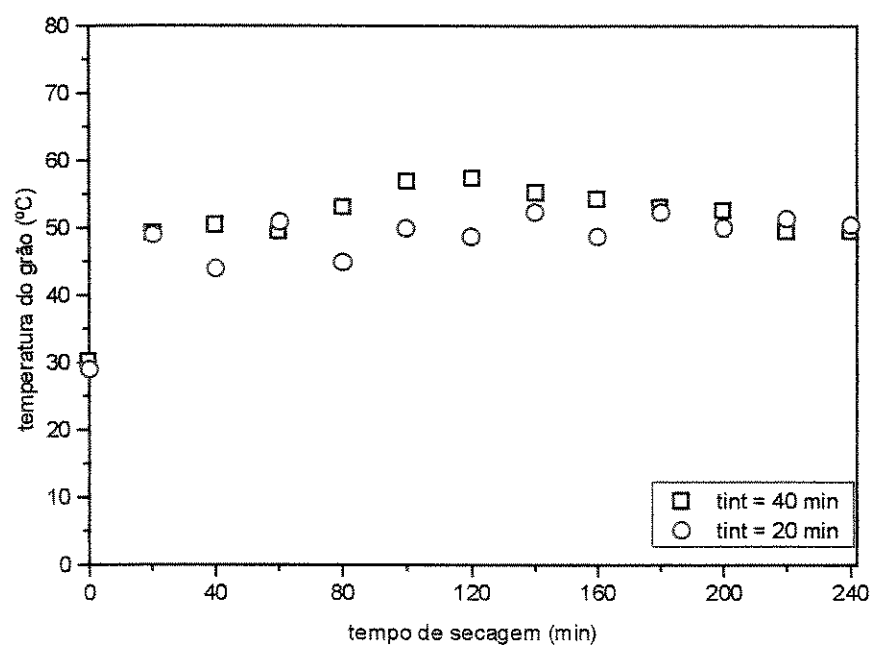


(b)

FIGURA 4.11 - Influência do tempo de intermitência. Condições: Tar = 80 $^{\circ}\text{C}$; X_o = 30 % b.s. – Leito Jorro/fixo – (a) Umidade do grão em função do tempo (b) Temperatura do grão em função do tempo

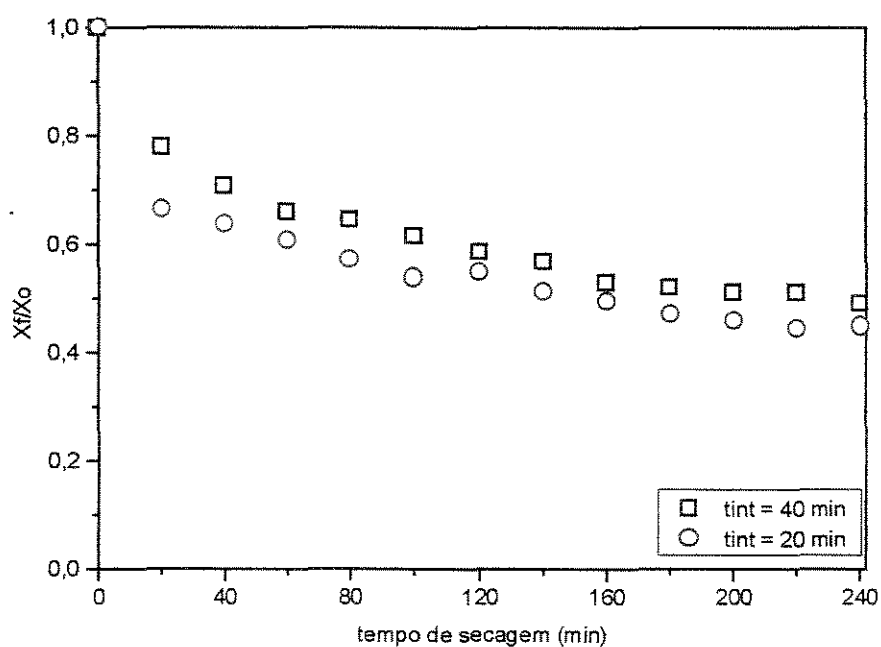


(a)

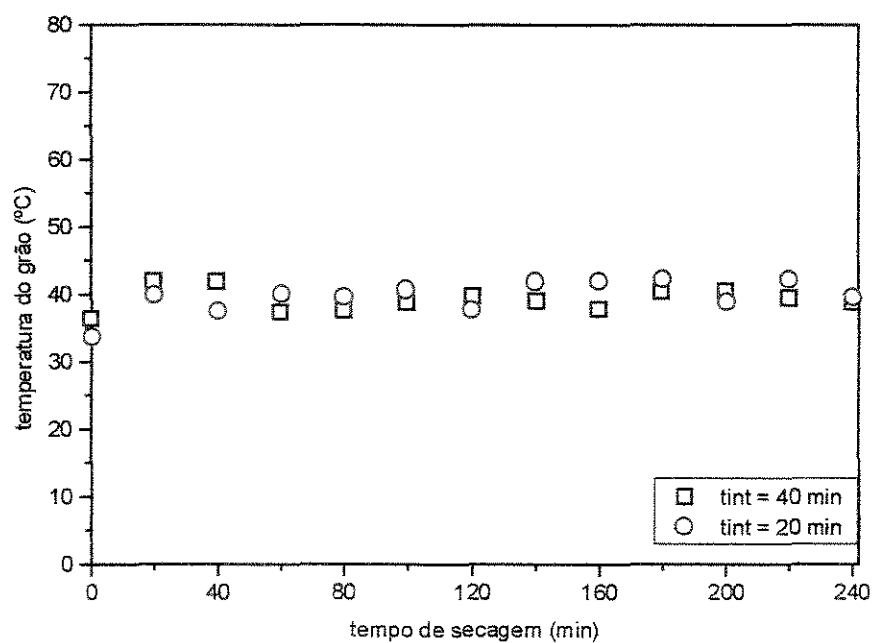


(b)

FIGURA 4.12 - Influência do tempo de intermitência. Condições: $T_{ar} = 80^{\circ}\text{C}$; $X_0 = 20\%$ b.s. – Leito Jorro/fixo – (a) Umidade do grão em função do tempo (b) Temperatura do grão em função do tempo

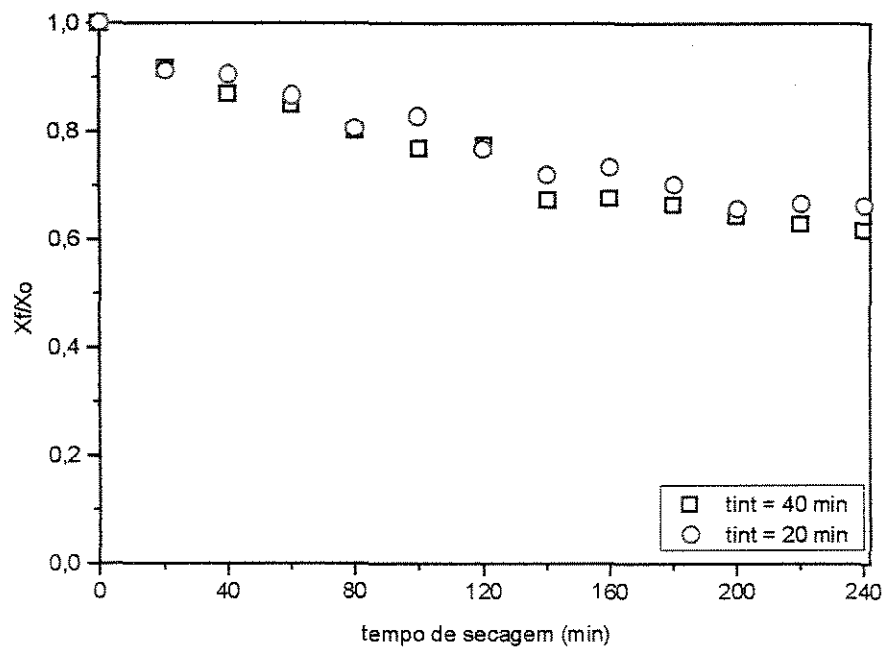


(a)

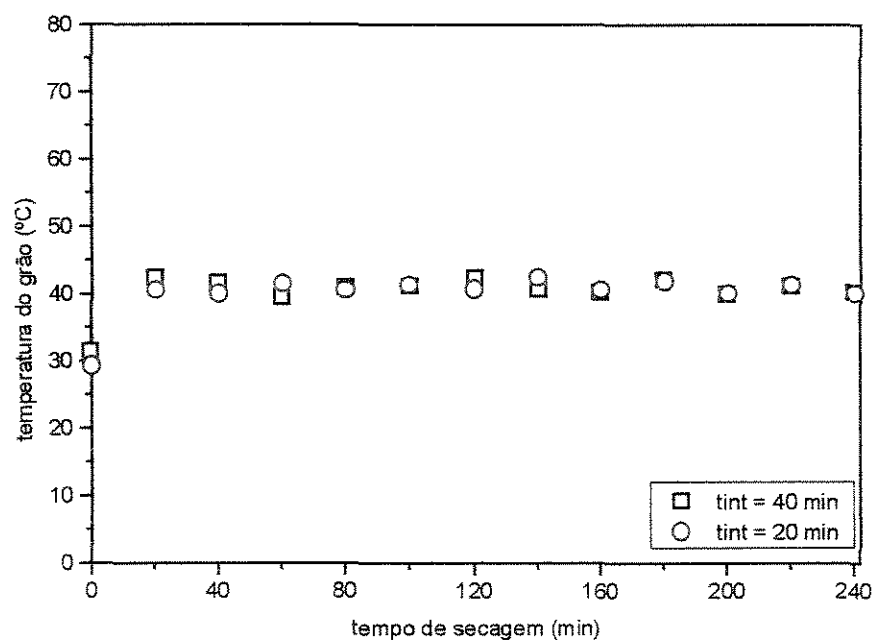


(b)

FIGURA 4.13 - Influência do tempo de intermitência. Condições: $T_{ar} = 60^{\circ}\text{C}$; $X_0 = 30\%$ b.s – Leito Jorro/fixo – (a) Umidade do grão em função do tempo (b) Temperatura do grão em função do tempo



(a)



(b)

FIGURA 4.14 - Influência do tempo de intermitência. Condições: Tar = 60 °C ; X_o = 20 % b.s – Leito Jorro/fixo – (a) Umidade do grão em função do tempo (b) Temperatura do grão em função do tempo

4.4. Resultados e análises do experimento II – leito de jorro/descanso

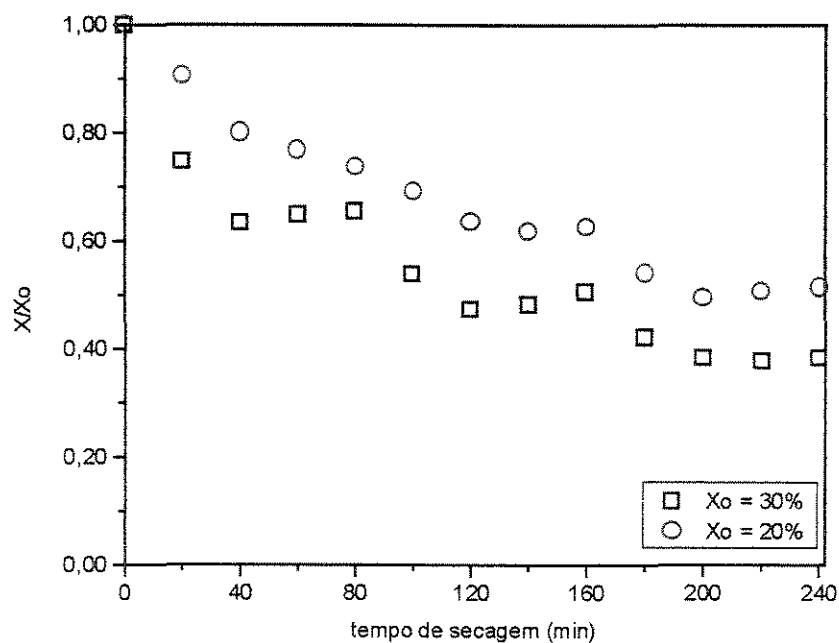
O experimento II, foi realizado em condições operacionais intermitentes de secagem, interrompendo-se totalmente a vazão de ar de entrada, proporcionando a configuração de leito de jorro e de leito em descanso, ou seja, sem ar quente sendo admitido no leito secador, caracterizando intermitência no regime fluidodinâmico e na fonte de aquecimento.

4.4.1. Efeito da umidade inicial do grão

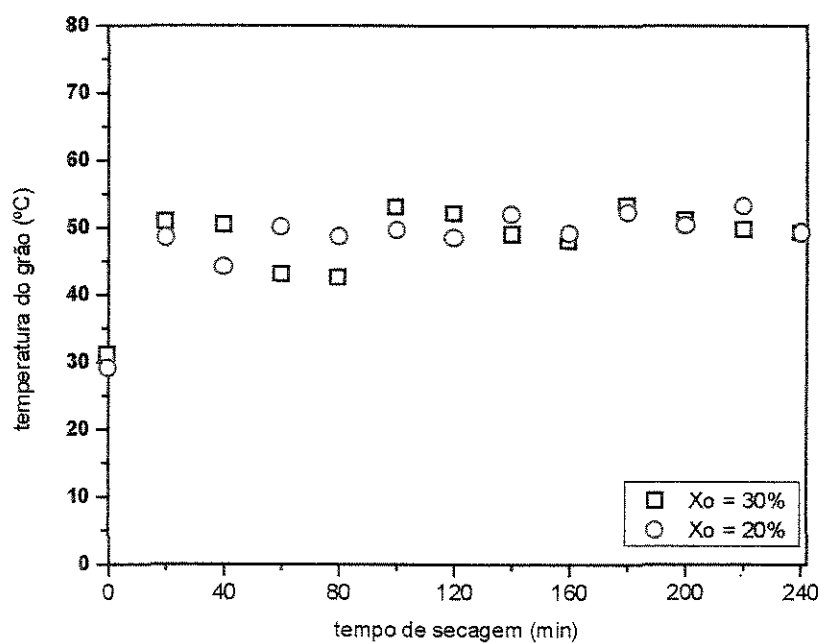
As Figuras 4.15a a 4.18a, mostram a influência da umidade inicial na curva de secagem e as Figuras 4.15b a 4.18b, a mesma influência na temperatura do grão para o regime fluidodinâmico de leito de jorro/descanso. Verificou-se que para diferentes umidades iniciais a secagem se processa mais rapidamente quanto maior for o teor de umidade inicial do grão. Isto se deve ao fato de haver um maior gradiente de concentração para que ocorra a transferência de massa de água. Pode-se verificar na figura 4.15a, que os pontos de amostragens com 60 e 80 minutos de secagem, caracterizaram o comportamento do leito de grãos após a interrupção do fornecimento de ar quente, ocorrendo a reumidificação dos mesmos neste período. Este fato pode ser visualizado experimentalmente, já que no período de intermitência no fornecimento de ar o leito se apresentou “suado” (paredes de acrílico transparentes contendo gotículas de água no estado líquido, condensação).

A reumidificação ocorrida nos intervalos de intermitência, se repetiu para os dois teores de umidades iniciais utilizados, 20% e 30% b.s., conforme mostram as Figuras 4.15a a 4.18a, minimizando para as condições do ensaio mostrado na Figura 4.16a ($T_{ar} = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $t_i = 20\text{ min}$).

Em relação ao aquecimento do grão, para diferentes teores de umidade iniciais, nos primeiros 20 minutos de secagem, ocorreu uma variação brusca na temperatura do grão, minimizando em seguida, permanecendo o valor da temperatura do grão em torno dos valores médios de 48°C para os ensaios realizados a 80°C e 38°C para os ensaios realizados a 60°C (Figuras 4.15b a 4.18b).

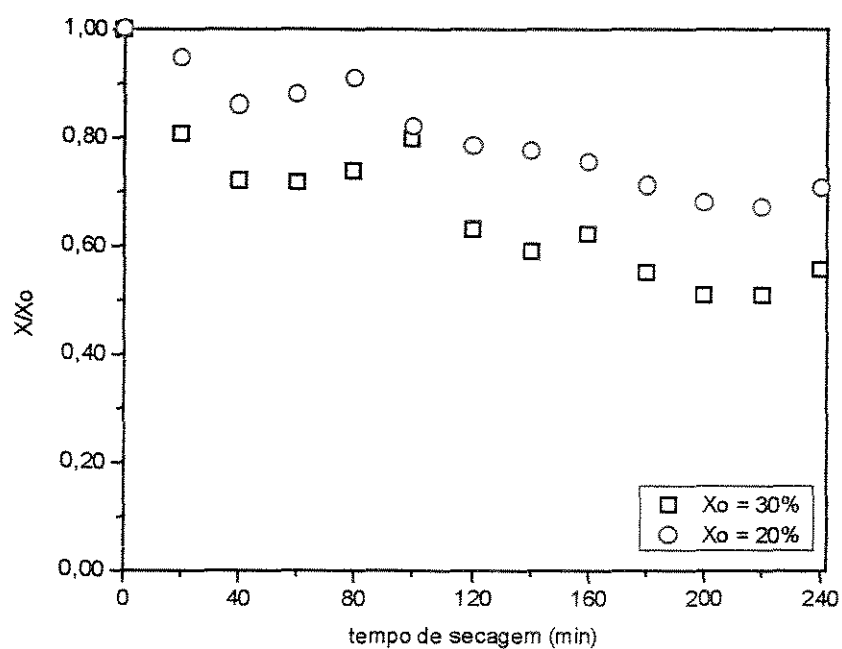


(a)

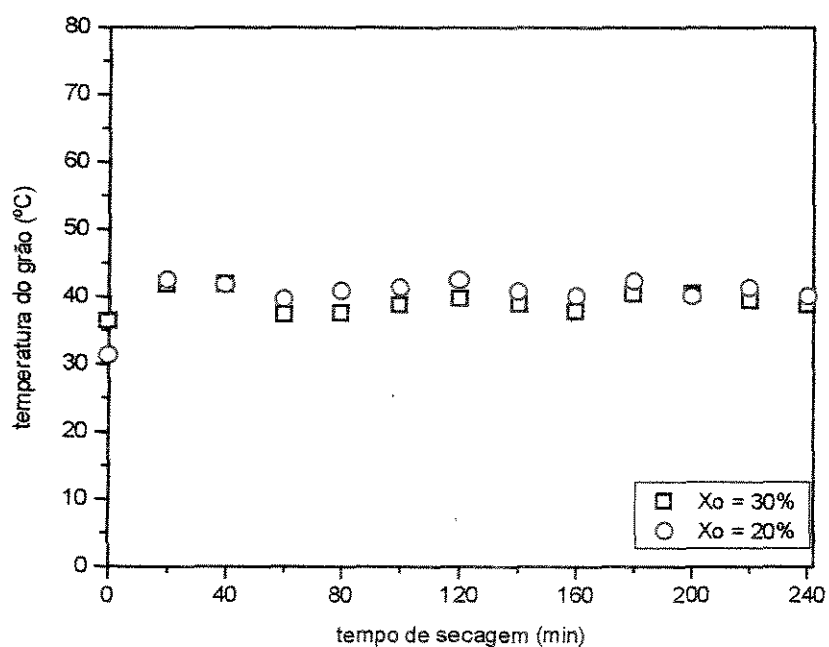


(b)

FIGURA 4.15 - Influência da umidade inicial: Condições: $T_a = 80^{\circ}\text{C}$, $t_i = 40$ min – Leito Jorro/descanso – (a) Umidade do grão em função do tempo (b) Temperatura do grão em função do tempo

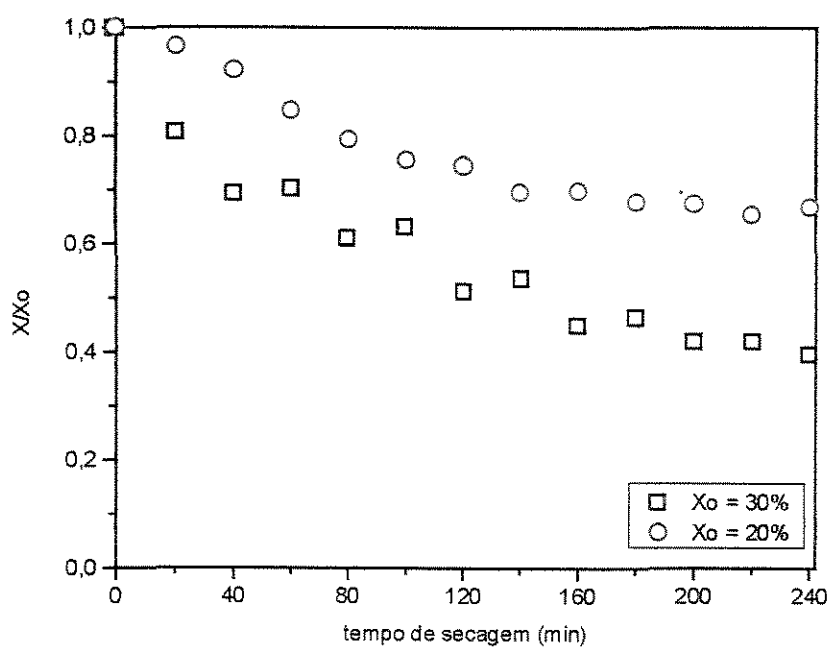


(a)

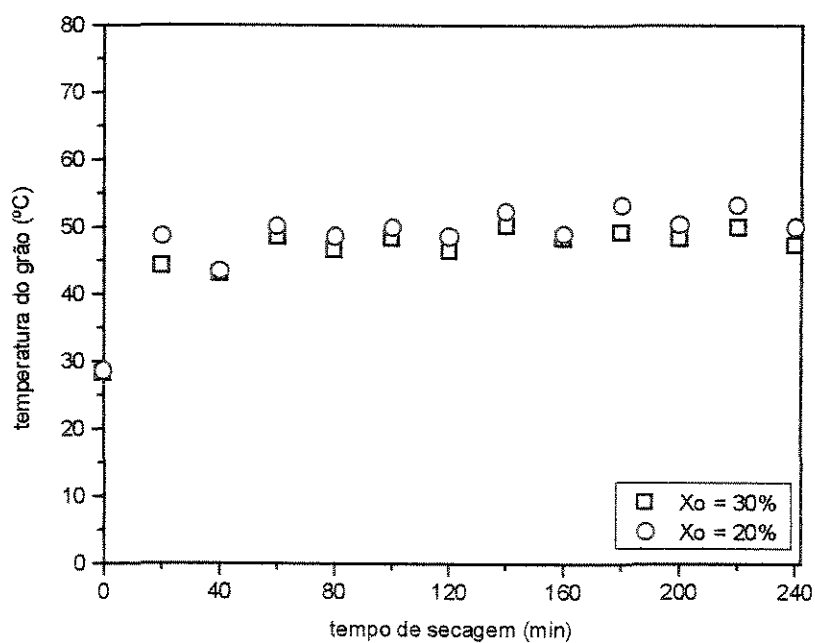


(b)

FIGURA 4.16 - Influência da Umidade inicial. Condições: $T_a = 60^{\circ}\text{C}$, $t_i = 40\text{ min}$ – Leito Jorro/descanso – (a) Umidade do grão em função do tempo (b) Temperatura do grão em função do tempo

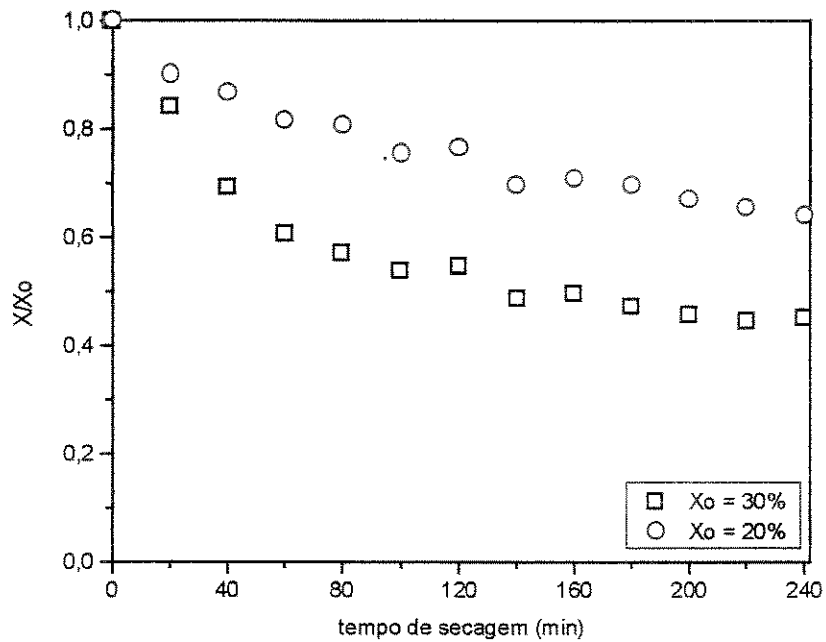


(a)

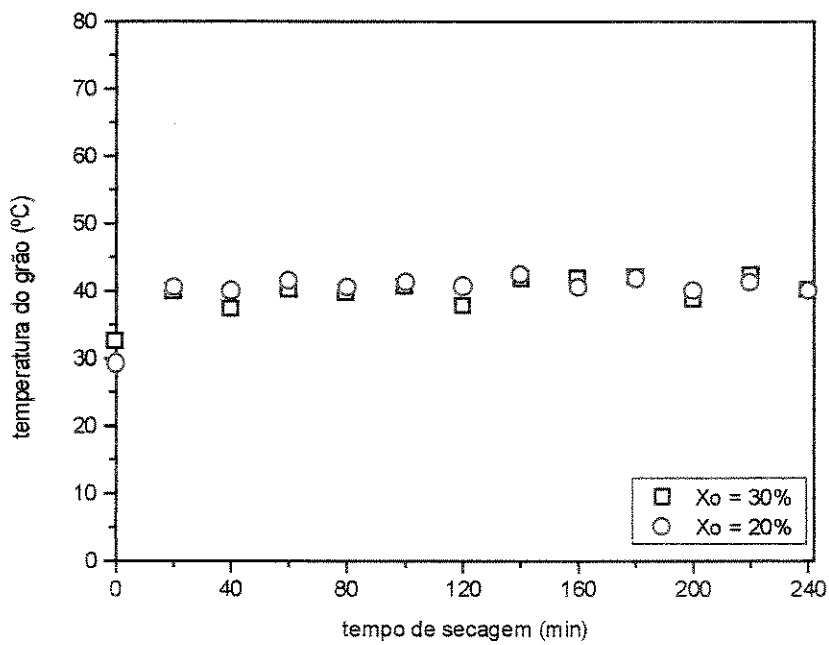


(b)

FIGURA 4.17 - Influência da umidade inicial. Condições: $T_{ar} = 80^{\circ}\text{C}$, $t_i = 20$ min – Leito Jorro/descanso – (a) Umidade do grão em função do tempo (b) Temperatura do grão em função do tempo



(a)



(b)

FIGURA 4.18 - Influência da Umidade inicial. Condições: $T_a = 60^{\circ}\text{C}$, $t_i = 20$ min – Leito Jorro/descanso – (a) Umidade do grão em função do tempo (b) Temperatura do grão em função do tempo

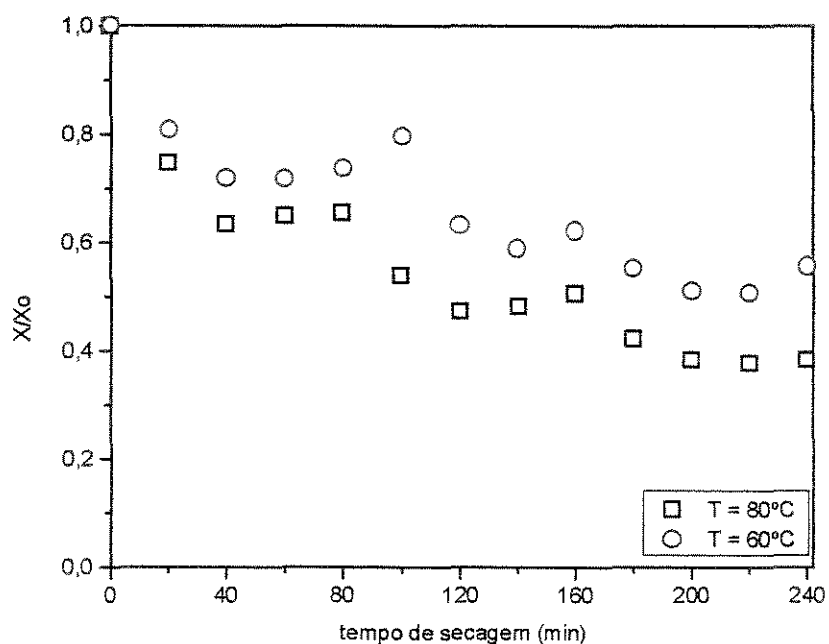
4.4.2. Efeito da temperatura do ar de admissão no leito

Nas figuras 4.19a a 4.22a estão representadas graficamente as curvas de secagem dos grãos de feijão conduzidas de acordo com as condições experimentais da Tabela 4.2.

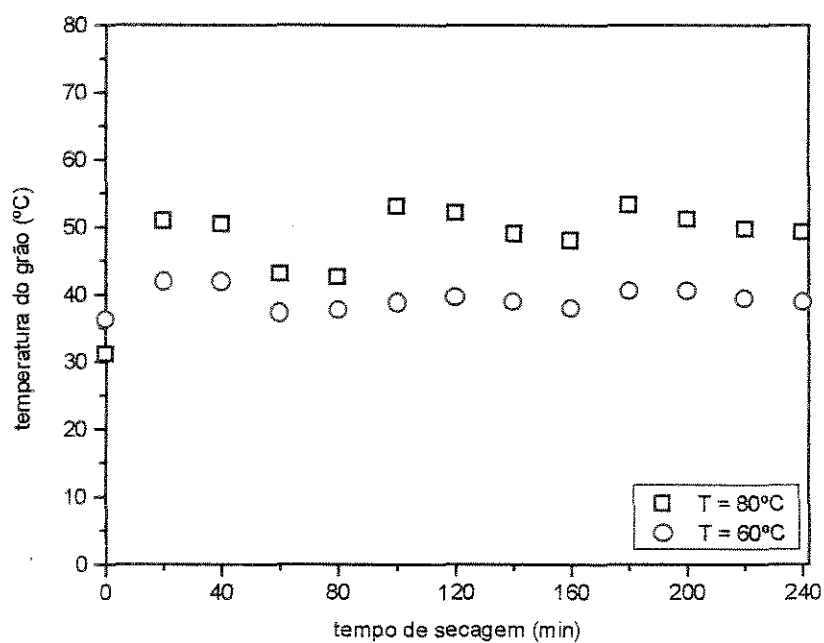
A temperatura do ar de entrada do leito secador apresentou-se com pronunciada influência na umidade final do grão. Como já se esperava, para o valor de temperatura do ar de entrada maior, 80°C, a secagem se processou mais rápida, obtendo-se taxas de secagem maiores.

Nos intervalos de descanso, notou-se experimentalmente, pontos de reumidificação dos grãos mais pronunciados que para o experimento I. Este fenômeno ocorreu devido a condensação de vapores de água, provenientes da evaporação de uma maior quantidade da água “livre” dos grãos quentes do leito, ocasionando pontos de reumidificação acentuados, mais notórios para tempos de descanso maiores, conforme mostram as Figuras 4.19a ($X_o = 30\%$ e $t_i = 40$ min) e 4.20a ($X_o = 20\%$ e $t_i = 40$ min). Nestas figuras também pode-se observar que obteve-se menores valores para umidades finais para maiores valores de temperaturas do ar. Já nas figuras 4.21a e 4.22a, este efeito não se apresenta pronunciado, atingindo valores de umidades finais, aproximadamente, iguais, após 200 minutos de secagem.

Nas Figuras 4.19b a 4.22b foram representadas a influência da temperatura do ar de entrada no aquecimento do grão. Como é esperado, pode-se verificar um maior aquecimento no grão para operações realizadas a temperaturas do ar de entrada superiores. Nos intervalos de descanso, notou-se um decréscimo na temperatura do grão, resultando ao longo do processo de secagem, menor tempo de exposição ao calor, atingindo temperaturas dos grãos menores que no experimento I, em torno de 48°C e 38°C, para temperaturas do ar iguais a 80°C e 60°C, respectivamente.

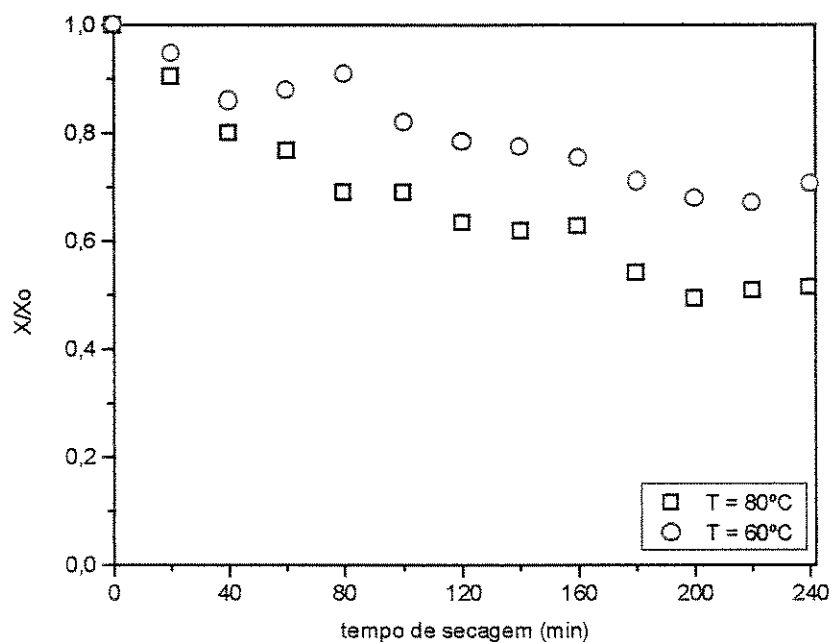


(a)

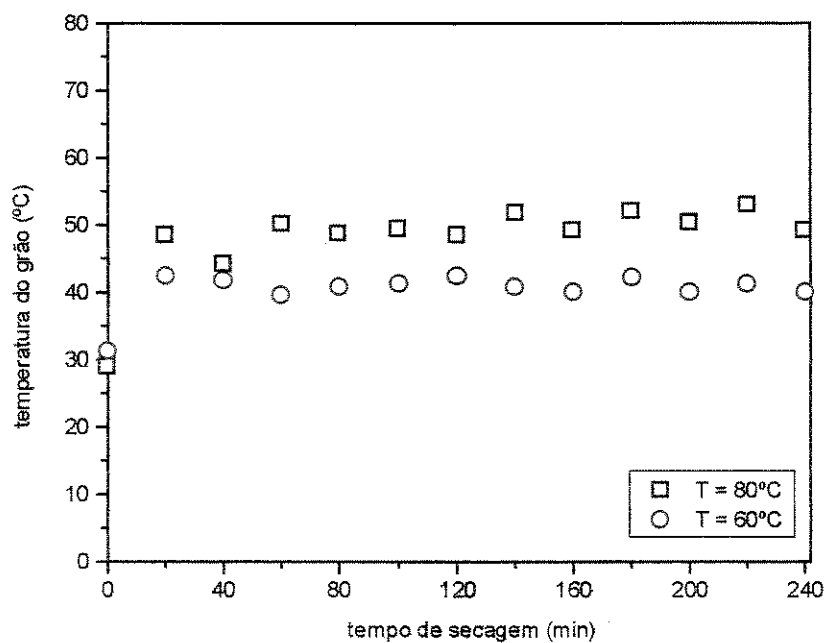


(b)

FIGURA 4.19 - Influência da temperatura do ar de entrada. Condições: $t_i = 40$ min ; $X_o = 30\%$
b.s. – Leito Jorro/descanso – (a) Umidade do grão em função do tempo (b)
Temperatura do grão em função do tempo

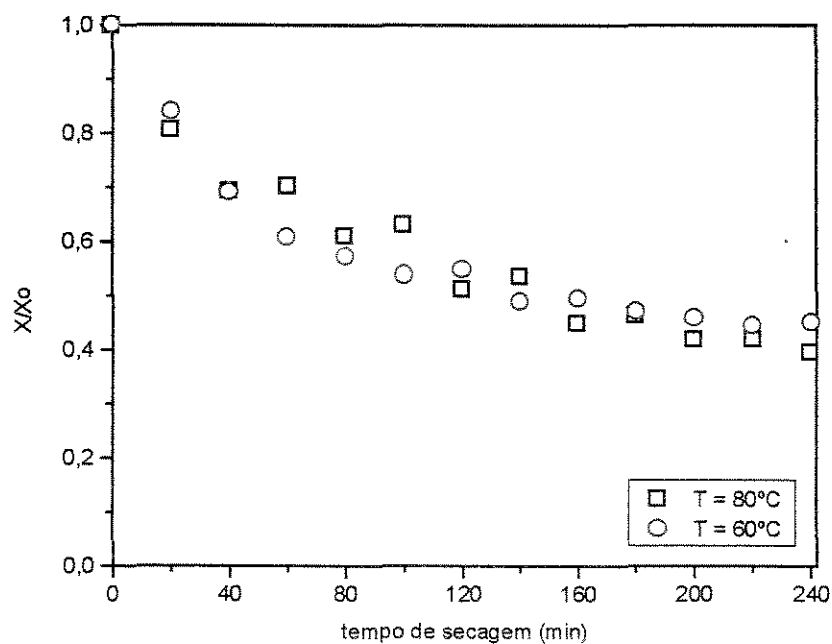


(a)

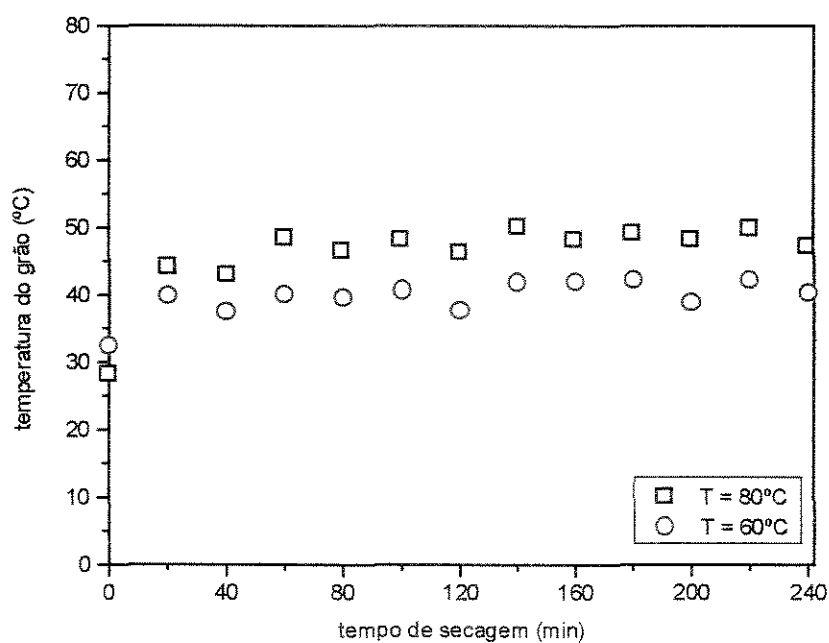


(b)

FIGURA 4.20 - Influência da temperatura do ar de entrada. Condições: $t_i = 40$ min ; $X_o = 20$ %
b.s. – Leito Jorro/descanso – (a) Umidade do grão em função do tempo (b) Temperatura do grão em função do tempo

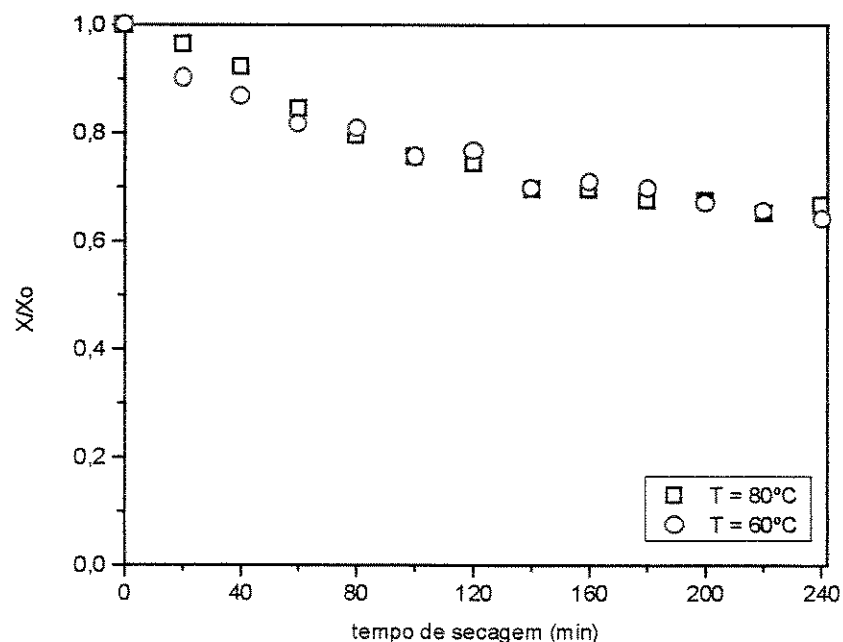


(a)

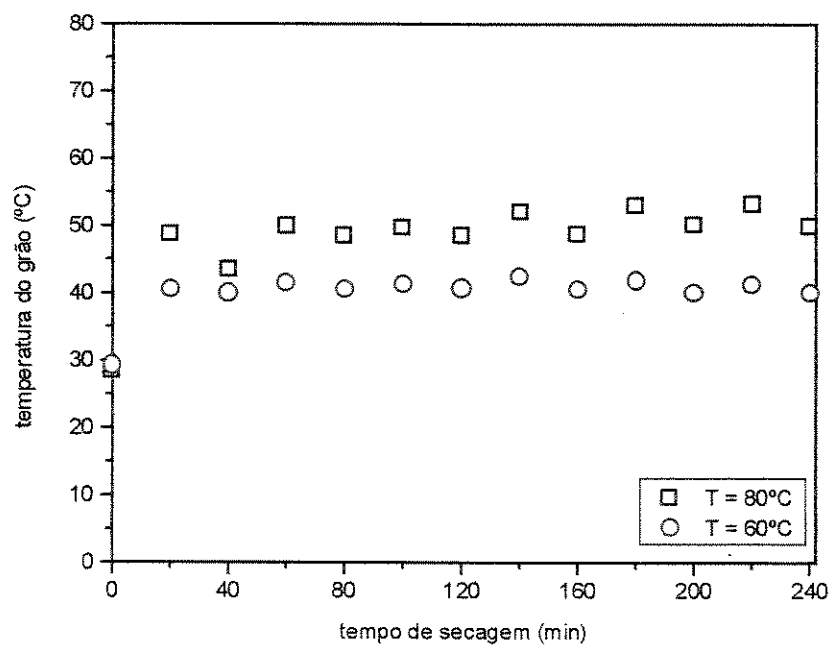


(b)

FIGURA 4.21 - Influência da temperatura do ar de entrada. Condições: $t_i = 20$ min ; $X_o = 30\%$ b.s. – Leito Jorro/descanso – (a) Umidade do grão em função do tempo (b) Temperatura do grão em função do tempo



(a)



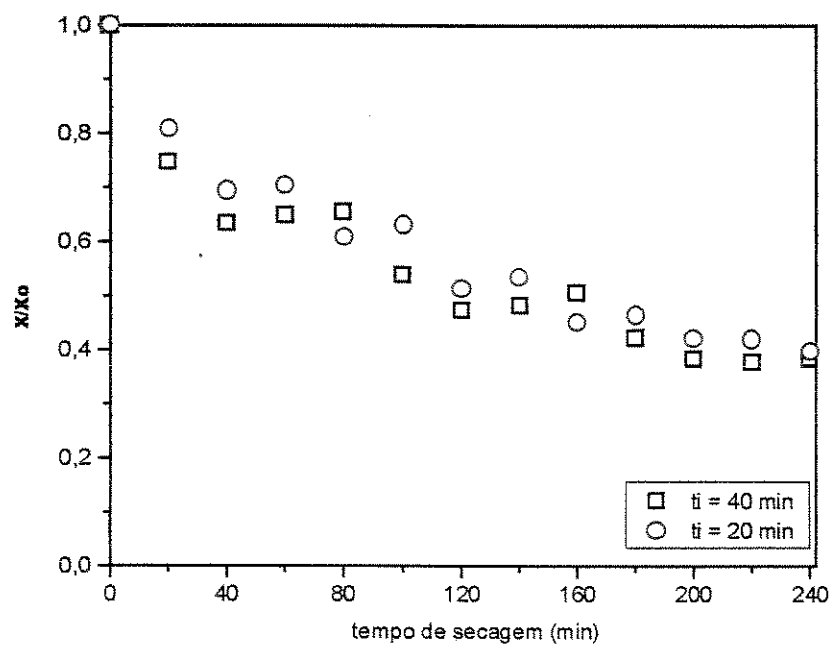
(b)

FIGURA 4.22 - Influência da temperatura do ar de entrada. Condições: $t_i = 20$ min ; $X_o = 20\%$ b.s. – Leito Jorro/descanso – (a) Umidade do grão em função do tempo
(b) Temperatura do grão em função do tempo

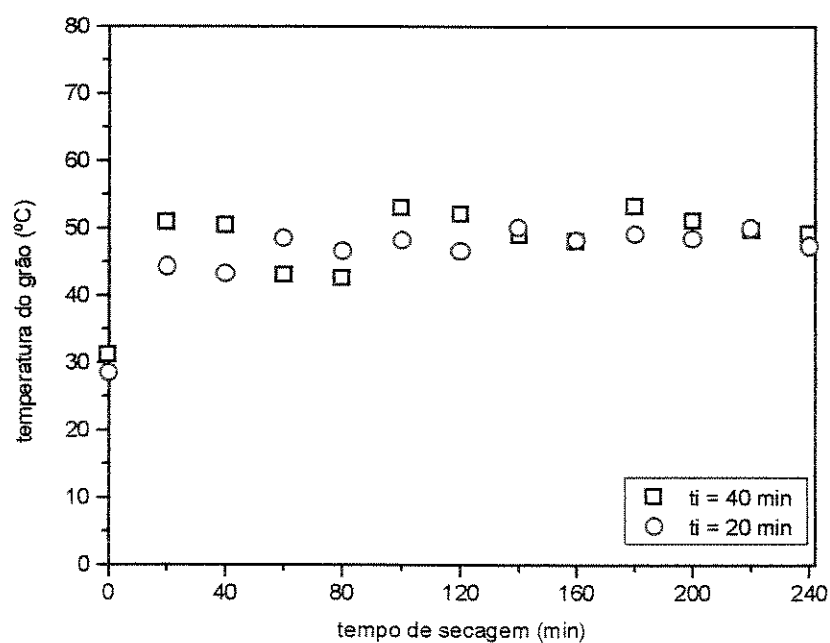
4.4.3. Efeito do tempo de intermitência do regime fluidodinâmico e do aquecimento do ar

A influência do tempo de intermitência (“descanso”) do regime fluidodinâmico e do aquecimento do ar, pode ser analisado através das curvas de secagem, apresentados nas figuras 4.23a a 4.26a, e das curvas de aquecimento dos grãos de feijão “carioca”, nas figuras 4.23b a 4.26b.

Verificou-se nos ensaios citados nas figuras acima, que o tempo de descanso da fonte de aquecimento e do regime fluidodinâmico não apresentou modificações expressivas nas curvas de secagem e nem nas curvas de aquecimento do grão durante o processo de secagem.



(a)



(b)

FIGURA 4.23 - Influência do tempo de intermitência. Condições: $T_a = 80^{\circ}\text{C}$; $X_o = 30\%$ b.s – Leito Jorro/descanso – (a) Umidade do grão em função do tempo (b) Temperatura do grão em função do tempo

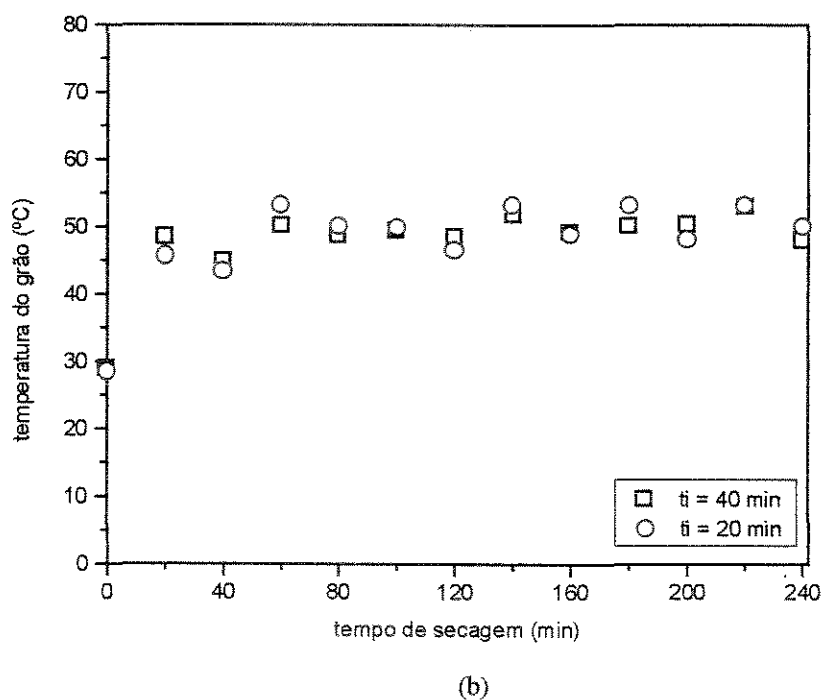
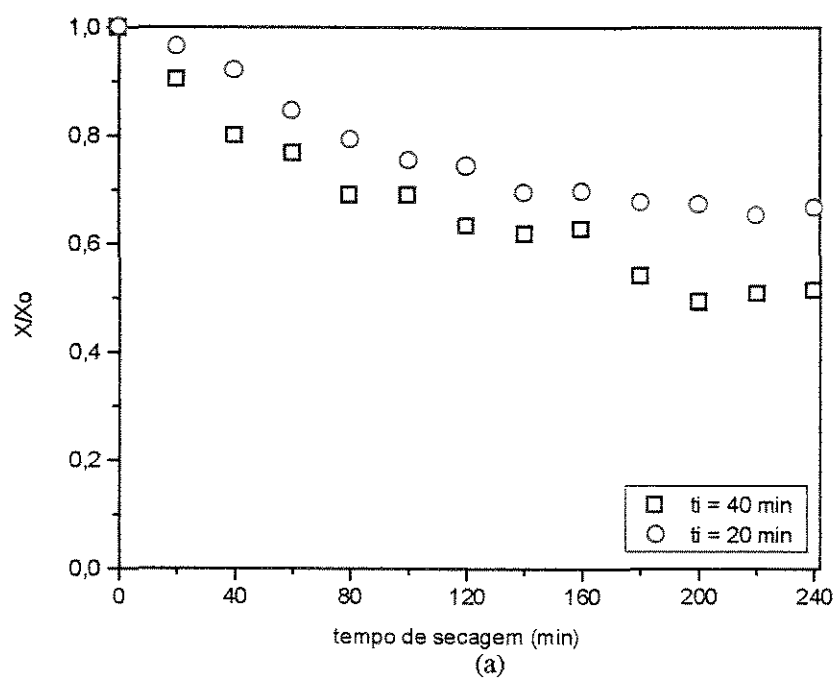
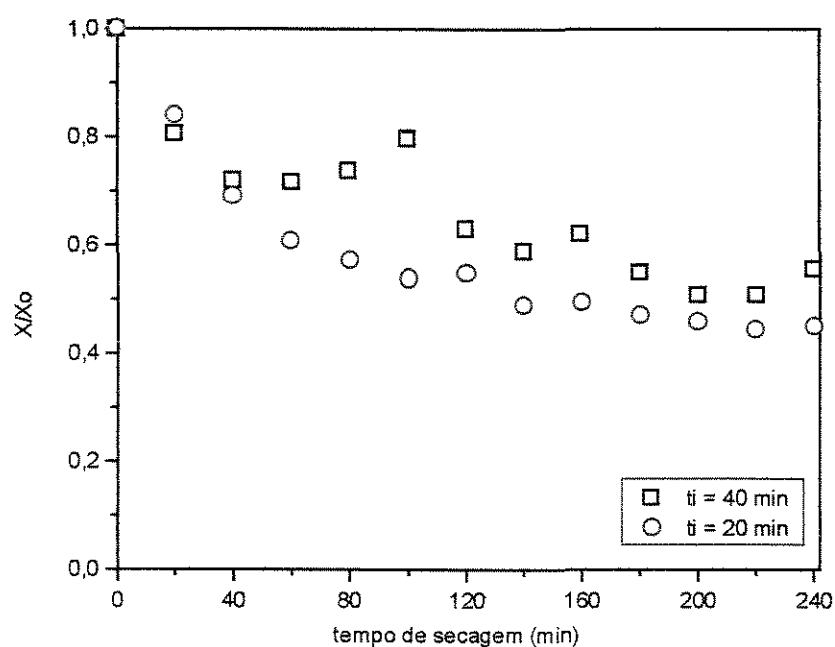
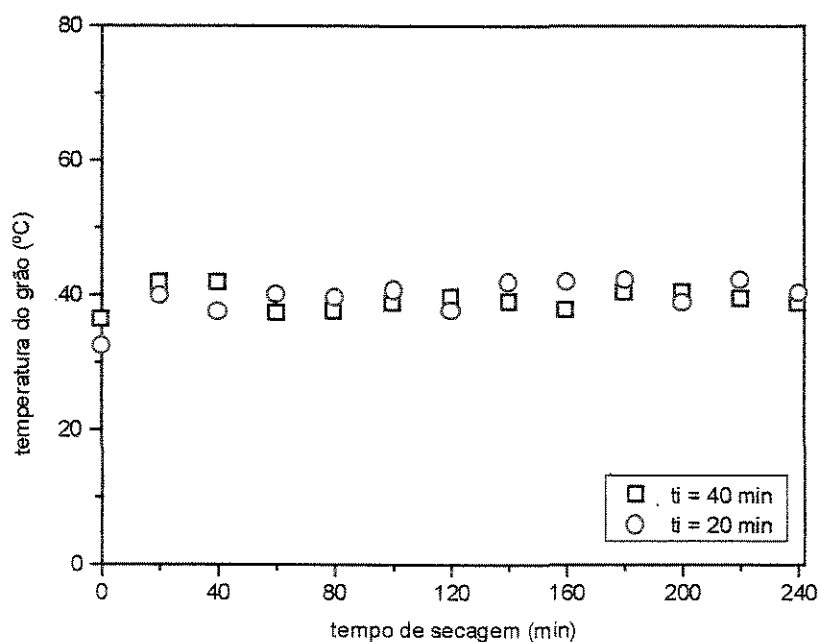


FIGURA 4.24 - Influência do tempo de intermitência. Condições: $T_{ar} = 80^{\circ}\text{C}$; $X_o = 20\%$ b.s –
Leito Jorro/descanso – (a) Umidade do grão em função do tempo (b)
Temperatura do grão em função do tempo



(a)



(b)

FIGURA 4.25 - Influência do tempo de intermitência. Condições: $T_a = 60^{\circ}\text{C}$; $X_0 = 30\%$ b.s – Leito Jorro/descanso – (a) Umidade do grão em função do tempo (b) Temperatura do grão em função do tempo

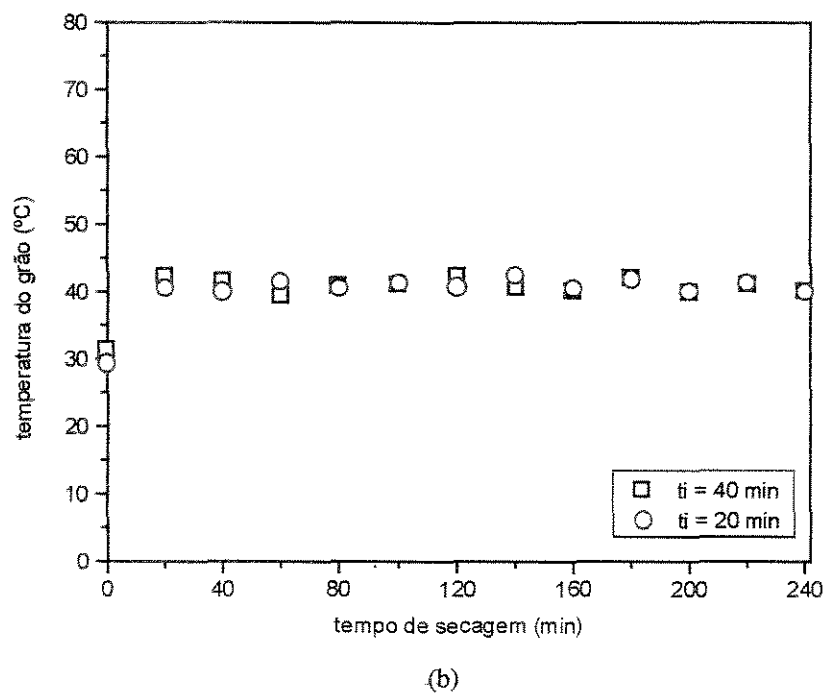
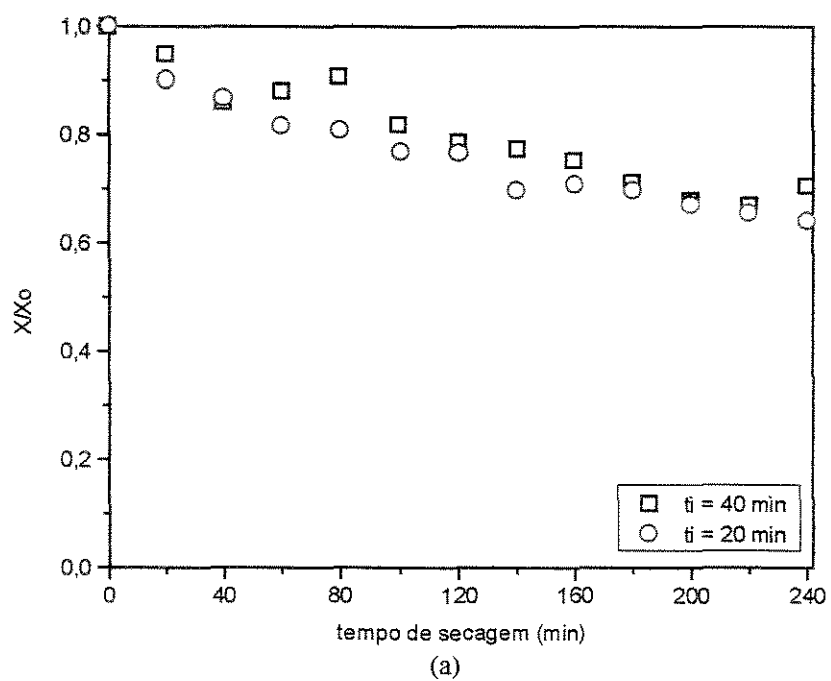


FIGURA 4.26 - Influência do tempo de intermitência. Condições: $T_{ar} = 60^{\circ}\text{C}$; $X_o = 20\%$
b.s – Leito Jorro/descanso – (a) Umidade do grão em função do tempo (b)
Temperatura do grão em função do tempo

A análise dos gráficos apresentados, possibilita afirmar que a secagem se processa mais rapidamente, quanto maior for o conteúdo de umidade inicial do grão e quanto maior for a temperatura do ar de admissão no leito secador. Entretanto, a variável temperatura do ar, proporciona um maior aquecimento no tegumento do grão de feijão, o que inviabiliza a manutenção de suas propriedades físico-químicas e organolépticas, se aplicado para longos tempos de secagem.

No experimento I, a secagem foi processada alternando a vazão mássica de gás em dois níveis, 2,44 kg/min e 0,5 kg/min, possibilitando a manutenção dos regimes de leito de jorro e leito fixo, respectivamente. Verificou-se neste experimento que a umidade final do grãos de feijão “carioca”, atingiu seu menor valor, 9,02% em base seca, para a condição experimental $T_{ar} = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$, $X_o = 20\%$ b.s., $t_i = 20\text{ min}$, conforme mostrou a Tabela 4.1.

No experimento II, a umidade final do grão atingiu seu menor valor, 11,58% b.s. (Tabela 4.2), contudo a temperatura do grão, em média, se manteve dentro da faixa aceitável, até 39°C . Como já se esperava, para o valor de temperatura do ar de entrada maior, 80°C , a secagem se processou mais rápida, obtendo-se taxas de secagem maiores.

4.5. Análise estatística da secagem

As influências das variáveis do processo de secagem (temperatura do ar de entrada no leito, umidade inicial dos grãos e tempo de intermitência na fonte de aquecimento) nos dois tipos de experimentos, I e II, foram analisadas utilizando a técnica de planejamento fatorial.

4.5.1. Análise da razão de umidade RU (X_f/X_o)

Esta análise teve como variável resposta a razão de umidade (X_f/X_o) em função das modificações nos valores das variáveis (nível superior e inferior), para o mesmo tempo de secagem de 240 minutos. Nas Tabelas 4.3 e 4.4 são apresentados os resultados dos efeitos das variáveis e suas interações na resposta final. Os efeitos significativos calculados a partir do teste de “*Student*” com intervalo de confiança de 95% foram confrontados com a análise dos gráficos obtidos, Figuras 4.3 a 4.26.

4.5.1.1. Efeitos das variáveis e suas interações: leito de jorro/fixo - variável resposta X_f/X_o

Os valores médios da razão de umidade obtidos em todos os ensaios de secagem foram 0,46 para leito jorro/fixo e 0,54 para leito jorro/descanso. Estes valores indicam que em média o leito de jorro/descanso proporcionou uma redução de 46% da umidade inicial do grão e o leito jorro/fixo apresentou uma maior redução da umidade com o valor médio de 54% (em base seca).

TABELA 4.3: Efeitos das variáveis e suas interações: Leito de Jorro/fixo

	$X_p/X_o = 0,46$		
Fatores	Efeito	Desvio Padrão	P (valor)
(1) X_o	-1,7500	0,750000	0,257762
(2) T_{ar}	-2,2500	0,750000	0,204833
(3) t_i	-1,7500	0,750000	0,257762
1 / 2	-,7500	0,750000	0,500000
1 / 3	,7500	0,750000	0,500000
2 / 3	,2500	0,750000	0,795167

A Tabela 4.3 apresenta os efeitos 1 (umidade inicial) e 3 (tempo de intermitência), com valores iguais a -1,75, o que possibilita afirmar que estes fatores não se mostraram significantes na razão de umidade. Da mesma forma o fator 2, também não apresentou nível de significância superior a 95%, contudo se mostrou mais sensível quanto à interferência na variável resposta, concordando com o menor valor de P(valor). P(valor) indica a probabilidade do efeito pertencer ao intervalo de confiança de 95%, e quanto menor o valor de P maior é a probabilidade do efeito ser significativo estatisticamente. O cálculo do desvio padrão foi feito igualando os valores da interação dos três efeitos simultâneos. Desta forma, os valores de desvio padrão foram apresentados na Tabela 4.3 assumindo valores iguais.

O gráfico de Pareto, apresentado na Figura 4.27, reafirma que os valores dos efeitos e suas interações na variável resposta razão de umidade foram inferiores ao intervalo de confiabilidade de 95%, conforme o teste de “Student”, portanto, não demonstrando influências estatisticamente significativas na resposta, para a faixa experimental avaliada neste trabalho.

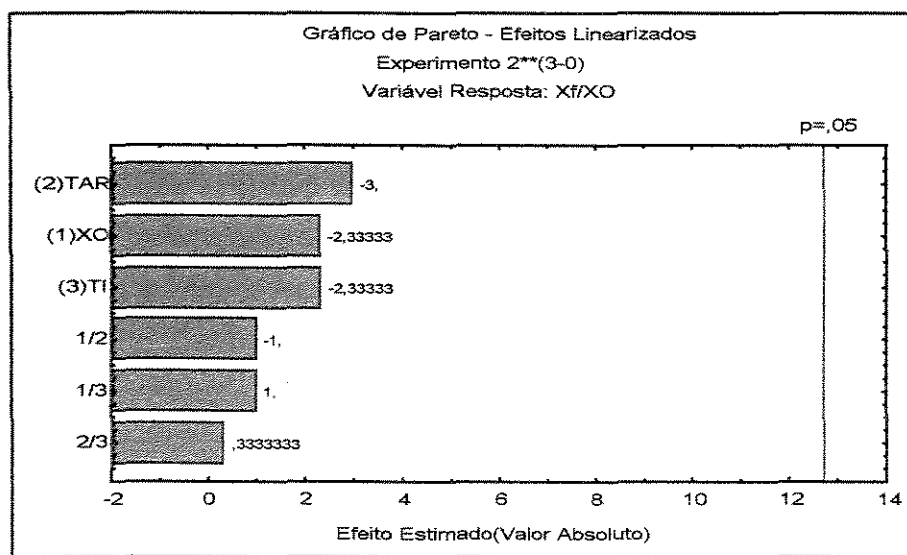


FIGURA 4.27 – Diagrama de Pareto – resposta X_f/X_o - Experimento I

Combinando a análise fatorial com a análise dos gráficos apresentados até aqui, pode-se verificar que os efeitos/variáveis apresentam a mesma tendência das curvas de secagem, ou seja, a temperatura do ar de entrada atingiu menor valor de P(valor) e se mostrou mais influente no processo de secagem de feijão. Para temperaturas mais elevadas obteve-se menores valores para a razão de umidade (X_f/X_o), conforme Figuras 4.1a no regime jorro/fixo e 4.19a no regime jorro/descanso.

4.5.1.2. Efeitos das variáveis e suas interações: leito de jorro/descanso - variável resposta X_f/X_o

A Tabela 4.4, apresenta os efeitos dos fatores, temperatura do ar, tempo de intermitência e umidade inicial do grão de feijão “carioca” e suas interações na razão de umidade para o regime de leito de jorro/descanso.

Os resultados estatísticos dos efeitos, embora também não tenham se mostrado significativos para o teste de “Student”, reafirmam os resultados gráficos obtidos nas Figuras

4.15 a 4.26, onde as variáveis umidade inicial do grão e temperatura do ar de admissão no leito apresentaram os menores valores para a razão de umidade final. Este comportamento pode ser visto com clareza no gráfico de Pareto, apresentado na Figura 4.28.

TABELA 4.4: Efeitos das variáveis e suas interações: Leito de Jorro/Descanso

	$X_f/X_o = 0,54$		
Fatores	Efeito	Desvio Padrão	P (valor)
(1) X_o	-,187500	,027500	,092710
(2) T_{ar}	-,097500	,027500	,175013
(3) t_i	-,002500	,027500	,942284
1 / 2	-,017500	,027500	,639209
1 / 3	,047500	,027500	,334095
2 / 3	-,082500	,027500	,204833

Ainda na Figura 4.28, pode-se notar que o efeito do tempo de intermitência da fonte e do aquecimento do ar de entrada, para os valores limites utilizados (20 e 40 minutos), foi inferior à interação de dois fatores, como também verificou-se na Tabela 4.4, com o menor valor de efeito calculado, -0,0025. Isto reafirma a análise gráfica feita anteriormente, de que para os valores de tempo de intermitência utilizados, esta variável não se mostrou influente na variável resposta razão de umidade final.

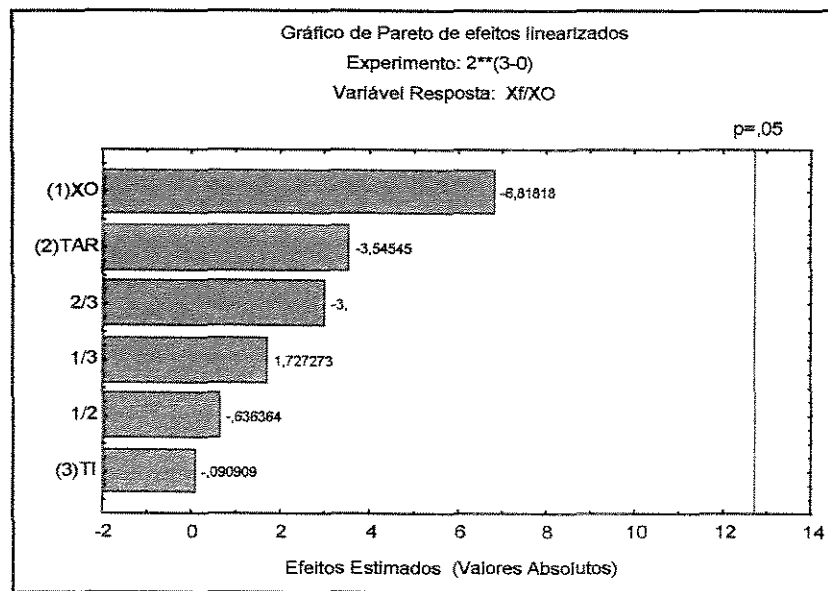


FIGURA 4.28 - Diagrama de Pareto – resposta X_f/X_0 – Experimento II

4.5.2. Análise da eficiência de secagem (ES) e dos coeficientes de secagem (CS, LM)

As influências das variáveis do processo de secagem (T_{ar} , X_0 e t_i) nas respostas que quantificam a eficiência energética da secagem, para os dois experimentos de secagem, I e II, também foram analisados pela técnica de planejamento fatorial.

As variáveis respostas foram: eficiência de secagem, ES (energia para aquecer o grão e evaporar a água por energia total fornecida), e os coeficientes de secagem CS (quantidade de água evaporada por quantidade de energia total fornecida) e LM (energia para evaporar a água por energia mecânica) em função das modificações nos valores das variáveis do processo de secagem (nível superior e inferior), para o mesmo tempo de secagem de 240 minutos. Nas Tabelas 4.5 e 4.6 são apresentados os resultados da eficiência e dos coeficientes de secagem para ambos os experimentos (I e II). Os valores de ES, CS e LM foram calculados pelas equações 3.8, 3.9 e 3.10, respectivamente.

Os efeitos das variáveis e suas interações são apresentados nas Tabelas 4.7 e 4.10. Os efeitos significativos foram calculados a partir do teste de “Student” com intervalo de confiança de 95% e comparados com a qualidade da modelagem empírica, fornecida pelo planejamento fatorial.

TABELA 4.6: Condições experimentais e eficiência energética da secagem - regime jorro/fixo

Análise Energética da Secagem							
Experimentos 2 ⁽³⁻⁰⁾ – Experimentos I							
Ensaíos	W _{gorro} (Kg/min)	Q _{gorro} (m ³ /min)	W _{fixo} (Kg/min)	Q _{fixo} (m ³ /min)	ES (%)	CS (kg/kJ)10 ⁵	LM (%)
1	2,44	2,34	0,5	0,48	14,81	1,33	3,59
2	2,44	2,34	0,5	0,48	11,83	1,32	3,57
3	2,44	2,34	0,5	0,48	5,19	1,51	3,94
4	2,44	2,34	0,5	0,48	7,04	1,06	2,76
5	2,44	2,34	0,5	0,48	10,60	1,08	2,94
6	2,44	2,34	0,5	0,48	9,21	1,06	2,88
7	2,44	2,34	0,5	0,48	10,35	0,95	2,47
8	2,44	2,34	0,5	0,48	12,66	0,94	2,46

A análise da Tabela 4.6, permite verificar que o maior valor de eficiência de secagem foi obtido para o ensaio 1 ($T_{ar}=80^{\circ}C$, $X_0 = 30\%b.s.$ e $t_i = 40$ min). Este resultado foi possível, pois a diminuição no fornecimento do ar quente (passagem do regime de jorro para leito fixo), diminuiu a energia total fornecida ao sistema, causando um aumento efetivo no valor de eficiência. Também, a maior temperatura do ar utilizada aumenta a massa de água evaporada, aumentando o numerador da equação que define a eficiência ES (eq. 3.8).

Os coeficientes CS e LM atingiram sua condição ótima no ensaio 3 ($T_{ar}= 60^{\circ}C$, $X_0 = 30\%b.s.$ e $t_i = 40$ min). O coeficiente CS alcançou o valor de $1,51 \times 10^{-5}$ kg de água evaporada por kJ de energia total fornecida, pois a energia total fornecida (denominador) diminuiu em função da aplicação da intermitência. Já o coeficiente LM, foi favorecido com a diminuição de vazão de

jorro para leito fixo, pois resultou na diminuição da energia mecânica fornecida pelo ar de secagem ao leito de grãos e alcançou seu maior valor $LM = 3,94\%$.

TABELA 4.7-Condições experimentais e eficiência energética da secagem regime jorro/descanso

Análise Energética da Secagem							
Experimentos 2 ⁽³⁻⁰⁾ – Experimentos II							
Ensaio	W_{jorro} (Kg/min)	Q_{jorro} (m ³ /min)	W_{descanso} (Kg/min)	Q_{descanso} (m ³ /min)	ES (%)	CS (kg/kJ)10 ⁵	LM (%)
1	2,44	2,34	0	0	21,06	1,98	5,37
2	2,44	2,34	0	0	17,18	1,72	4,67
3	2,44	2,34	0	0	7,39	2,10	5,47
4	2,44	2,34	0	0	7,76	1,63	4,25
5	2,44	2,34	0	0	15,69	1,27	3,49
6	2,44	2,34	0	0	11,15	1,43	3,93
7	2,44	2,34	0	0	23,47	1,34	3,47
8	2,44	2,34	0	0	16,02	1,19	3,09

Os valores dos coeficientes energéticos foram maiores para o experimento II, quando comparados ao experimento I, conforme apresentados na Tabela 4.7. Este fato se explica, pois para os períodos de intermitência realizados no experimento II, foi feita a interrupção total de vazão de ar admitida no leito, o que resultou em uma redução mais acentuada no fornecimento de energia térmica e mecânica no secador.

Diferentemente do regime realizado no experimento I, a melhor condição de operação para a eficiência de secagem foi a do ensaio 7 ($T_{\text{ar}} = 60^{\circ}\text{C}$, $X_0 = 30\%\text{b.s.}$ e $t_i = 20$ min), o que permitiu afirmar, que houve uma interação entre as variáveis de processo resultado da combinação da diminuição da quantidade de energia total fornecida ao leito secador com a diminuição na energia necessária para aquecer os grãos e evaporar a água.

4.5.2.1. Efeitos das variáveis e suas interações: leito de jorro/fixo - variável resposta ES

Para verificar a influência dos efeitos das variáveis na eficiência de secagem, utilizou-se a mesma análise anterior. Pode-se verificar claramente, tanto na Tabela 4.8 como na Figura 4.29, que a combinação dos efeitos temperatura do ar de entrada no leito secador e o tempo de intermitência se mostraram com significâncias superiores a 95%, com p (valor) = 0,040795.

Este resultado mostra que para os valores dos fatores utilizados nos ensaios com o regime de leito de jorro/fixo (Tabela 4.6), os maiores valores de eficiência na secagem, foram obtidos para temperaturas do ar de entrada maiores e tempos de intermitência menores (efeito da temperatura do ar positivo e do tempo de intermitência negativo).

TABELA 4.8 – Efeitos das variáveis e suas interações: Leito de Jorro/fixo -Variável Resposta ES

Fatores	Efeitos	Desvio Padrão	p (valor)
(1) X_0	0,05250	0,282500	0,883025
(2) T_{ar}	2,80250	0,282500	0,063957
(3) t_i	-0,98750	0,282500	0,177384
1 / 2	2,13250	0,282500	0,083847
1 / 3	0,51250	0,282500	0,320716
2 / 3	4,40250	0,282500	0,040795

A Figura 4.29 apresenta os efeitos linearizados, indica que para uma otimização na variável eficiência de secagem deve-se trabalhar com o aumento dos valores de tempo de intermitência simultâneo ao aumento de temperatura do ar de entrada no leito secador (efeito do tempo de intermitência negativo e da temperatura do ar, positivo como interação de efeitos).

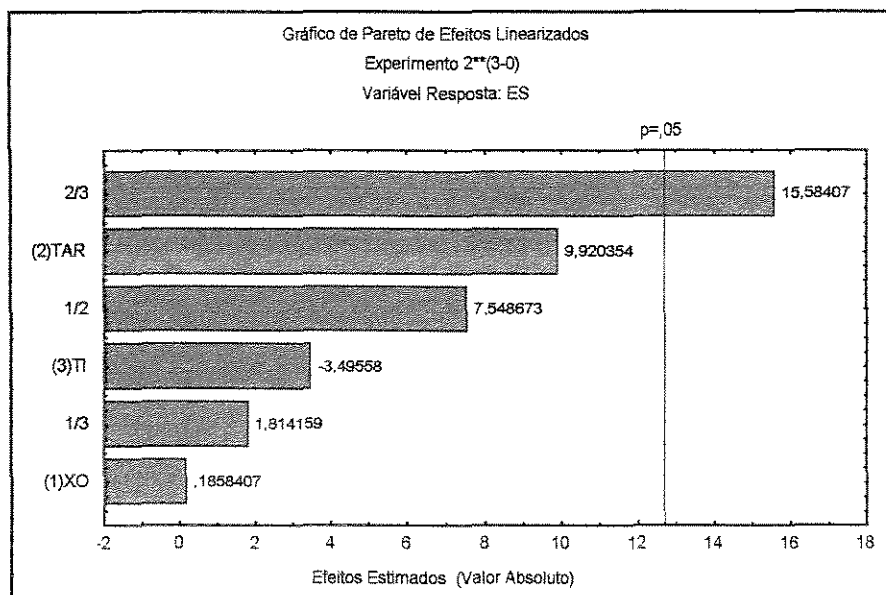


FIGURA 4.29 - Diagrama de Pareto – resposta ES – Experimento I

4.5.2.2. Efeitos das variáveis e suas interações: Leito de Jorro/fixo - variável resposta CS

Os valores dos efeitos e suas interações no coeficiente de secagem são mostrados na Tabela 4.9 e na Figura 4.30, onde se verifica o maior valor do efeito para o fator 3 (t_i). Porém, nenhum dos fatores analisados se mostraram influentes ao nível de significância superior a 95%. Todos os efeitos individuais são positivos, indicando que para valores maiores de X_0 , T_{ar} e t_i , se obtém os maiores coeficientes de secagem.

TABELA 4.9 - Efeitos das variáveis e suas interações: Leito de Jorro/fixo – Variável Resposta CS

Fatores	Efeitos	Desvio Padrão	p (valor)
(1) X_0	0,122500	0,112500	0,472926
(2) T_{ar}	0,082500	0,112500	0,597180
(3) t_i	0,297500	0,112500	0,230157
1 / 2	-0,107500	0,112500	0,514466
1 / 3	0,107500	0,112500	0,514466
2 / 3	-0,042500	0,112500	0,770051

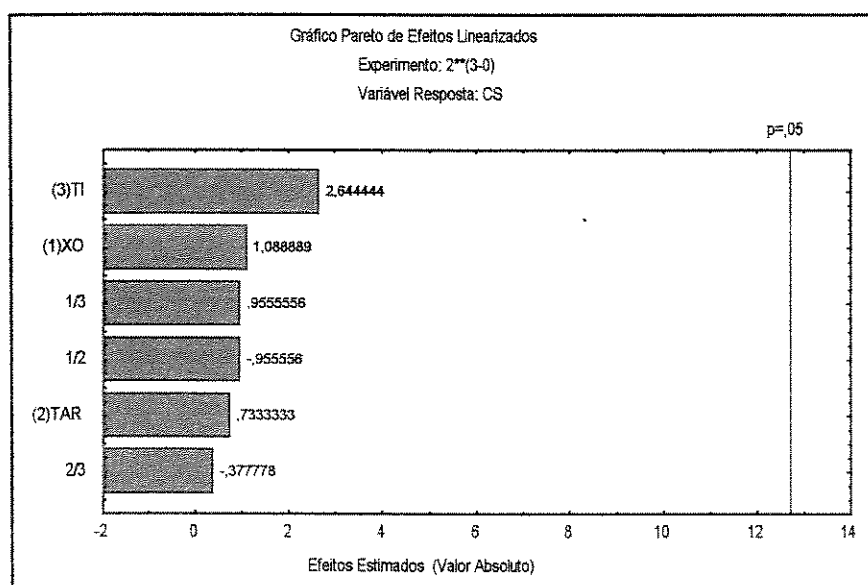


FIGURA 4.30 - Diagrama de Pareto – resposta CS – Experimento I

4.5.2.3. Efeitos das variáveis e suas interações: leito de jorro/fixo - variável resposta LM

Na Tabela 4.10 e na Figura 4.31 verificou-se as tendências dos efeitos e suas interações, e novamente o fator 3 (t_i) apresentou o maior valor do efeito em LM. Porém, nenhum dos fatores analisados apresentou influência com nível de significância superior a 95%. As tendências são as mesmas do coeficiente CS, isto é, valores maiores de X_0 , T_{ar} e t_i , favorecerão o processo de secagem, em termos do coeficiente LM.

TABELA 4.10- Efeitos das variáveis e suas interações: Leito de Jorro/fixo—variável resposta LM

Fatores	Efeitos	Desvio Padrão	p (valor)
(1) X_0	0,317500	0,302500	0,484601
(2) T_{ar}	0,337500	0,302500	0,465219
(3) t_i	0,777500	0,302500	0,236215
1 / 2	-0,277500	0,302500	0,527424
1 / 3	0,282500	0,302500	0,521756
2 / 3	-0,107500	0,302500	0,782625

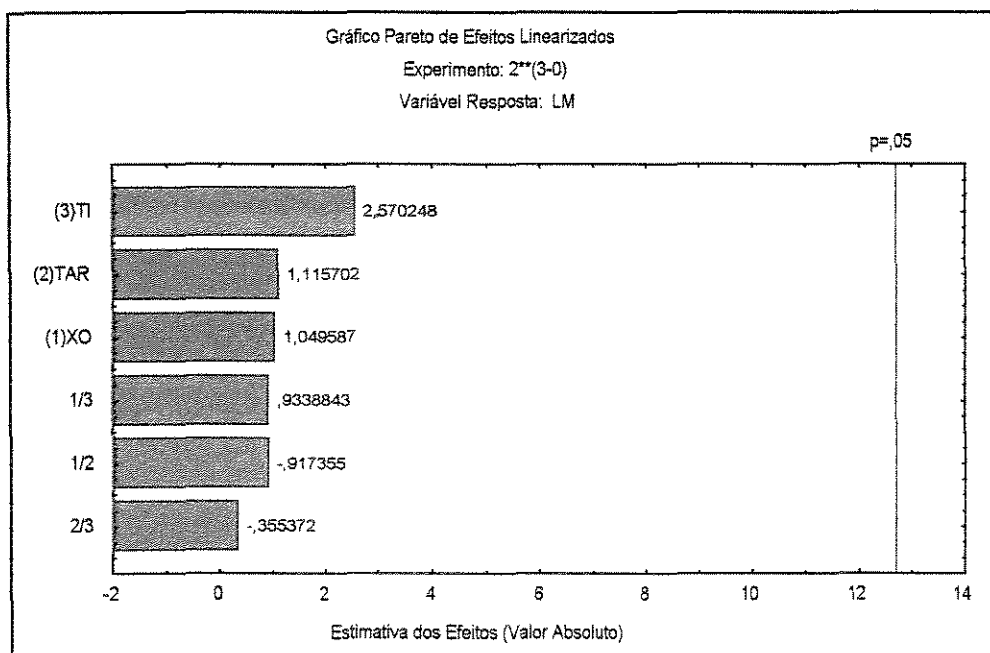


FIGURA 4.31 - Diagrama de Pareto – resposta LM – Experimento I

4.5.2.4. Efeitos das variáveis e suas interações: leito de jorro/descanso - variável resposta ES

Na Tabela 4.11 e na Figura 4.32 são apresentadas as tendências dos efeitos e suas interações, sendo que para essa situação de intermitência, o maior valor do efeito foi obtido para a combinação dos fatores 1 (t_i) e 2 (T_{ar}). Porém, nenhum dos fatores principais e suas interações analisados se mostraram estatisticamente significativos.

TABELA 4.10 -Efeitos das variáveis e suas interações: Leito de Jorro/fixo – Variável Resposta ES

Fatores	Efeito	Desvio Padrão	p (valor)
(1) t_i	-3,23500	1,790000	0,321742
(2) T_{ar}	2,61000	1,790000	0,382703
(3) X_0	3,87500	1,790000	0,275488
1 / 2	8,93500	1,790000	0,125871
1 / 3	-2,12000	1,790000	0,446397
2 / 3	,33500	1,790000	0,882219

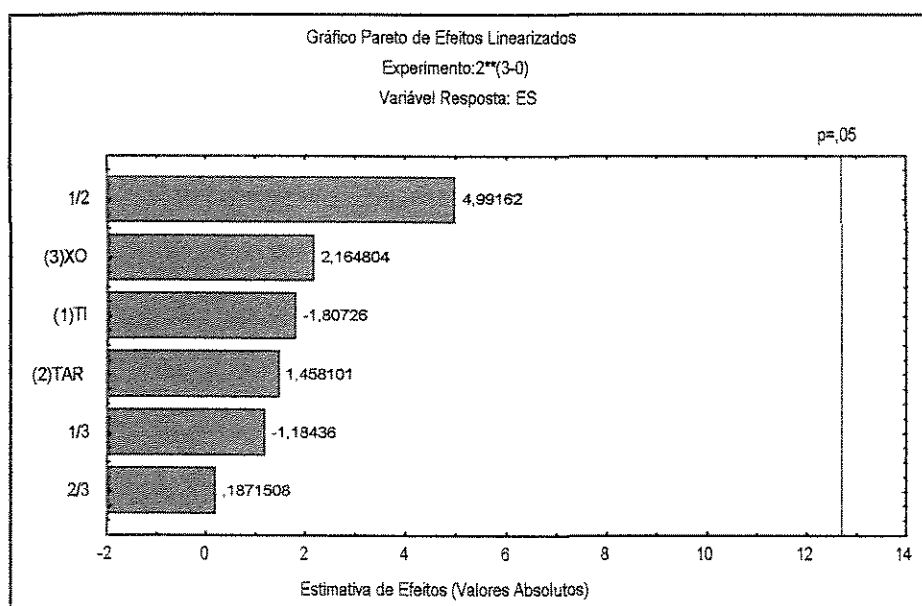


FIGURA 4.32 - Diagrama de Pareto – resposta ES – Experimento II

Uma análise numérica da variável eficiência de secagem (ES) entre os experimentos I e II, permite verificar que apesar dos maiores valores numéricos desta variável serem para o experimento II, a interação entre as variáveis de processo X_0 , T_{ar} e t_i com a variável resposta ES, não se apresentou com influência significativa para o teste de “Student”. Este fato ocorre devido à diminuição da energia total fornecida à operação combinada com a diminuição do gradiente de temperatura dos grãos e decréscimo na quantidade de água evaporada para maiores valores de t_i .

4.5.2.5. Efeitos das variáveis e suas interações: leito de jorro/descanso - variável resposta CS

Na Tabela 4.12, pode-se verificar que o efeito da variável tempo de intermitência tem influência significativa no coeficiente de secagem (CS). A Figura 4.33 apresenta as tendências dos efeitos e suas interações apontando para o mesmo resultado. Este resultado mostrou que para os valores dos fatores utilizados para o regime de leito de jorro/descanso (Tabela 4.7) a variável que mais influenciou no processo de secagem foi o tempo de intermitência no aquecimento. Portanto, os maiores valores do coeficiente de secagem, foram obtidos para tempo de intermitência maior, 40 minutos, pela diminuição no valor da energia total fornecida à secagem nas condições realizadas deste experimento.

TABELA 4.12: Efeitos das variáveis e suas interações: Leito de Jorro/descanso – Variável Resposta CS

Fatores	Efeitos	Desvio Padrão	p (valor)
(1) t_i	,550000	,025000	,028917
(2) T_{ar}	,035000	,025000	,394863
(3) X_0	,180000	,025000	,087857
1 / 2	-,050000	,025000	,295167
1 / 3	,185000	,025000	,085512
2 / 3	-,130000	,025000	,120950

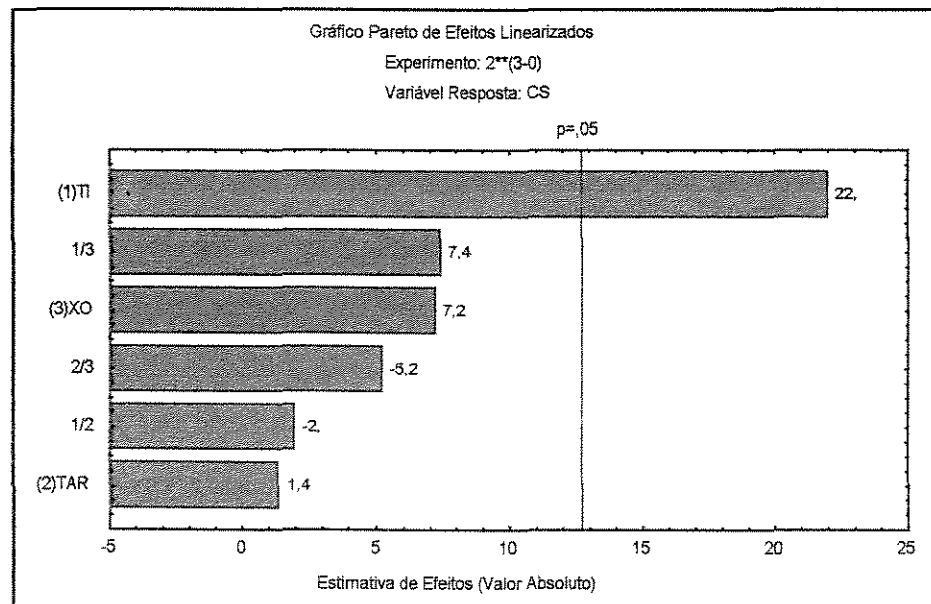


FIGURA 4.33 - Diagrama de Pareto – resposta CS – Experimento II

4.5.2.6. Efeitos das variáveis e suas interações: leito de jorro/descanso - variável resposta LM

Na Tabela 4.12, pode-se verificar que o efeito tempo de intermitência se mostrou influente em LM, com significância superior a 95%. A Figura 4.34 mostra as tendências dos efeitos e suas interações apontando para o mesmo resultado. Este resultado mostra que para os valores dos fatores utilizados para o regime de leito de jorro/descanso (Tabela 4.7), os maiores valores obtidos dos coeficientes LM, na secagem, foram obtidos para tempos de intermitência maiores, ou seja, quanto maior o tempo de intermitência, menor foi a energia total fornecida para o sistema de secagem.

O coeficiente LM identifica a operação de secagem mais eficiente levando em conta somente o aspecto fluidodinâmico, pois a energia mecânica é considerada nesse coeficiente.

TABELA 4.12 -Efeitos das variáveis e suas interações: Leito de Jorro/descanso – Variável Resposta LM

Fatores	Efeitos	Desvio Padrão	p (valor)
(1) t_i	1,445000	,075000	,033013
(2) T_{ar}	,295000	,075000	,158495
(3) X_0	,465000	,075000	,101804
1 / 2	-,135000	,075000	,322829
1 / 3	,495000	,075000	,095729
2 / 3	-,335000	,075000	,140215

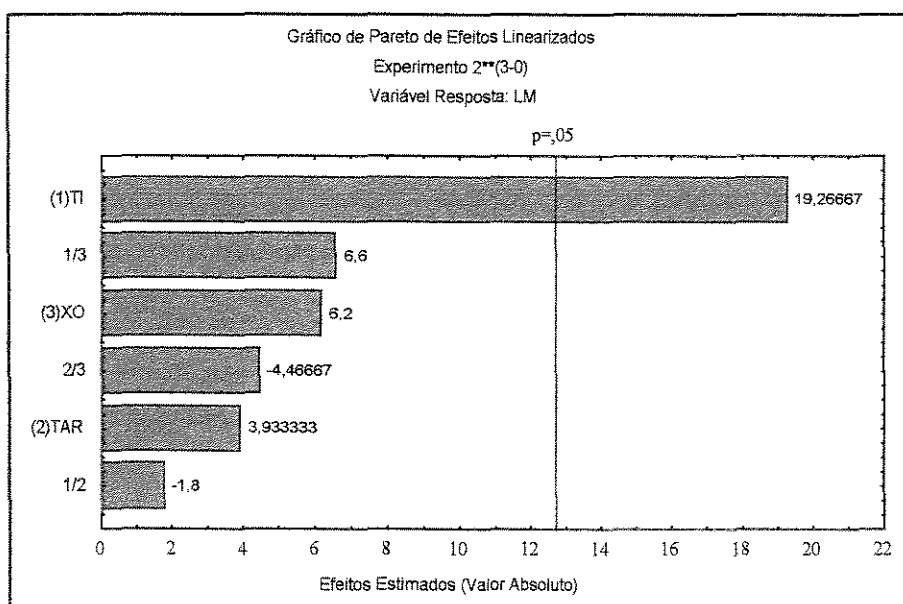


FIGURA 4. 34 - Diagrama de Pareto – resposta LM – Experimento II

Pela análise das Tabelas 4.3 e 4.4 verificou-se que as modificações feitas nos valores das variáveis de processo (nível superior e inferior) não causaram alterações estatisticamente significativas na variável resposta razão de umidade. Contudo, os valores e os sinais dos efeitos

apresentados nas Figuras 4.28 e 4.29, reafirmam os resultados obtidos através da análise gráfica das curvas de secagem e temperatura do grão realizada no item 4.1.

A análise estatística da eficiência e dos coeficientes de secagem, permitiu avaliar o consumo de energia para as modificações propostas para os valores das variáveis de processo (nível superior e inferior).

Para o experimento I, que consistiu na realização de 8 ensaios de secagem em regime de leito de jorro/fixo, a eficiência de secagem se mostrou significativa, pois a operação de secagem intermitente propiciou uma acentuada redução da energia total fornecida ao processo.

O coeficiente LM identifica o leito mais eficiente em relação apenas ao aspecto fluidodinâmico. Embora o experimento II foi realizado com a queda de pressão no leito atingindo e passando pelo seu valor máximo várias vezes durante cada ensaio de secagem, os maiores valores de LM, foram obtidos nesse regime intermitente de secagem, pois apresentou os menores valores de energia mecânica gastos.

4.6. Análise da taxa de secagem - Comparação entre os regimes intermitentes utilizados – leitos jorro/fixo e leito de jorro/descanso

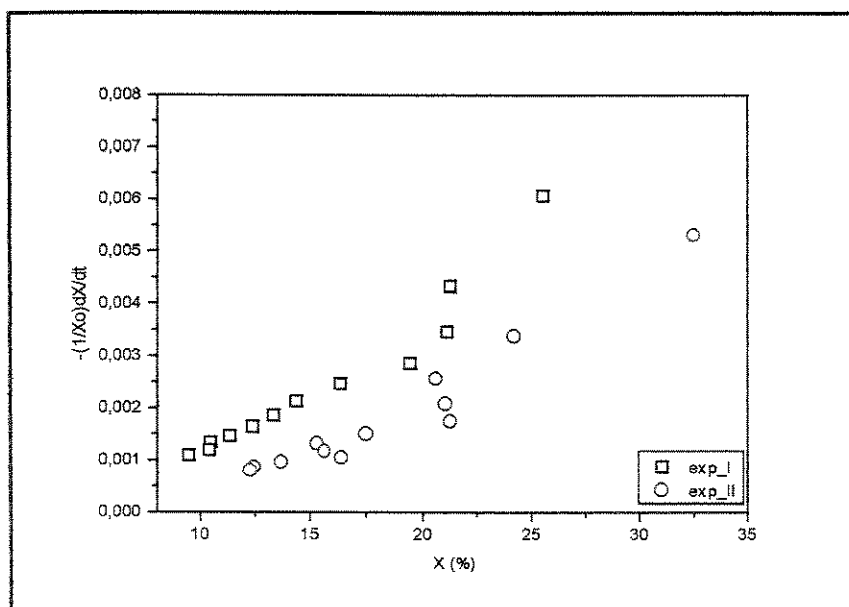
A comparação entre os regimes de secagem utilizados foi feita nesta etapa do trabalho através das curvas de secagem, avaliando-se as taxas de secagem.

As Figuras 4.35 a 4.38 apresentam o comportamento das curvas de taxa de secagem nos experimentos de leito de jorro/fixo e leito de jorro/descanso, nas condições experimentais presentes nas Tabelas 4.1 e 4.2.

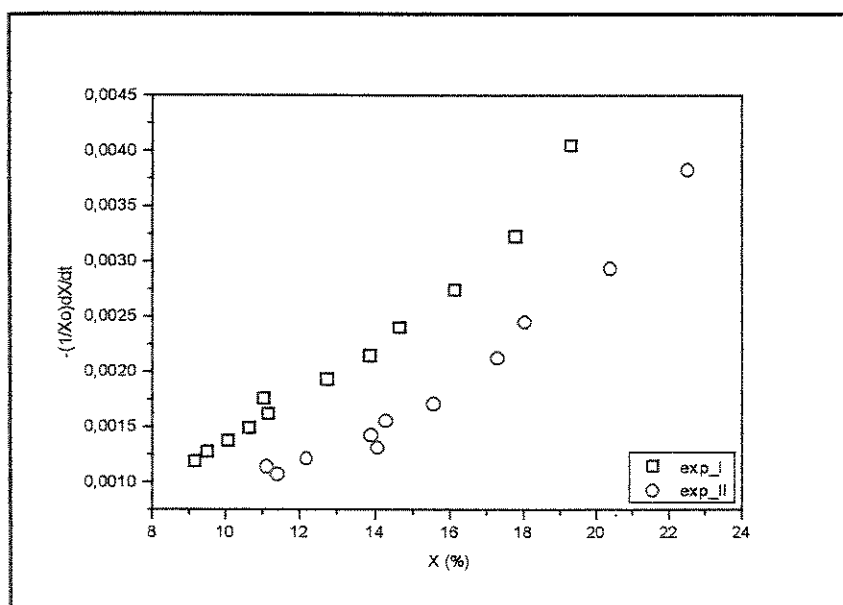
A análise das Figuras 4.35 a 4.37 permite observar que a operação de secagem realizada no regime de intermitência no jorro e no aquecimento atingiu taxas de secagem menores, enquanto no regime de jorro/fixo as taxas alcançadas foram maiores. Verificou-se também que os ensaios realizados nas condições das Figuras 4.35 e 4.37 apresentaram taxas maiores, fortemente influenciadas pela temperatura do ar de secagem, seguida pela influência da umidade inicial do grão de feijão.

Verificou-se o aparecimento de pontos onde o comportamento da taxa de secagem não foi contínuo. Este fato ocorreu devido ao fenômeno da reumidificação dos grãos, conforme já verificado na análise das curvas de secagem. Estes pontos de reumidificação se mostraram mais explícitos, principalmente, nos ensaios de secagem que operaram nas condições de umidade inicial do grão com teores em torno de 30% b.s.

Os resultados de umidade final apresentados nas Tabelas 4.1 e 4.2, estão de acordo com os resultados das taxas de secagem, onde pode-se verificar que nos ensaios realizados para o experimento de leito de jorro/descanso, as umidades finais atingidas foram maiores, significando valores de taxas menores.



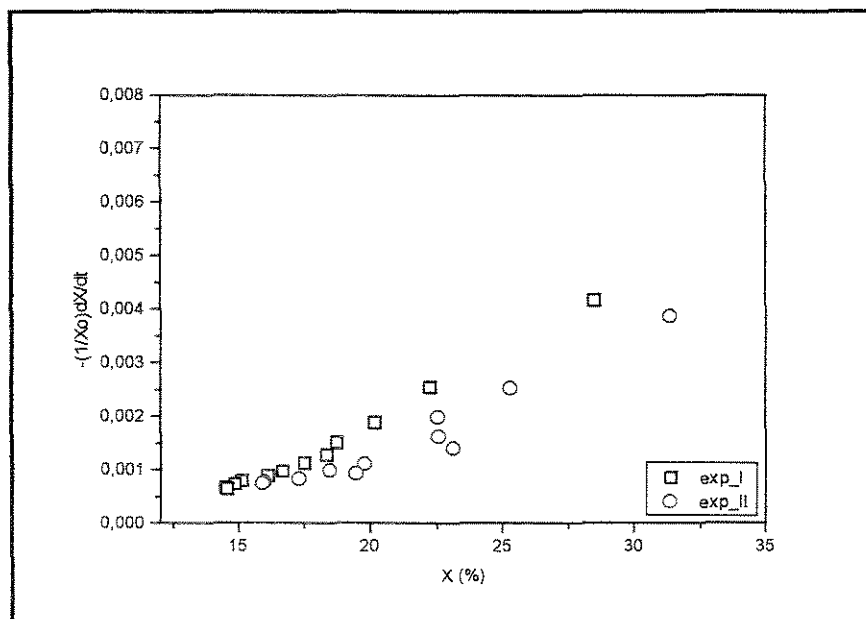
(a)



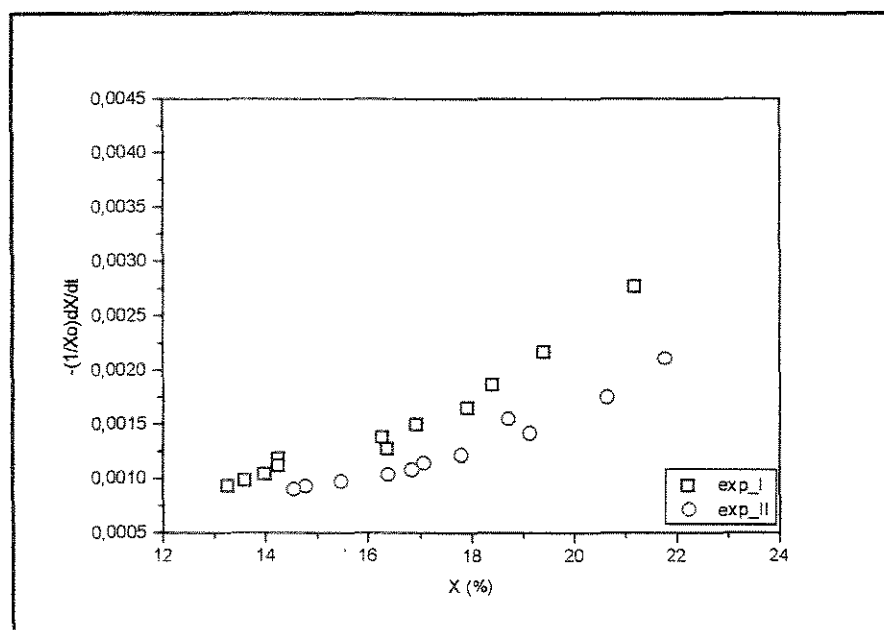
(b)

FIGURA 4.35 – Representação gráfica das taxas de secagem

(a) $T_{ar} = 80^{\circ}\text{C}$; $X_o = 30\%$ base seca ; $t_i = 40\text{ min}$ – ensaios 1(b) $T_{ar} = 80^{\circ}\text{C}$; $X_o = 20\%$ base seca; $t_i = 40\text{ min}$ – ensaios 2



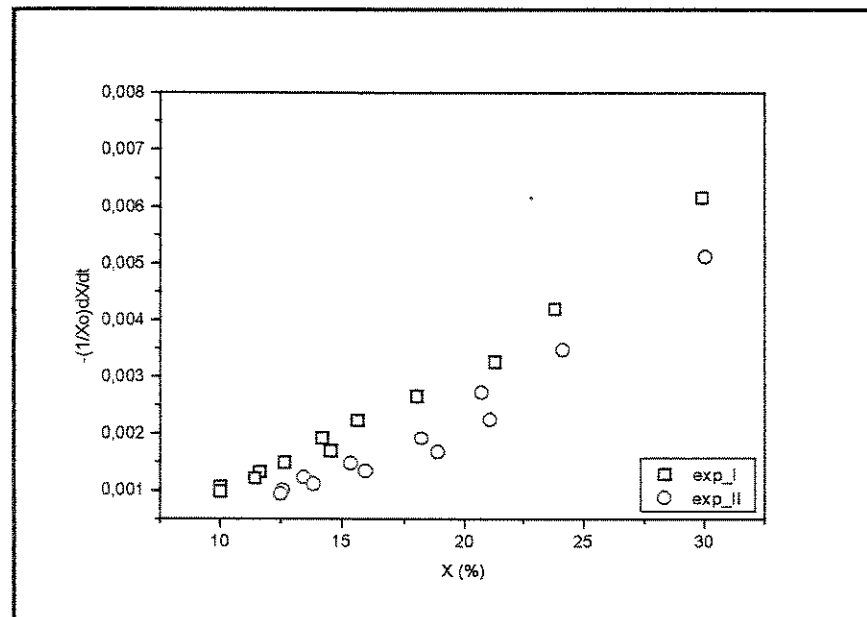
(a)



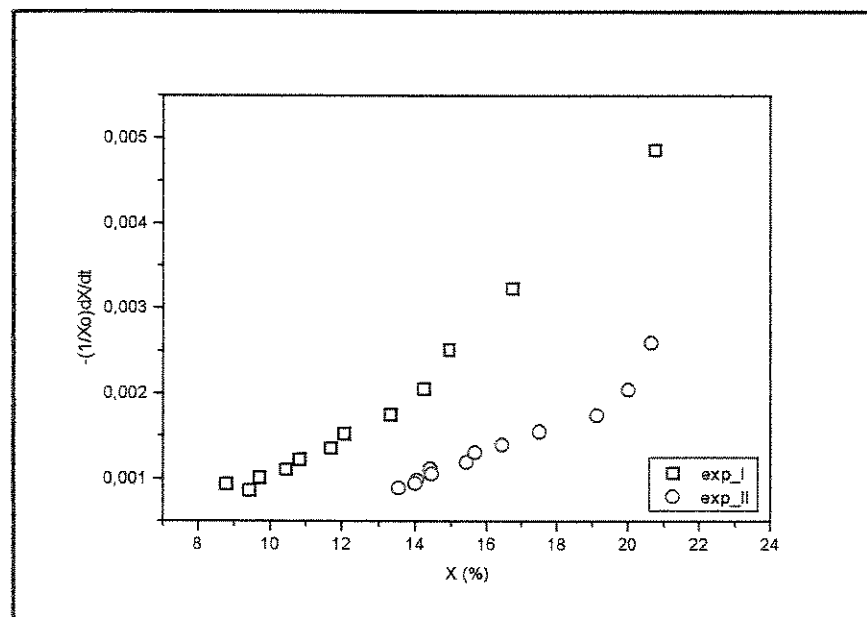
(b)

FIGURA 4.36 – Representação gráfica das taxas de secagem

(a) $T_{ar} = 60^{\circ}\text{C}$; $X_o = 30\%$ base seca ; $t_i = 40\text{ min}$ – ensaios 3(b) $T_{ar} = 60^{\circ}\text{C}$; $X_o = 20\%$ base seca; $t_i = 40\text{ min}$ – ensaios 4



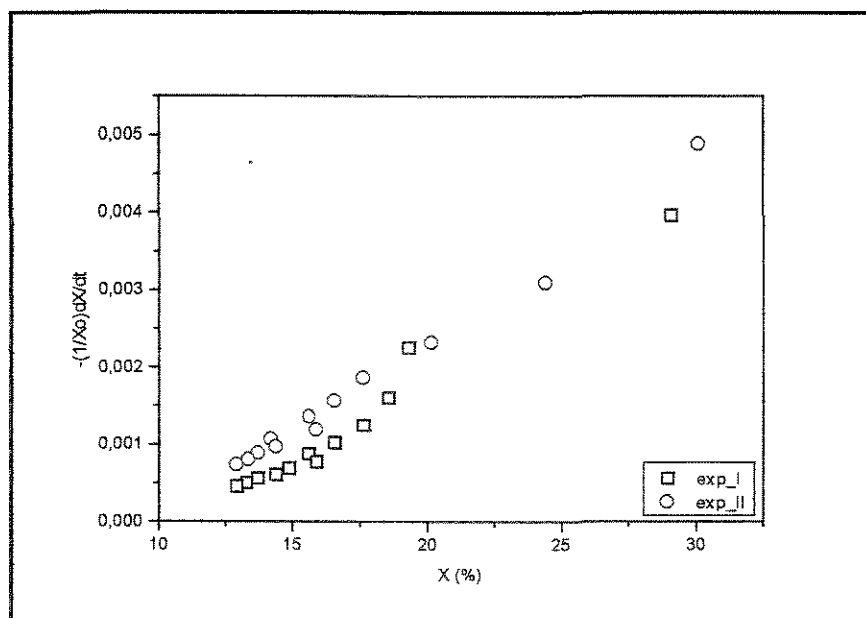
(a)



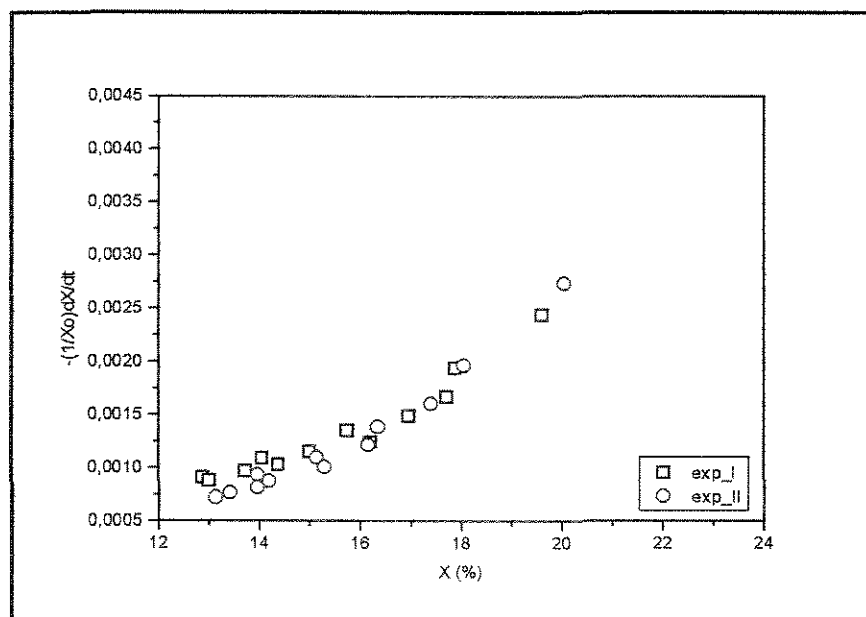
(b)

FIGURA 4.37 - Representação gráfica das taxas de secagem

(a) $T_{ar} = 80^{\circ}\text{C}$; $X_o = 30\%$ base seca ; $t_i = 20\text{ min}$ – ensaios 5(b) $T_{ar} = 80^{\circ}\text{C}$; $X_o = 20\%$ base seca; $t_i = 20\text{ min}$ – ensaios 6



(a)



(b)

FIGURA 4.38 - Representação gráfica das taxas de secagem

(a) $T_{ar} = 60^{\circ}\text{C}$; $X_o = 30\%$ base seca ; $t_i = 20\text{ min}$ – ensaios 7(b) $T_{ar} = 60^{\circ}\text{C}$; $X_o = 20\%$ base seca; $t_i = 20\text{ min}$ – ensaios 8

4.7. Cinética de secagem

Os resultados experimentais da cinética de secagem apresentados nos itens 4.2 a 4.5 foram utilizados em um estudo empírico do processo, através das equações 2.18 e 2.19, que correspondem aos modelos de difusão de líquido simplificada e de Page. Esses modelos foram escolhidos em virtude de serem simplificados, e ainda assim descreverem de maneira satisfatória a secagem de grãos (CAVALCANTI, 1997).

4.7.1. Curvas de secagem

Nas Tabelas 4.13 a 4.16, encontram-se os coeficientes das equações de difusão de líquido simplificada com um termo da série e os coeficientes da equação de Page, para cada ensaio nos regimes leito de jorro/fixo e leito de jorro/descanso, obtidos por regressão não-linear.

Na Tabela 4.13, que mostra os coeficientes da equação de difusão de líquido simplificada com um termo da série, observou-se que não existiu uma variação acentuada do coeficiente “a”. Diante deste fato, determinou-se um valor médio para representar o coeficiente “a”, que foi de 0,905163. As Figuras 4.39 a 4.46 mostram respectivamente, os dados experimentais e os calculados com a equação da difusão de líquido simplificada para o primeiro termo da série para as condições operacionais intermitentes nos regimes de jorro/fixo e jorro/descanso.

Os valores do coeficiente “a” se aproxima do valor obtido por MATA (1997), para sementes de feijão da variedade “carioca” secas em condições contínuas e camada fina, que foi de 0,8915663 para 25% de umidade inicial e 0,8717719 para 30% de umidade inicial e, ambas com temperatura do ar de secagem em 80°C.

No instante inicial ($t = 0$), pode-se notar um desvio no ajuste do modelo, que já era esperado, pois a razão de umidade é 1, e no modelo de difusão simplificado este valor é o equivalente ao valor de “a”, ou seja de 0,905163

TABELA 4.13: Coeficientes da equação de difusão de líquido simplificada, usando um termo da série obtidos por meio de regressão não linear para cada ensaio com regime de leito de jorro/fixo.

Equação de difusão de líquido simplificada usando um termo da série					
$X_f/X_o = a \cdot \exp(-kt)$					
Temperatura do ar (°C)	Umidade Inicial (% base seca)	Tempo de intermitência (min)	A	k (t ⁻¹)	R ²
80	30	40	0,9191	0,0053	96,67
80	20	40	0,9632	0,0034	96,96
60	30	40	0,8521	0,0027	84,13
60	20	40	0,9599	0,0020	96,44
80	30	20	0,9006	0,0052	96,62
80	20	20	0,8883	0,0035	92,15
60	30	20	0,7942	0,0030	73,99
60	20	20	0,9634	0,0017	95,72
Média			0,9051		

Na Tabela 4.14, observa-se fato semelhante ao ocorrido nas equações de difusão de líquido simplificada para o primeiro termo da série, onde foram encontradas tendências para o coeficiente “a”. Notou-se que o valor do coeficiente “a” varia em sua maioria entre 0,86 e 0,96. Calculando a média foi obtido o valor de 0,9175.

TABELA 4.14: Coeficientes da equação de difusão de líquido simplificada, usando um termo da série obtidos por meio de regressão não linear para cada ensaio com regime de leito de jorro/descanso.

Equação de difusão de líquido simplificada usando um termo da série					
$X_f/X_o = a \cdot \exp(-kt)$					
Temperatura do ar (°C)	Umidade Inicial (% base seca)	Tempo de intermitência (min)	a	k (t ⁻¹)	R ² (%)
80	30	40	0,8606	0,0040	88,38
80	20	40	0,9464	0,0029	96,11
60	30	40	0,8915	0,0025	82,37
60	20	40	0,9740	0,0016	92,65
80	30	20	0,8956	0,0038	92,89
80	20	20	0,9692	0,0019	92,40
60	30	20	0,8630	0,0035	83,78
60	20	20	0,9396	0,0017	93,92
Média			0,9175		

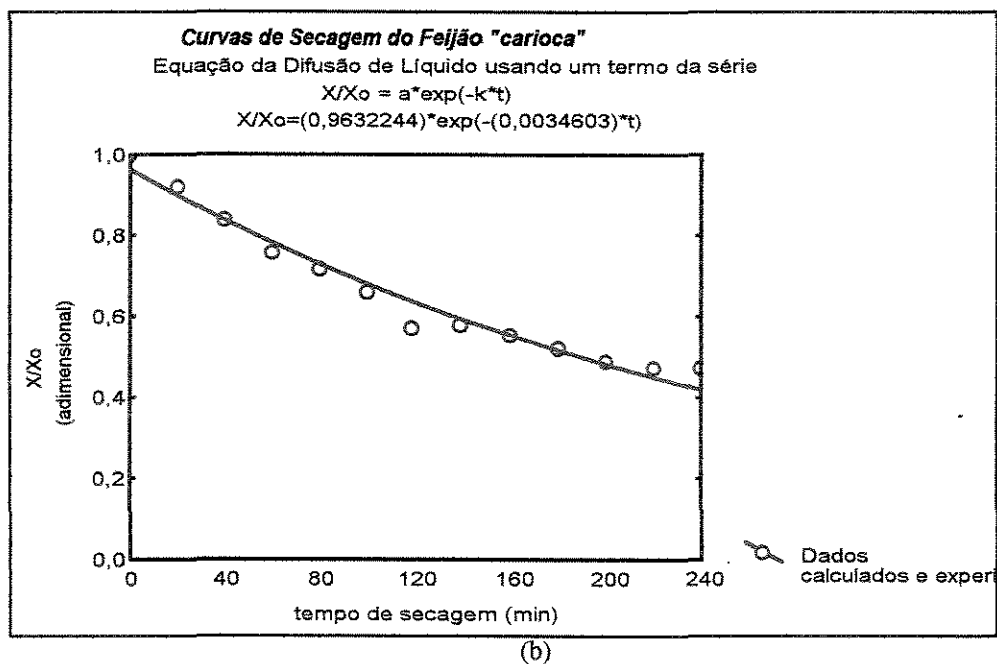
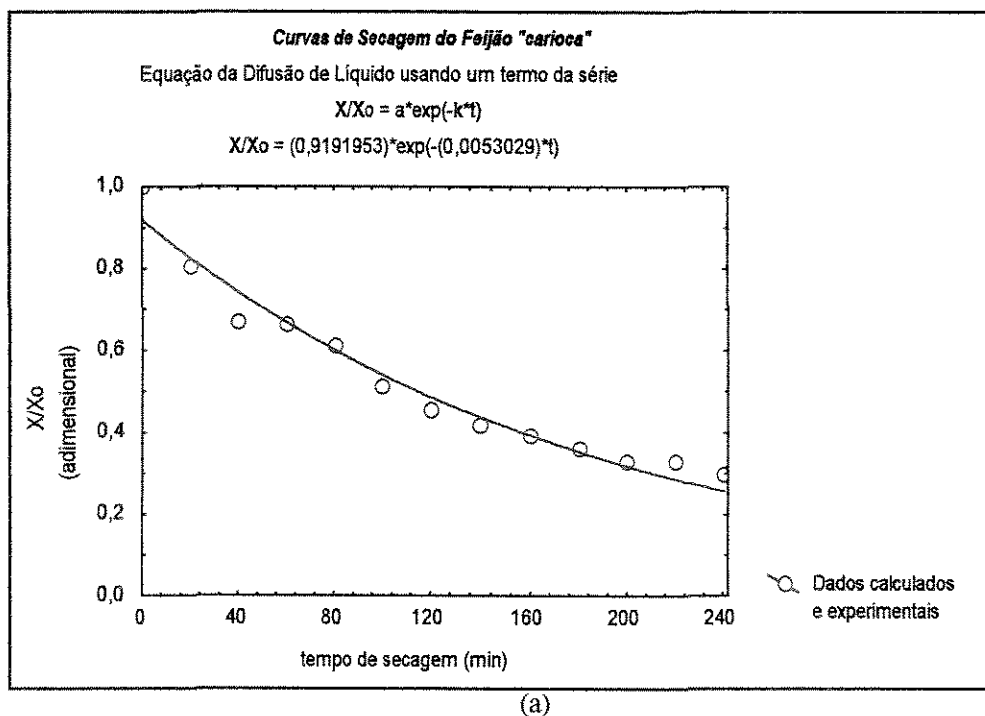
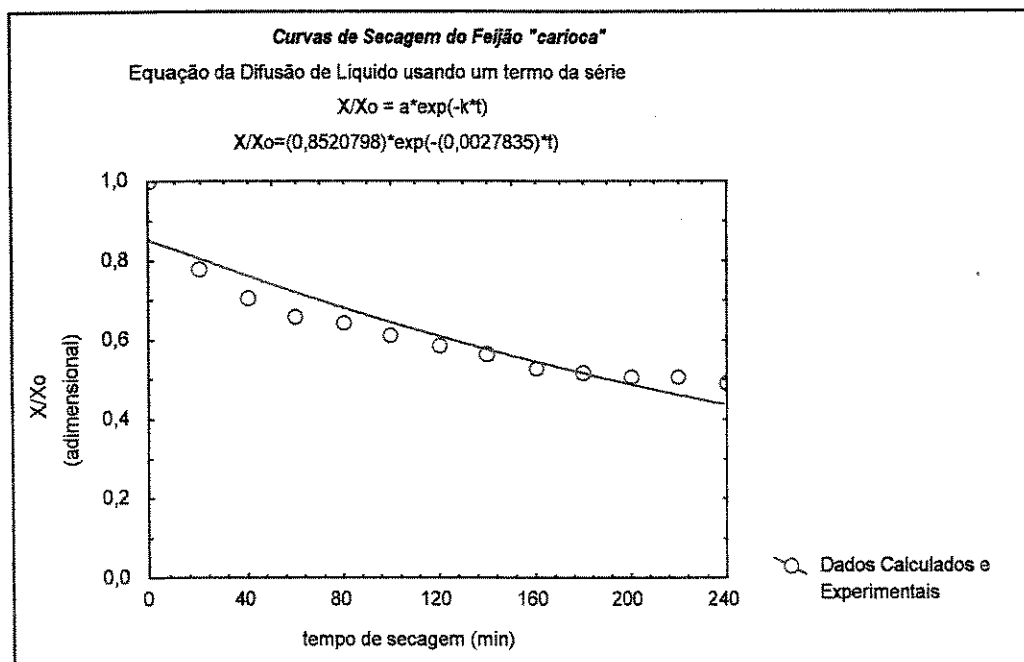


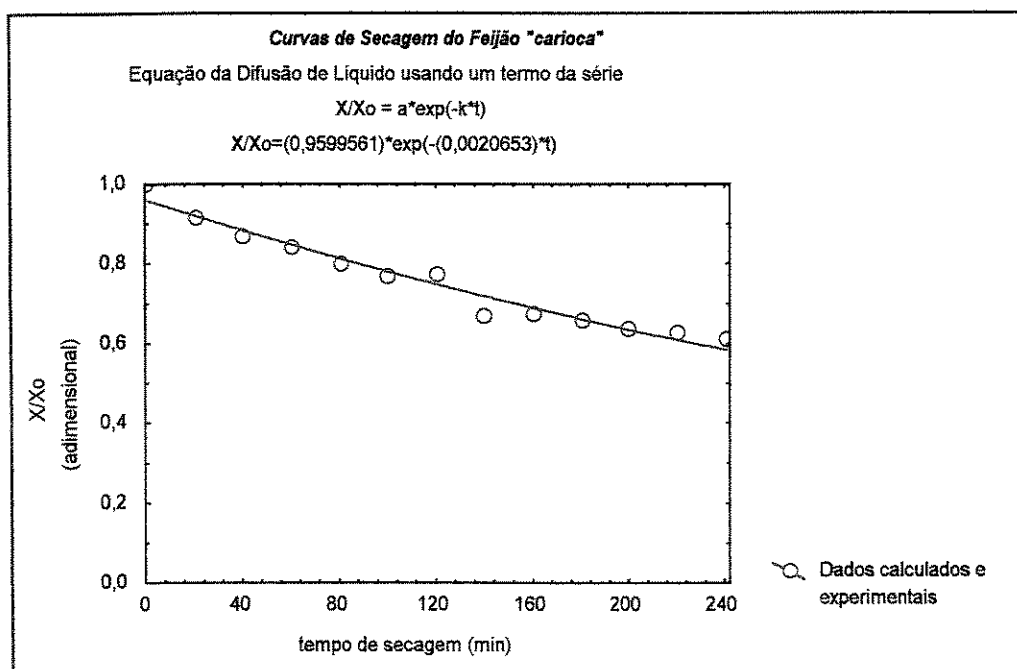
FIGURA 4.39 - Curvas dos dados experimentais dos grãos de feijão “carioca” e calculados pela equação de difusão de líquidos usando um termo da série, leite de jorro/fixo.

(a) $T_{ar} = 80^{\circ}\text{C}$; $X_o = 30\%$ base seca ; $t_i = 40\text{ min}$

(b) $T_{ar} = 80^{\circ}\text{C}$; $X_o = 20\%$ base seca ; $t_i = 40\text{ min}$



(a)

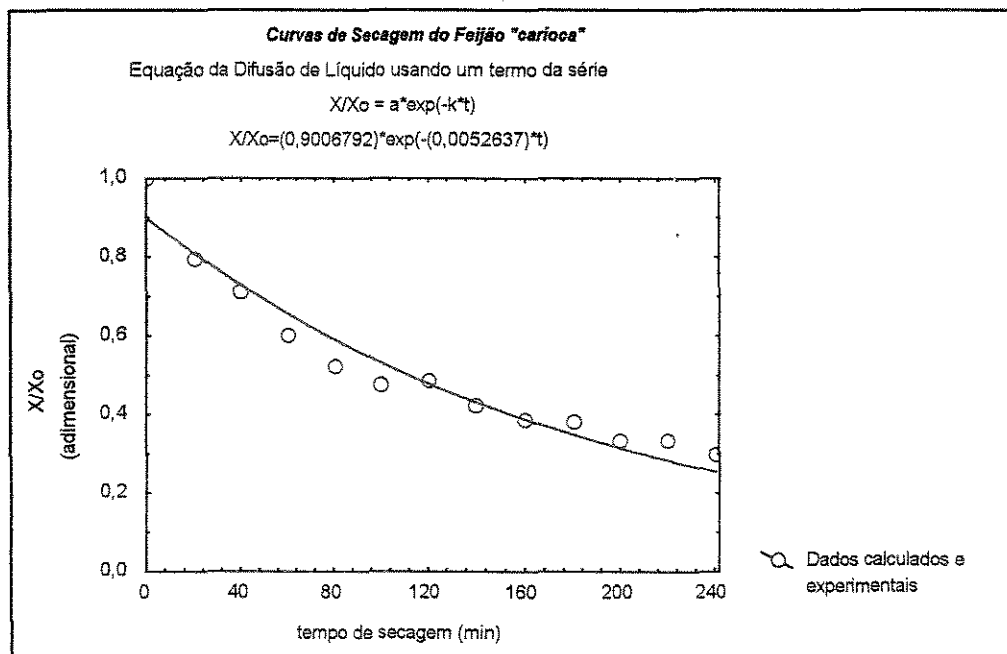


(b)

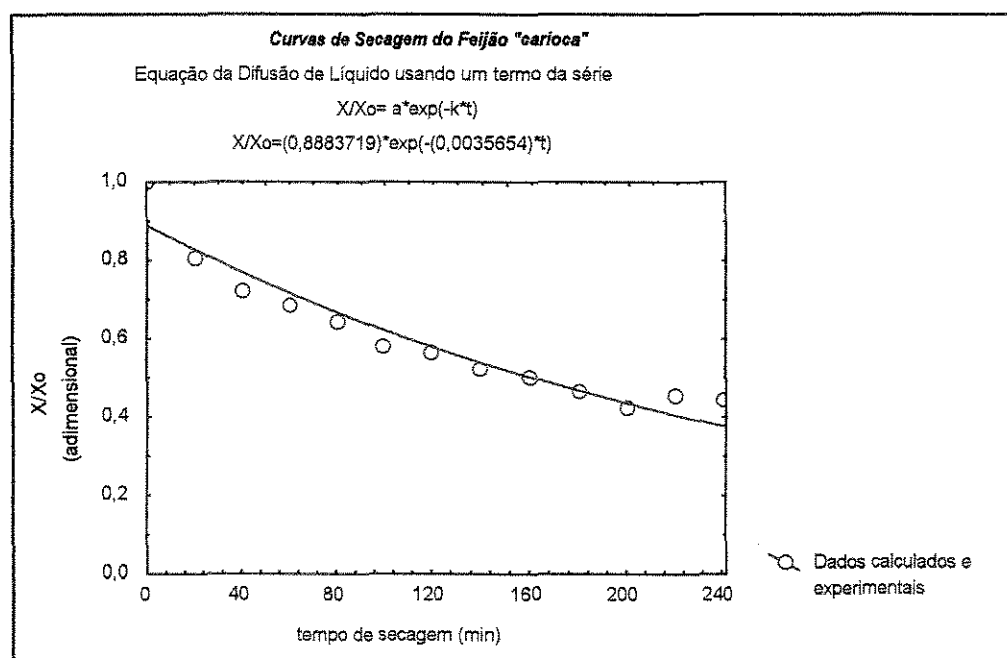
FIGURA 4.40 - Curvas dos dados experimentais dos grãos de feijão "carioca" e calculados pela equação de difusão de líquidos usando um termo da série, leito de jorro/fixo.

(a) $T_{ar} = 60^{\circ}\text{C}$; $X_o = 30\%$ base seca ; $t_i = 40$ min

(b) $T_{ar} = 60^{\circ}\text{C}$; $X_o = 20\%$ base seca; $t_i = 40$ min



(a)

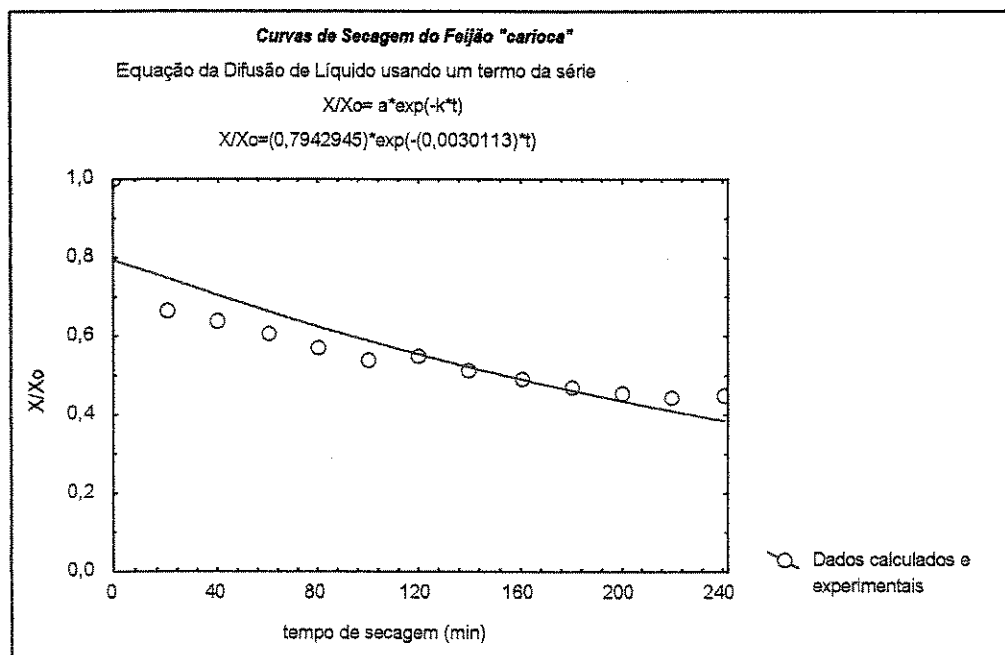


(b)

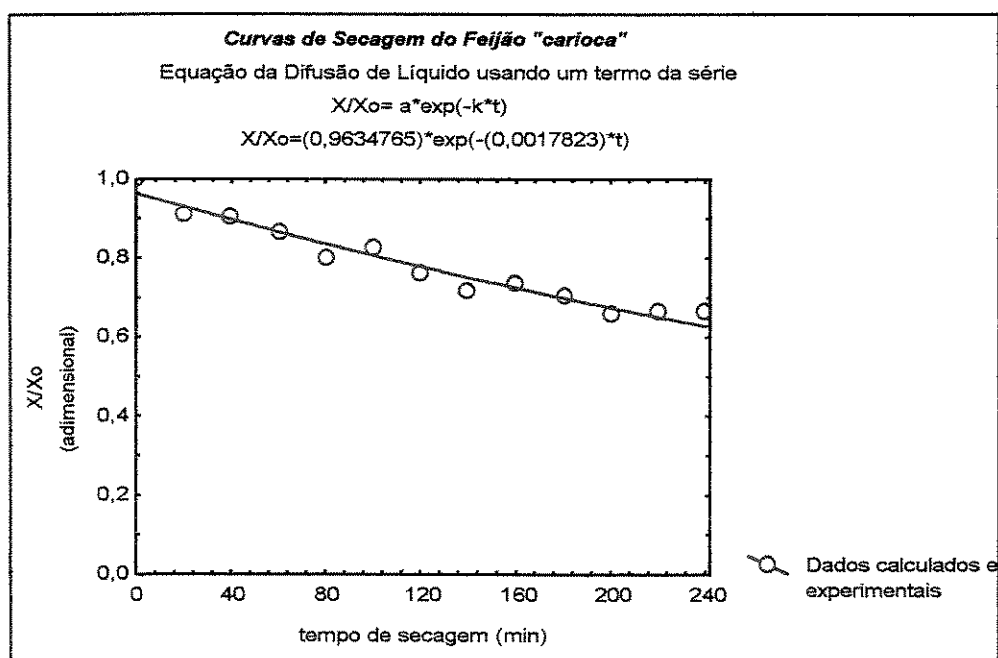
FIGURA 4.41 - Curvas dos dados experimentais dos grãos de feijão "carioca" e calculados pela equação de difusão de líquidos usando um termo da série, leito de jorro/fixo.

(a) $T_{ar} = 80^{\circ}\text{C}$; $X_o = 30\%$ base seca ; $t_i = 20\text{ min}$

(b) $T_{ar} = 80^{\circ}\text{C}$; $X_o = 20\%$ base seca ; $t_i = 20\text{ min}$



(a)

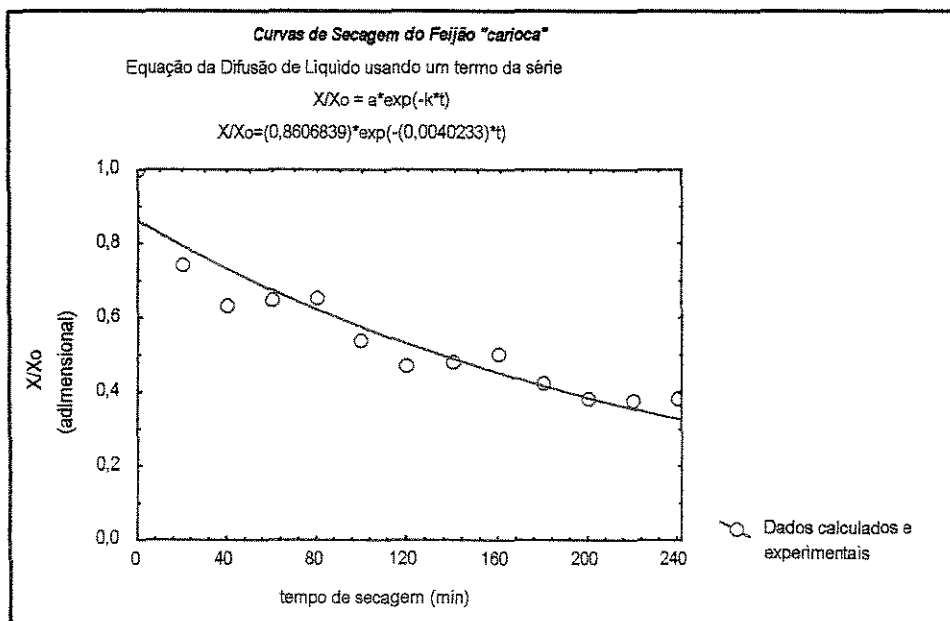


(b)

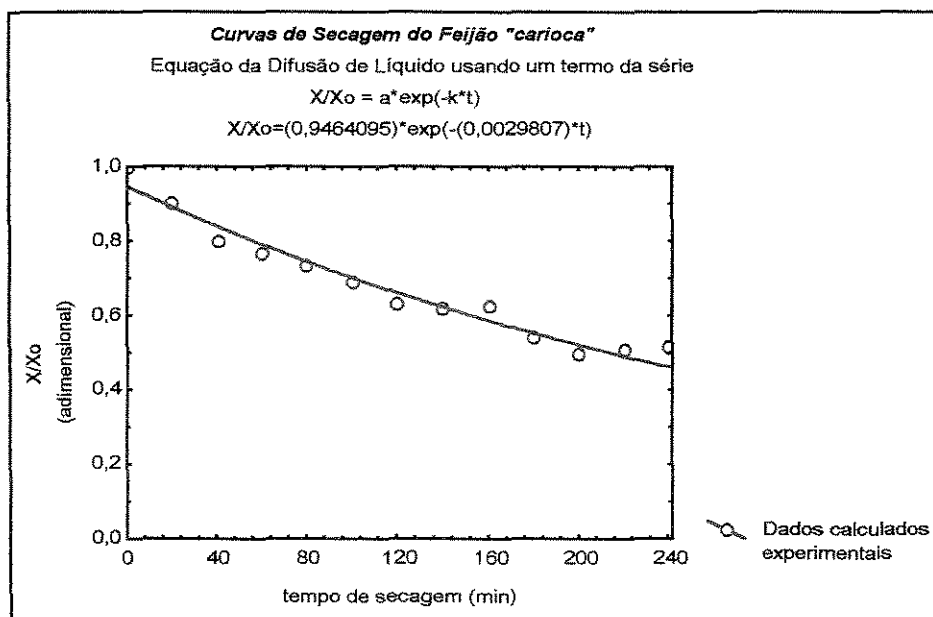
FIGURA 4.42 - Curvas dos dados experimentais dos grãos de feijão "carioca" e calculados pela equação de difusão de líquidos usando um termo da série, leito de jorro/fixo.

(a) $T_{ar} = 60^{\circ}\text{C}$; $X_o = 30\%$ base seca ; $t_i = 20$ min

(b) $T_{ar} = 60^{\circ}\text{C}$; $X_o = 20\%$ base seca; $t_i = 20$ min



(a)

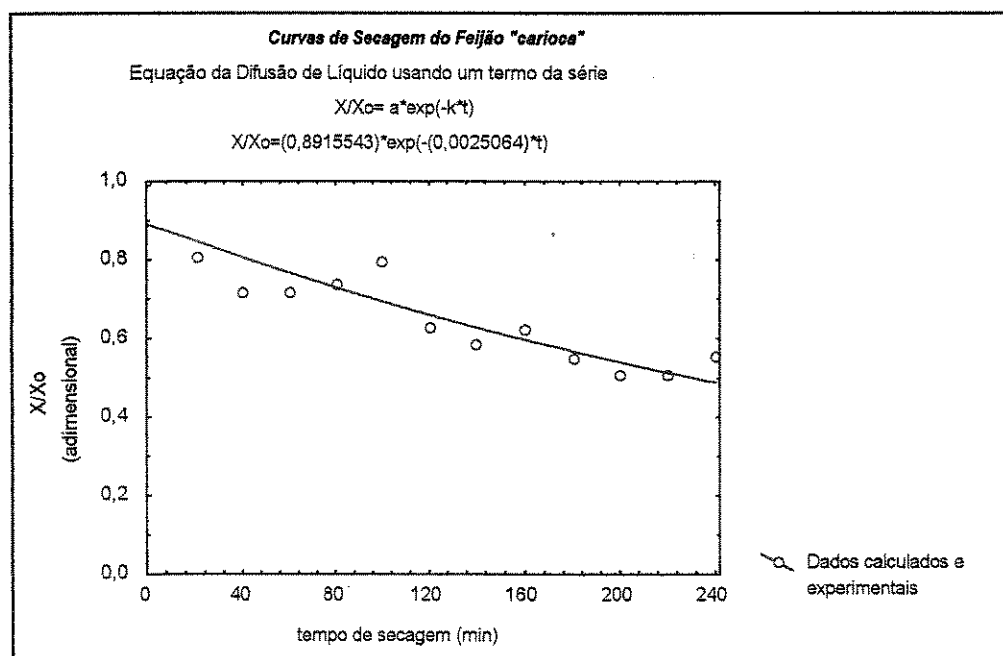


(b)

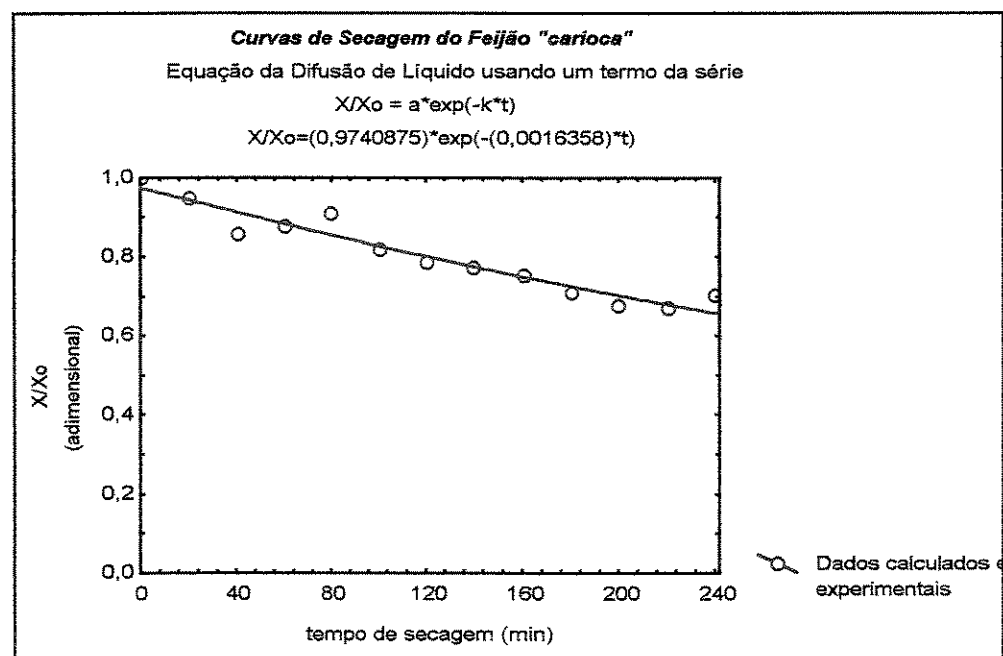
FIGURA 4.43 - Curvas dos dados experimentais dos grãos de feijão "carioca" e calculados pela equação de difusão de líquidos usando um termo da série, leito de jorro/descanso.

(a) $T_{ar} = 80^{\circ}\text{C}$; $X_o = 30\%$ base seca ; $t_i = 40$ min

(b) $T_{ar} = 80^{\circ}\text{C}$; $X_o = 20\%$ base seca; $t_i = 40$ min



(a)

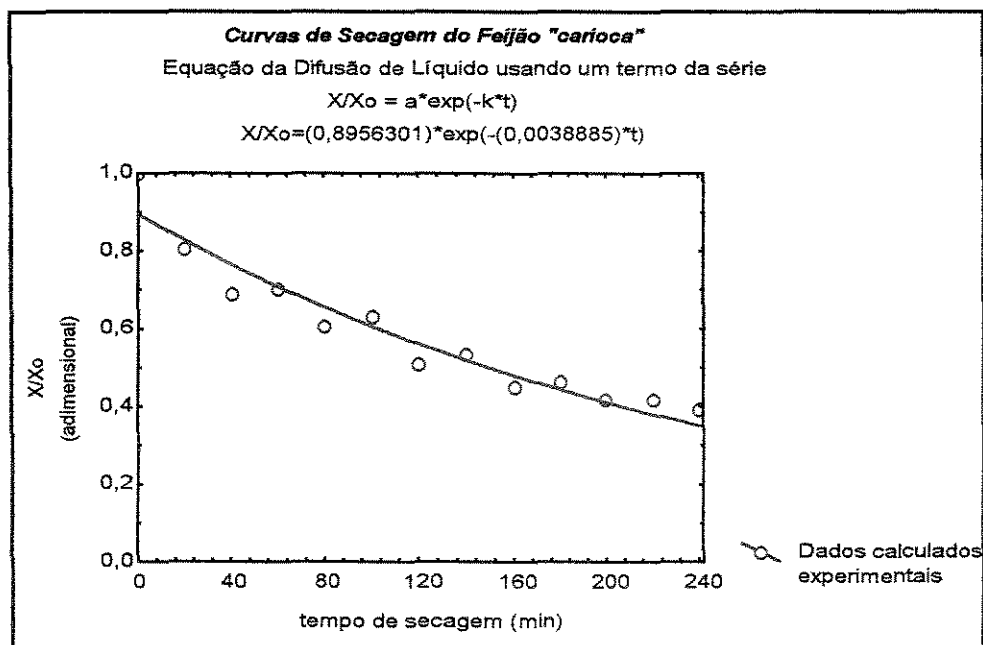


(b)

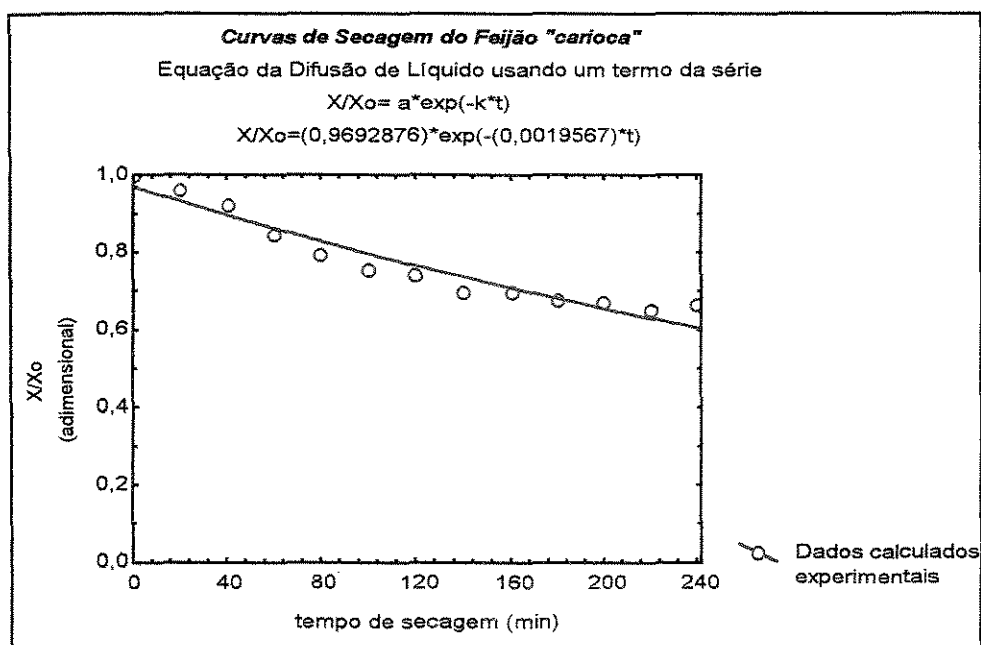
FIGURA 4.44 - Curvas dos dados experimentais dos grãos de feijão "carioca" e calculados pela equação de difusão de líquidos usando um termo da série, leite de jorro/descanso.

(a) $T_{ar} = 60^{\circ}\text{C}$; $X_o = 30\%$ base seca ; $t_i = 40$ min

(b) $T_{ar} = 60^{\circ}\text{C}$; $X_o = 20\%$ base seca; $t_i = 40$ min



(a)



(b)

FIGURA 4.45 - Curvas dos dados experimentais dos grãos de feijão "carioca" e calculados pela equação de difusão de líquidos usando um termo da série, leito de jorro/descanso.

(a) $T_{ar} = 80^{\circ}\text{C}$; $X_o = 30\%$ base seca ; $t_i = 20$ min

(b) $T_{ar} = 80^{\circ}\text{C}$; $X_o = 20\%$ base seca ; $t_i = 20$ min

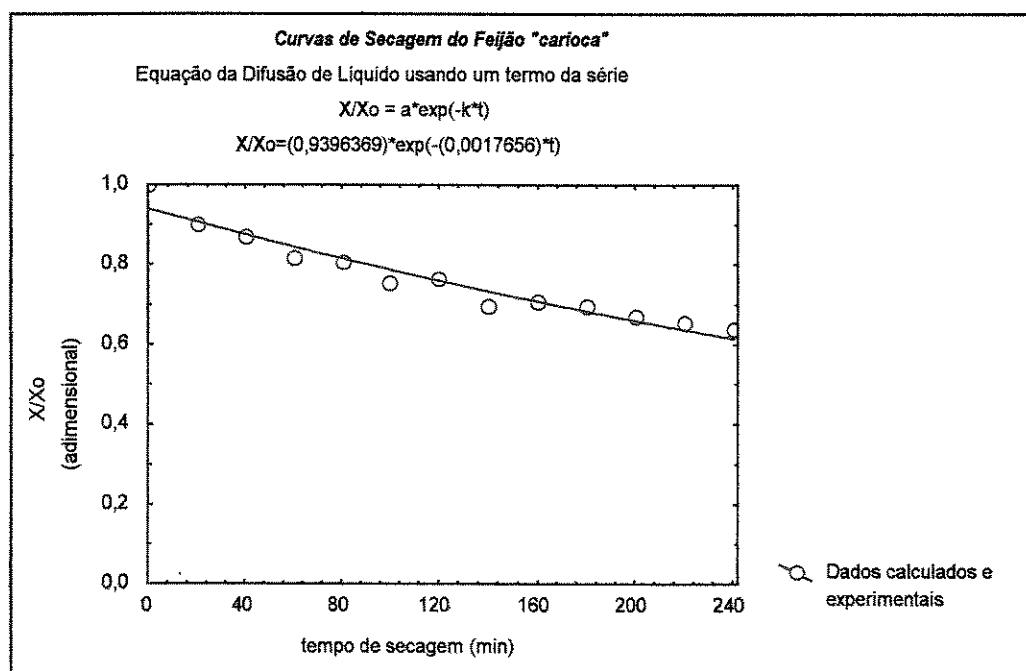
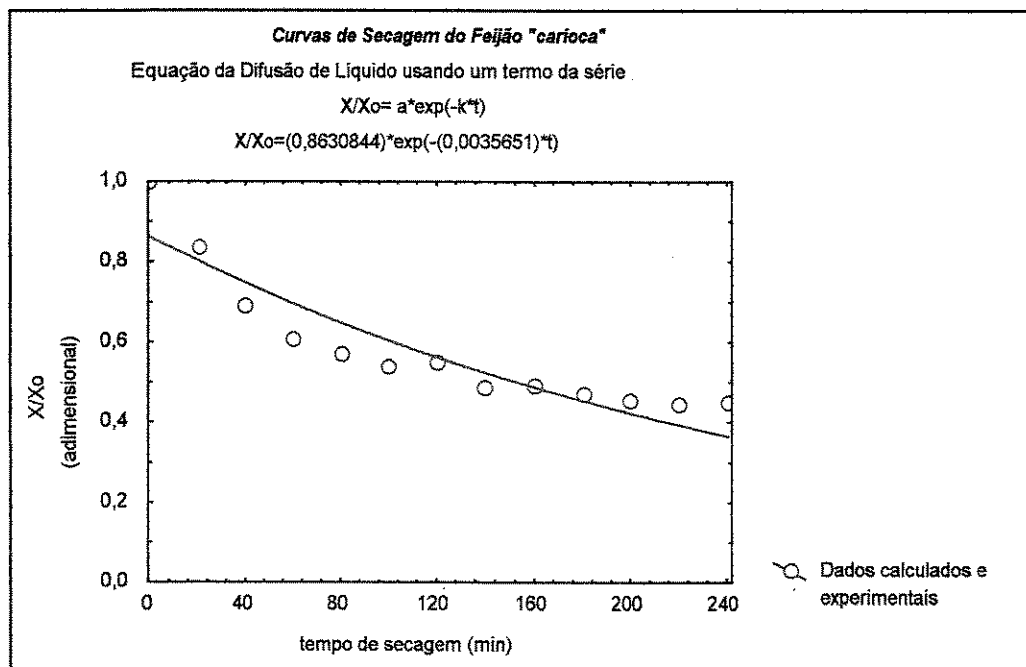


FIGURA 4.46 - Curvas dos dados experimentais dos grãos de feijão “carioca” e calculados pela equação de difusão de líquidos usando um termo da série, leito de jorro/descanso.

(a) $T_{ar} = 60^{\circ}\text{C}$; $X_o = 30\%$ base seca ; $t_i = 20$ min

(b) $T_{ar} = 60^{\circ}\text{C}$; $X_o = 20\%$ base seca ; $t_i = 20$ min

TABELA 4.15: Coeficientes da equação de PAGE obtidos por meio de regressão não linear, para cada ensaio com regime de leito de jorro/fixo.

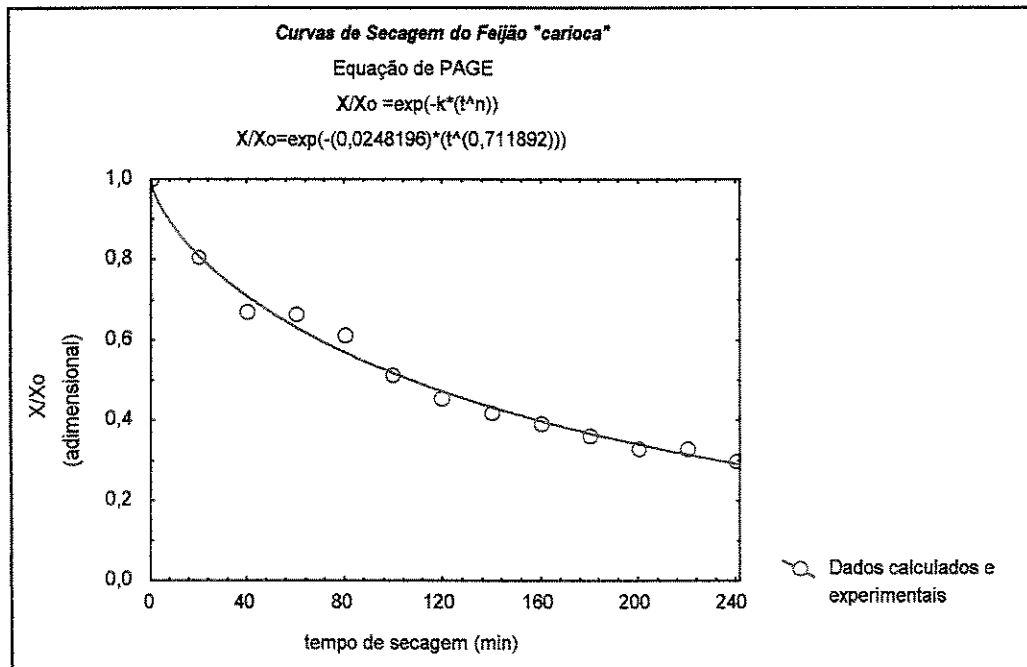
Equação de PAGE					
$X_f/X_o = \exp(-kt^n)$					
Temperatura do ar (°C)	Umidade Inicial (% base seca)	Tempo de intermitência (min)	k (min ⁻¹)	n	R ² (%)
80	30	40	0,024819	0,711892	99,01
80	20	40	0,010901	0,786964	98,61
60	30	40	0,072788	0,418130	99,71
60	20	40	0,009061	0,733857	98,16
80	30	20	0,035011	0,645998	99,26
80	20	20	0,039806	0,561393	99,18
60	30	20	0,148306	0,308020	99,27
60	20	20	0,007899	0,733390	97,26

TABELA 4.16: Coeficientes da equação de PAGE obtidos por meio de regressão não linear, para cada ensaio com regime de leito de jorro/descanso.

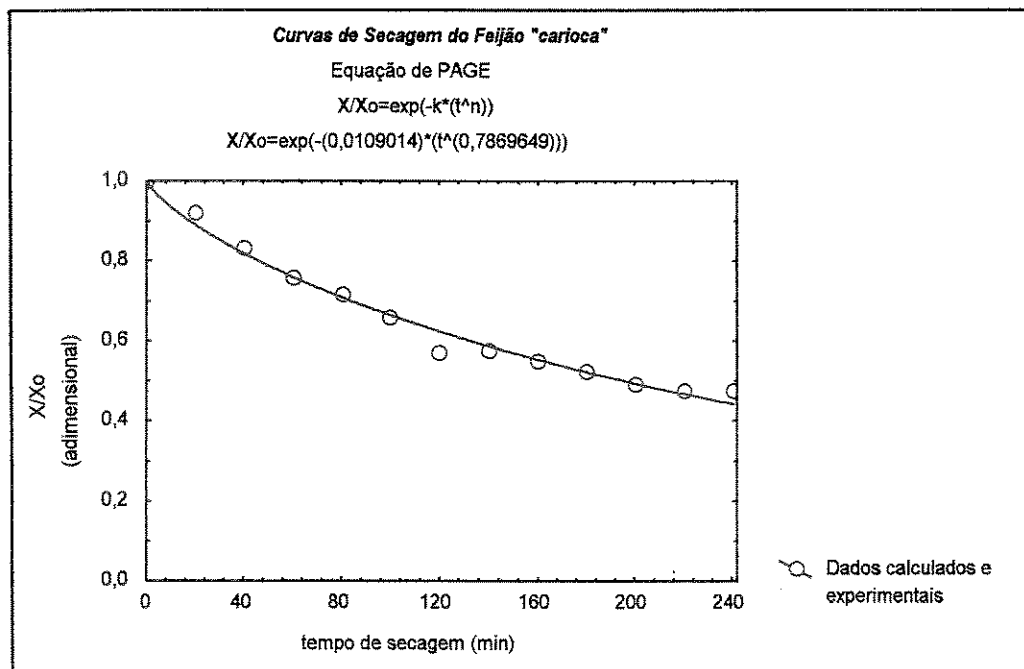
Equação de PAGE					
$X_f/X_o = \exp(-kt^n)$					
Temperatura do ar (°C)	Umidade Inicial (% base seca)	Tempo de intermitência (min)	k (min ⁻¹)	n	R ² (%)
80	30	40	0,057364	0,516024	96,31
80	20	40	0,013584	0,723845	98,24
60	30	40	0,039153	0,509703	87,84
60	20	40	0,005170	0,794301	93,27
80	30	20	0,034403	0,601889	97,83
80	20	20	0,008754	0,725695	97,74
60	30	20	0,060355	0,486939	97,15
60	20	20	0,016614	0,600685	98,75

Nas Tabelas 4.15 e 4.16, onde estão os coeficientes da Equação de Page, para os regimes de jorro/fixo e jorro/descanso, obtidos por regressão não linear, observa-se que os coeficientes de determinação para a equação proposta por Page são superiores aos da equação de difusão de líquido usando um termo da série. Nas Figuras de 4.47 a 4.54, encontram-se os dados experimentais e calculados usados pela equação de Page, para as condições operacionais das Tabelas 4.1 e 4.2. Para este modelo não são observados desvios para o instante inicial do processo.

Os resultados indicam que a equação de Page é a que apresenta um melhor comportamento para representar a secagem dentro das faixas experimentais e condições operacionais deste trabalho e vem reforçar a mesma afirmação feita por diversos autores, para diversos produtos (MISRA e BROOKER, 1980; SOARES, 1986; LIMA, 1995; MATA, 1997).



(a)

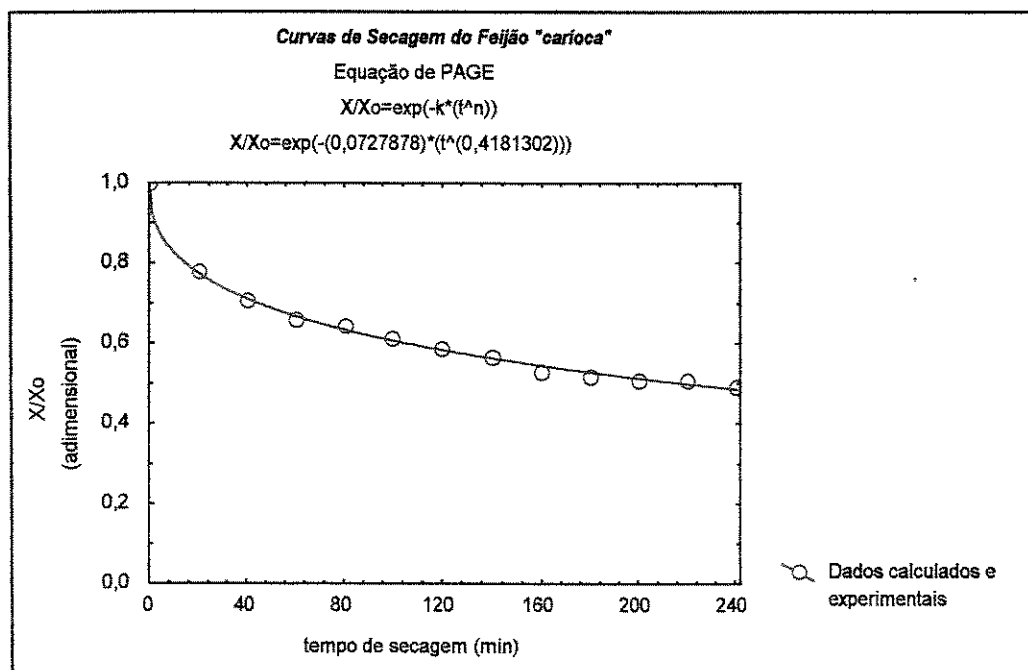


(b)

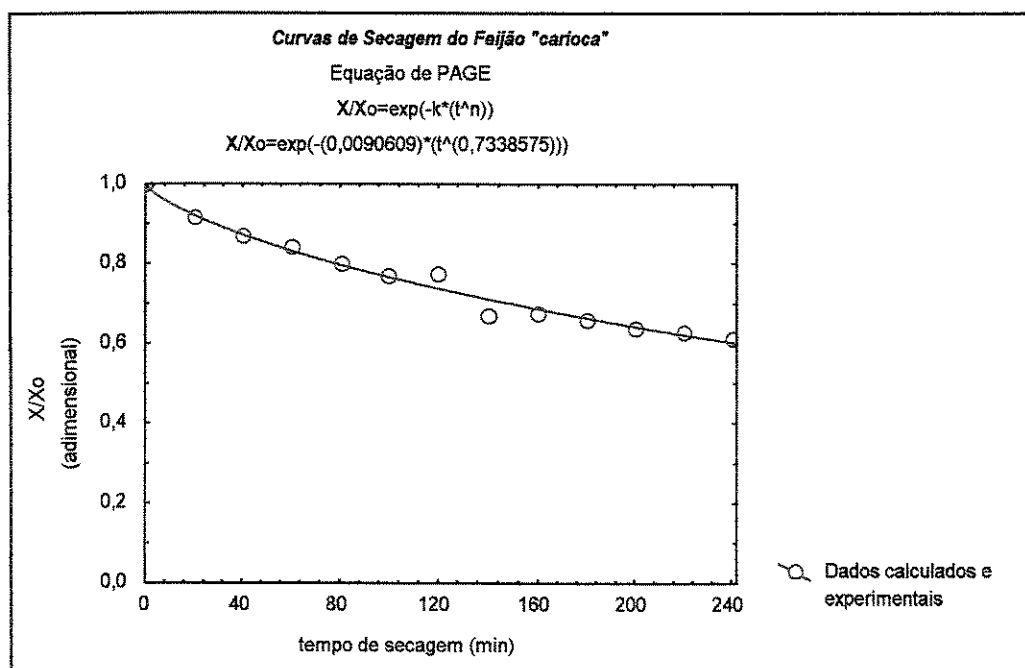
FIGURA 4.47 - Curvas dos dados experimentais dos grãos de feijão “carioca” e calculados pela equação de PAGE, leito de jorro/fixo.

(a) $T_{ar} = 80^{\circ}\text{C}$; $X_o = 30\%$ base seca ; $t_i = 40$ min

(b) $T_{ar} = 80^{\circ}\text{C}$; $X_o = 20\%$ base seca; $t_i = 40$ min



(a)

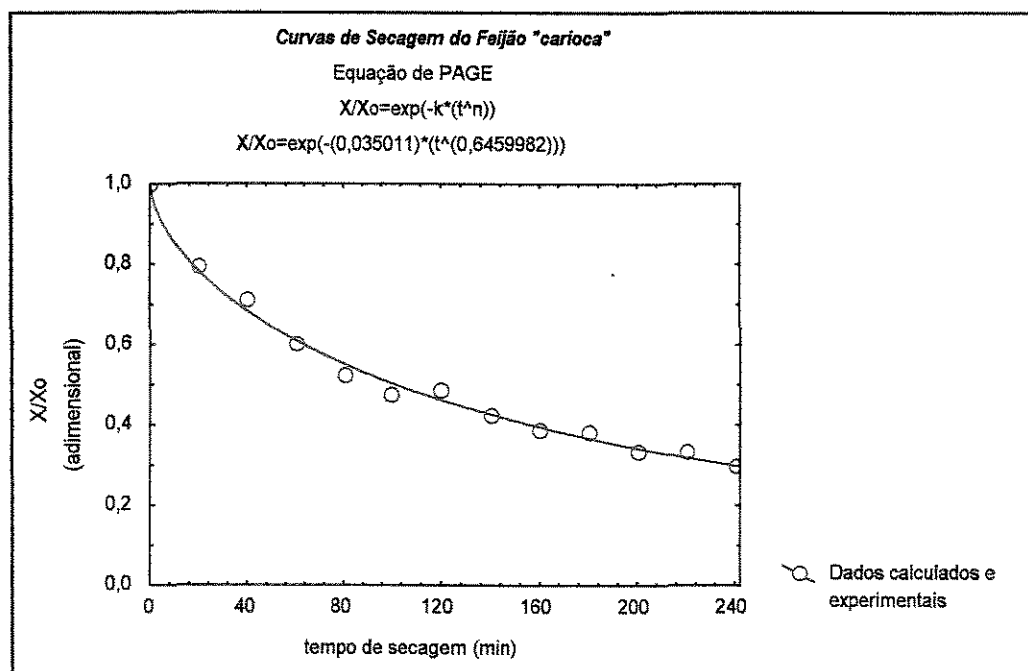


(b)

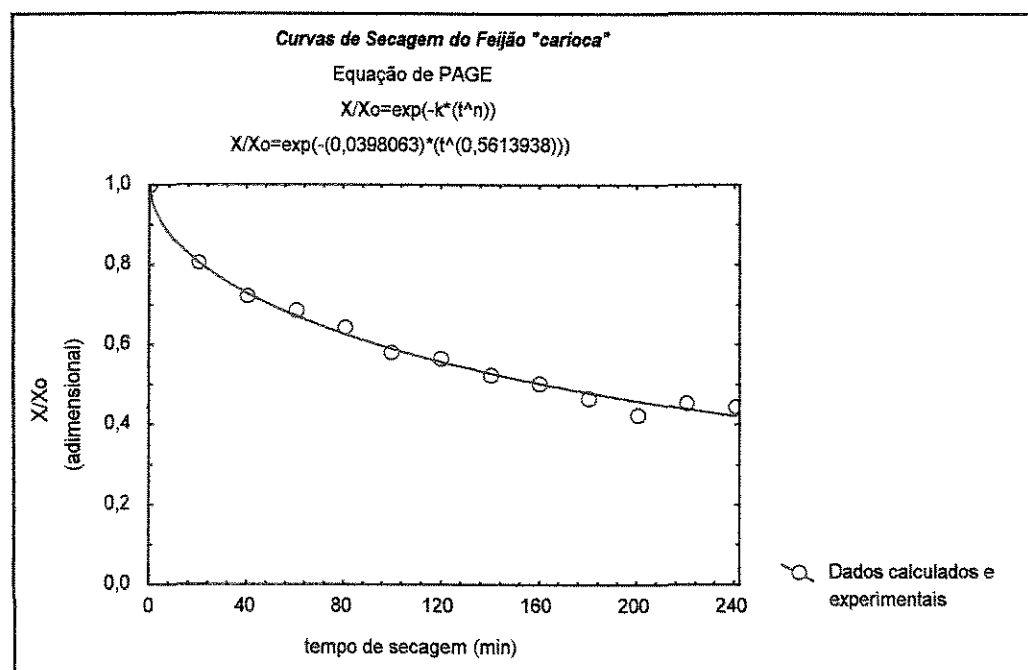
FIGURA 4.48 - Curvas dos dados experimentais dos grãos de feijão “carioca” e calculados pela equação de PAGE, leito de jorro/fixo.

(a) $T_{ar} = 60^{\circ}\text{C}$; $X_o = 30\%$ base seca ; $t_i = 40\text{ min}$

(b) $T_{ar} = 60^{\circ}\text{C}$; $X_o = 20\%$ base seca; $t_i = 40\text{ min}$



(a)

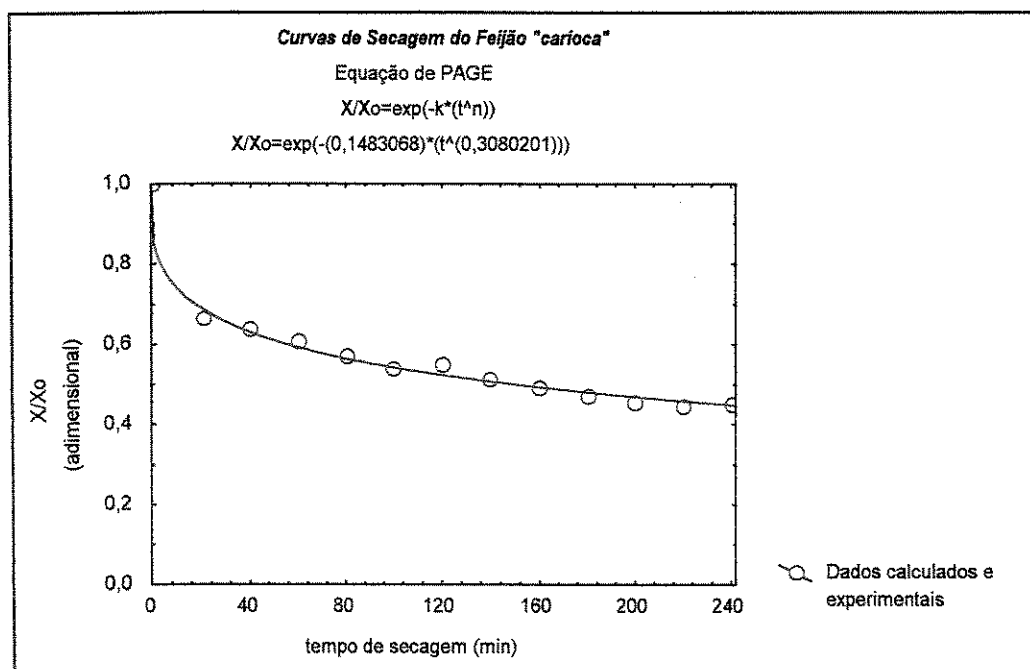


(b)

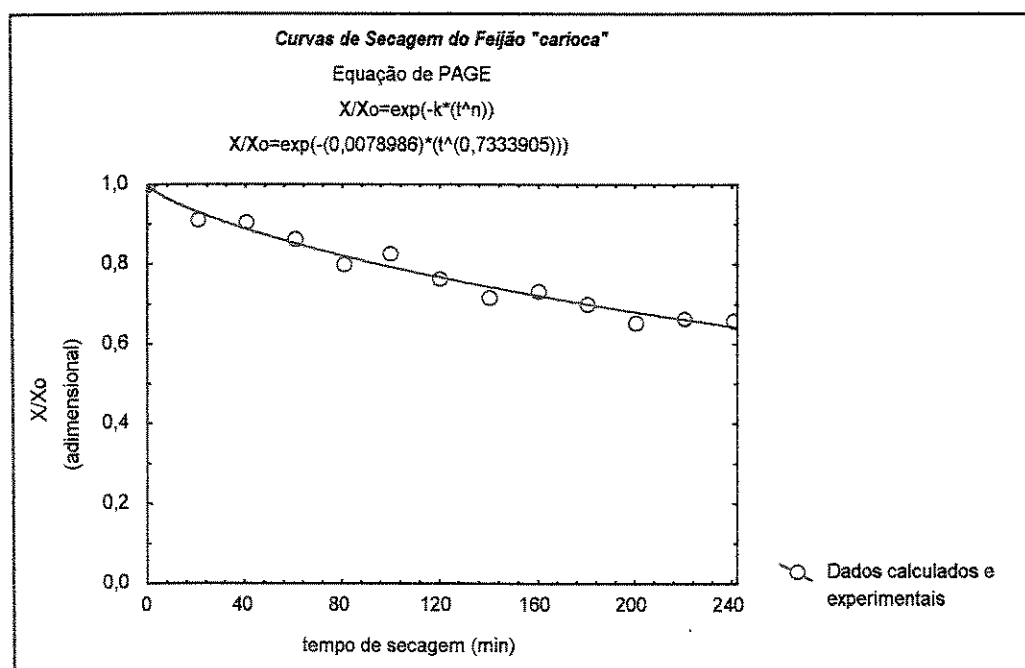
FIGURA 4.49 - Curvas dos dados experimentais dos grãos de feijão “carioca” e calculados pela equação de PAGE, leito de jorro/fixo.

(a) $T_{ar} = 80^{\circ}\text{C}$; $X_o = 30\%$ base seca ; $t_i = 20$ min

(b) $T_{ar} = 80^{\circ}\text{C}$; $X_o = 20\%$ base seca; $t_i = 20$ min



(a)

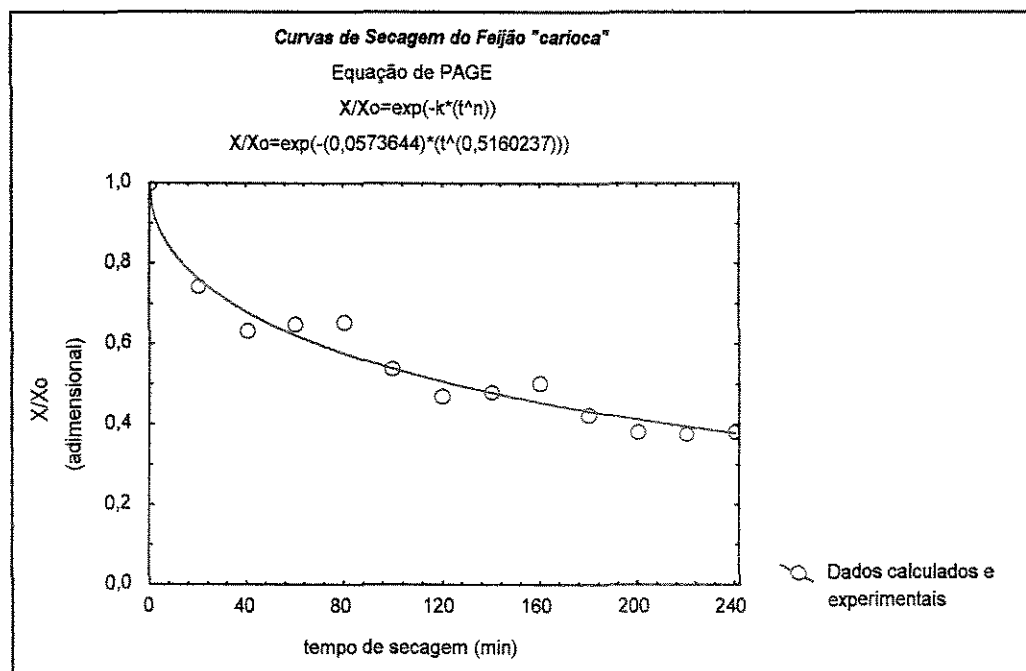


(b)

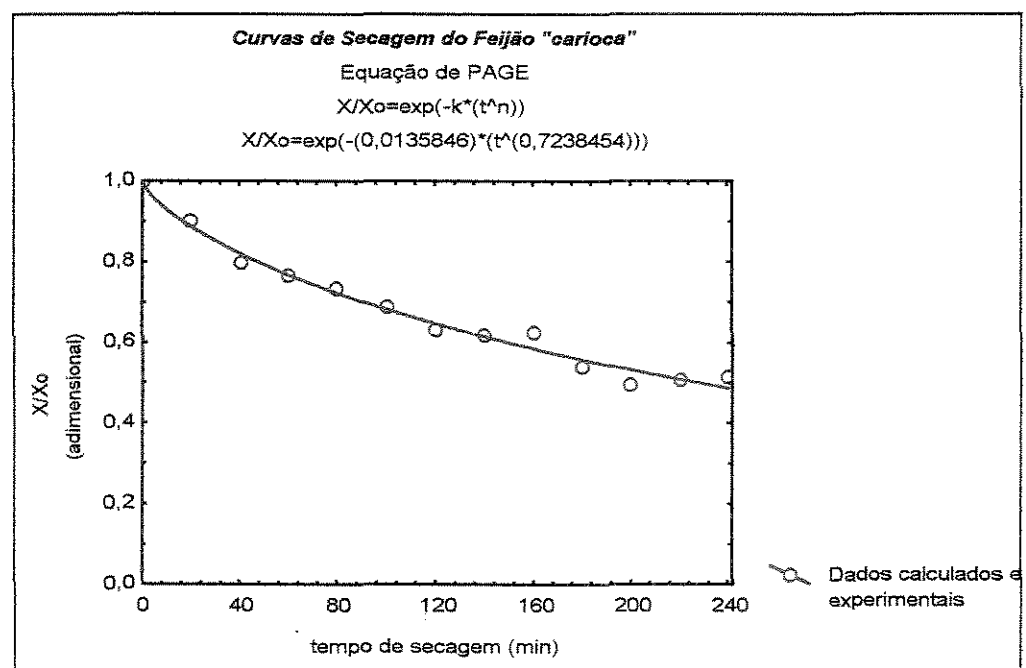
FIGURA 4.50 - Curvas dos dados experimentais dos grãos de feijão "carioca" e calculados pela equação de PAGE, leito de jorro/fixo.

(a) $T_{ar} = 60^{\circ}\text{C}$; $X_o = 30\%$ base seca ; $t_i = 20$ min

(b) $T_{ar} = 60^{\circ}\text{C}$; $X_o = 20\%$ base seca ; $t_i = 20$ min



(a)

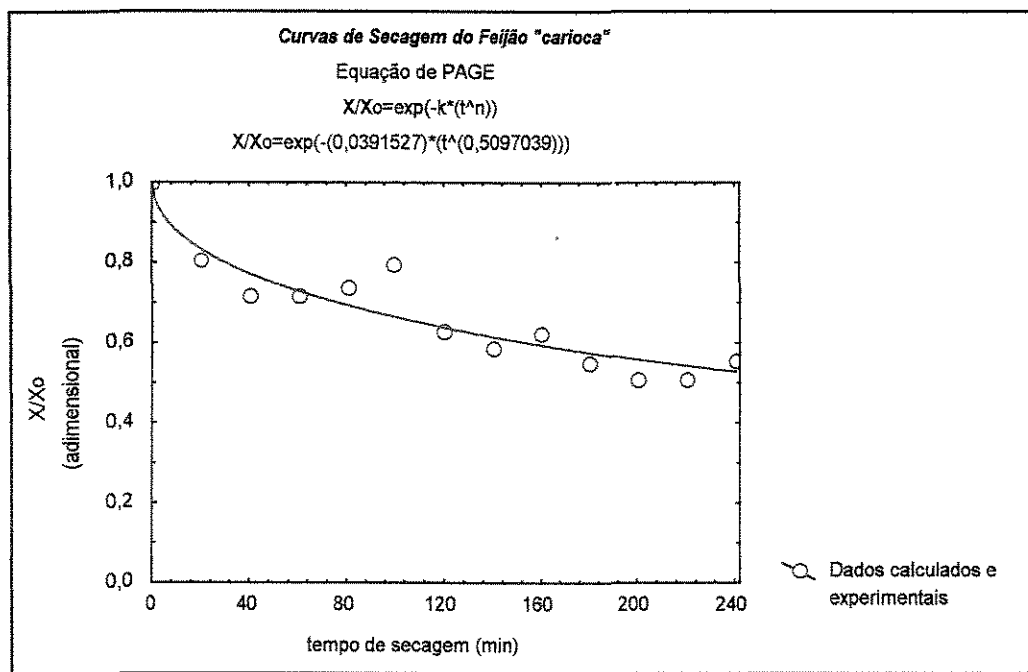


(b)

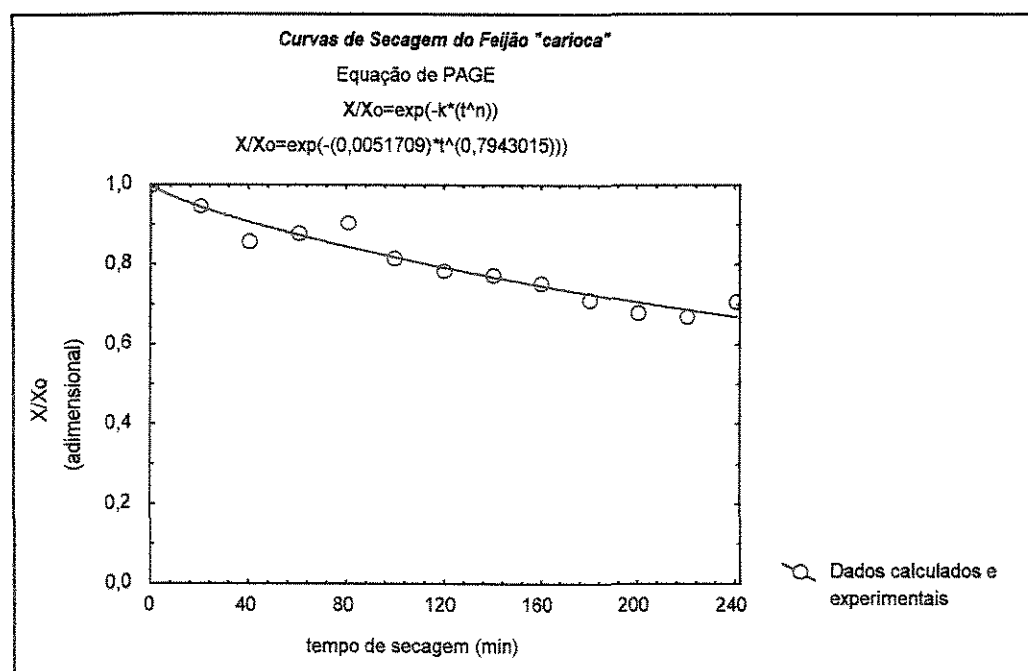
FIGURA 4.51 - Curvas dos dados experimentais dos grãos de feijão "carioca" e calculados pela equação de PAGE, leito de jorro/descanso.

(a) $T_{ar} = 80^{\circ}\text{C}$; $X_o = 30\%$ base seca ; $t_i = 40\text{ min}$

(b) $T_{ar} = 80^{\circ}\text{C}$; $X_o = 20\%$ base seca ; $t_i = 40\text{ min}$



(a)

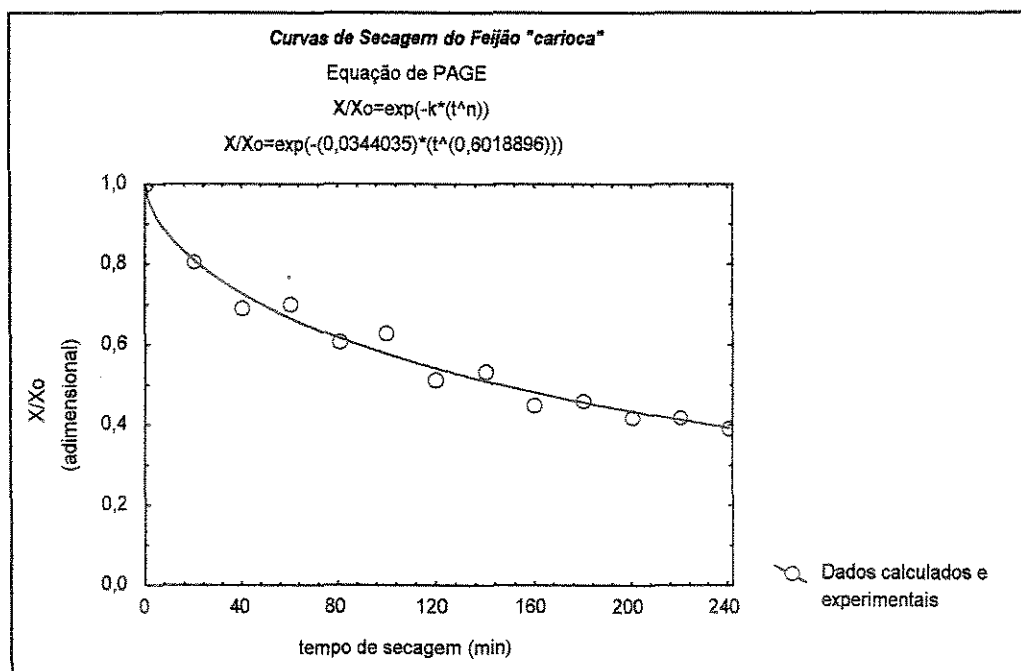


(b)

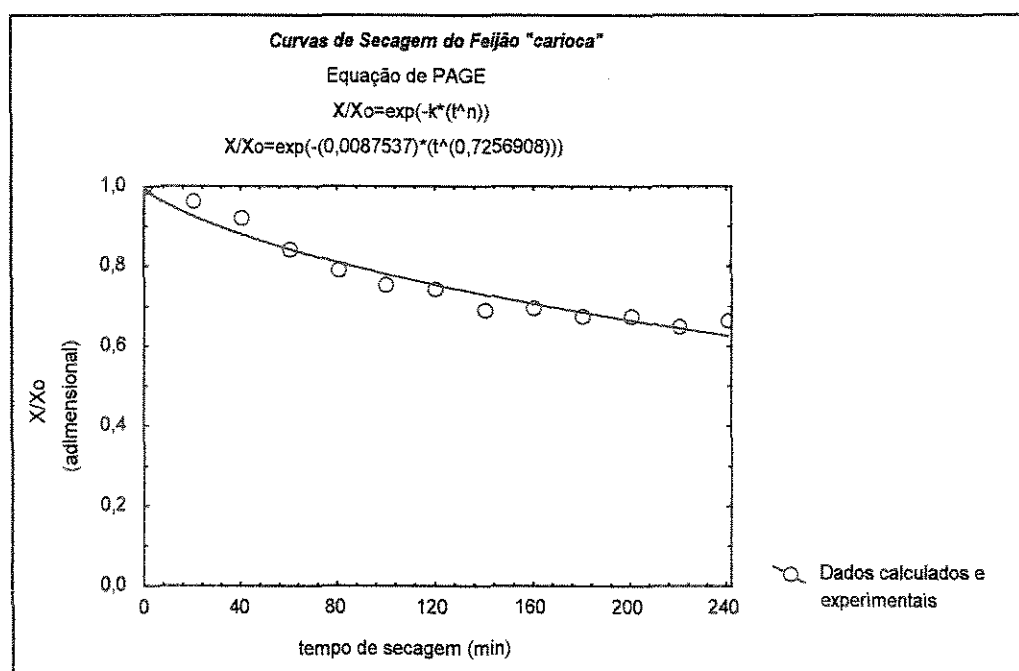
FIGURA 4.52 - Curvas dos dados experimentais dos grãos de feijão "carioca" e calculados pela equação de PAGE, leito de jorro/descanso.

(a) $T_{ar} = 60^{\circ}\text{C}$; $X_o = 30\%$ base seca ; $t_i = 40$ min

(b) $T_{ar} = 60^{\circ}\text{C}$; $X_o = 20\%$ base seca ; $t_i = 40$ min



(a)

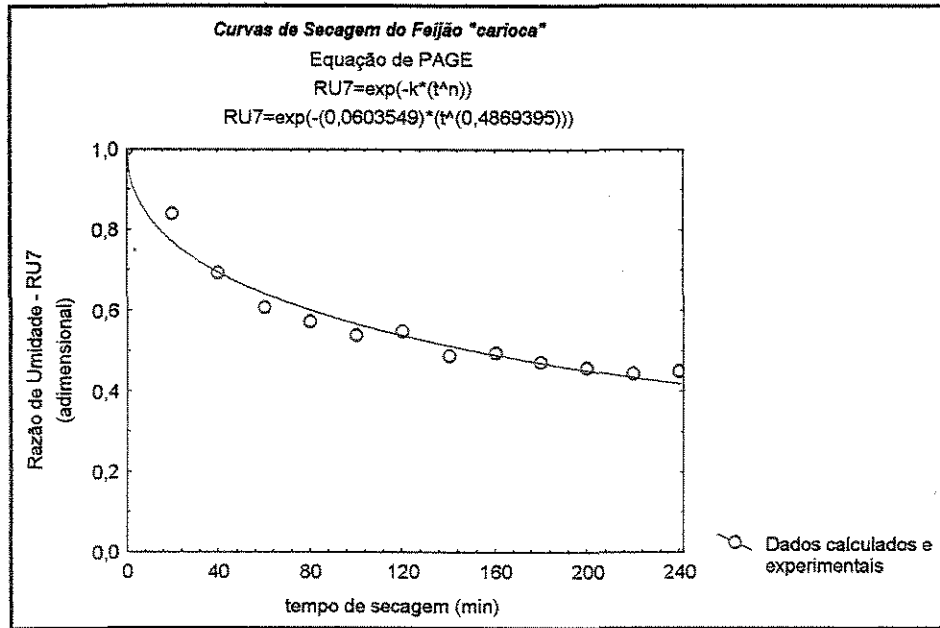


(b)

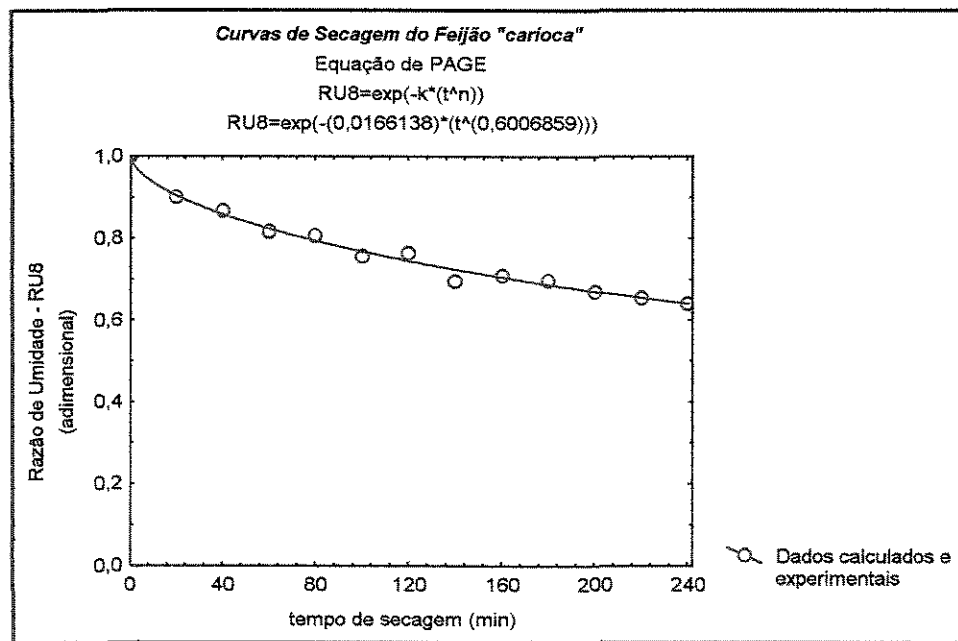
FIGURA 4.53 - Curvas dos dados experimentais dos grãos de feijão "carioca" e calculados pela equação de PAGE, leito de jorro/descanso.

(a) $T_{ar} = 80^{\circ}\text{C}$; $X_o = 20\%$ base seca; $t_i = 20$ min

(b) $T_{ar} = 80^{\circ}\text{C}$; $X_o = 30\%$ base seca ; $t_i = 20$ min



(a)



(b)

FIGURA 4.54 - Curvas dos dados experimentais dos grãos de feijão "carioca" e calculados pela equação de PAGE, leito de jorro/descanso.

(a) $T_{ar} = 60^{\circ}\text{C}$; $X_o = 30\%$ base seca ; $t_i = 20$ min

(b) $T_{ar} = 60^{\circ}\text{C}$; $X_o = 20\%$ base seca ; $t_i = 20$ min

4.8. Comparação entre os tipos de secagem

A comparação entre os tipos de secagem empregados foi feita através da análise dos gráficos das curvas de temperatura do grão, das curvas de secagem e dos coeficientes energéticos.

Os coeficientes energéticos calculados para os regimes de operação realizados com condições operacionais de leito de jorro/fixo e leito de jorro/descanso, apresentaram maiores coeficientes energéticos de secagem (ES, CS e LM), quando confrontados com os mesmos coeficientes calculados para leito de jorro e leito fixo em condições contínuas de operação do ar de secagem. A Tabela 4.17 demonstra esses resultados.

TABELA 4.17-Condições experimentais e eficiência energética da secagem regime de leito de jorro, fornecido por LIMA(1997).

Análise Energética da Secagem							
Ensaio – Leito de Jorro							
T_{ar}	X_0	Massa de grãos (g)	W_{jorro} (Kg/min)	Q_{jorro} (m ³ /min)	ES (%)	CS (kg/kJ)10 ⁵	LM (%)
83	20	3000	2,27	2.45	7,56	1,6	1,04
83	30	3000	2,33	2.52	9,29	2,5	1,66
Ensaio – Leito de Jorro/fixo							
80	30	3200	2.44	2.34	14.81	1.33	3.59
80	20	3200	2.44	2.34	11.83	1.32	3.57
Ensaio – Leito de Jorro/descanso							
80	30	3200	2.44	2.34	21.06	1.98	5.37
80	20	3200	2.44	2.34	17.18	1.72	4.67

Com este resultado, a operação de secagem realizada neste trabalho, se mostrou como uma alternativa para a obtenção de uma maior economia de energia total para o processamento de grãos de feijão “carioca”, e, como se verificou anteriormente, obtendo níveis satisfatórios para as umidades finais dos grãos.

As Figuras 4.55 e 4.57 mostram os dados de temperatura do grão de feijão variedade “carioca”, obtidos pelo processo de secagem em condições intermitentes de leito jorro/descanso e jorro/fixo realizados neste trabalho e os dados de temperatura do grão para operação de secagem em condições operacionais de leito fixo e leito de jorro, obtidos no trabalho de LIMA (1997). Pode-se verificar, claramente que os dados provindos da operação de secagem com condições operacionais intermitentes forneceram menores valores de temperaturas do grão, o que favorece a integridade físico-química e organoléptica do produto.

Os resultados fornecidos por LIMA (1997) para os mesmos critérios de cálculo da eficiência e $T_{ar}=80^{\circ}\text{C}$, $X_0 = 30\%\text{b.s.}$ e massa de grão de 3000g, foi de $ES = 9,29\%$ para secagem realizada em leito de jorro, cerca de 1,6 vezes menor ($ES = 14,81\%$), quando comparada com a secagem feita em condições operacionais intermitentes de leito de jorro/fixo. Comparando os mesmos dados com o experimento II, isto é, regime de leito de jorro/descanso, a diferença atinge cerca de 2,3 vezes menor, o que confere ao experimento II como a melhor condição energética de conduzir a secagem de grãos.

Com relação aos coeficientes de secagem CS e LM, os valores obtidos para esses coeficientes também são maiores para as condições operacionais do experimento II, e quando comparados com os dados fornecidos por LIMA (1997).

Verificou-se também que, dos dois processos de intermitência estudados, o processo de secagem realizado em leito de jorro/descanso apresentou a maior economia de energia (representado nos maiores valores de ES, CS, LM), melhor aparência visual pós secagem (menor quantidade de cascas, separação de cotilédonos), menores temperaturas atingidas pelo tegumento dos grãos (não houve escurecimento do tegumento do grão) e teores de umidade para a faixa experimental dos parâmetros de processo investigadas visando o armazenamento dos grãos.

A comparação dos dados experimentais em relação às curvas de secagem, mostradas nas Figuras 4.56 e 4.58, mostra que o comportamento da cinética é semelhante e o valor da razão de umidade (X_t/X_0) tende para o mesmo valor ao final do processo. Entretanto, esse valor de X_t/X_0 é obtido para um tempo menor de secagem para o processo sem intermitência.

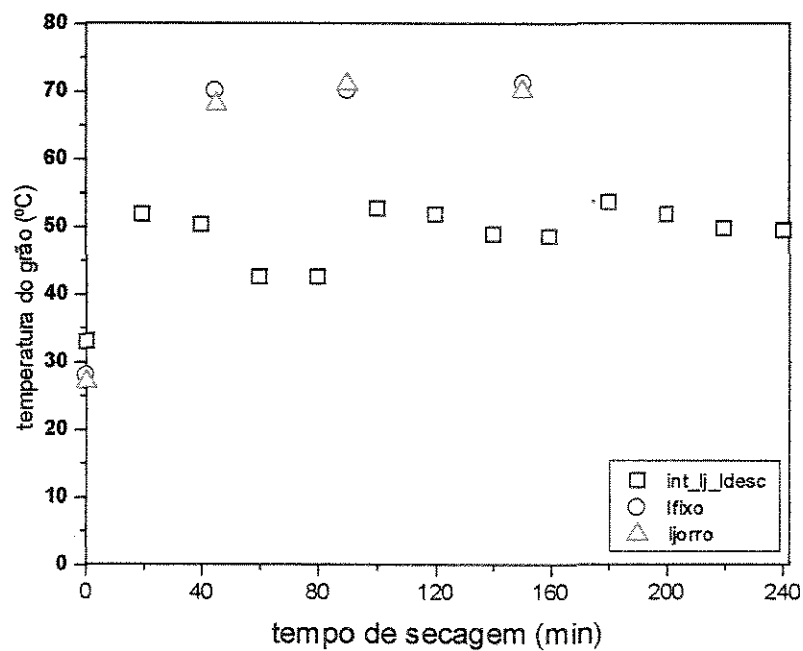


FIGURA 4.55 - Comparação entre tipos de secagem: Leito de Jorro/Descanso - Temperatura do grão

$T_{ar} = 80^{\circ}\text{C}$; $X_0 = 30\%\text{b.s.}$; $t_i = 40\text{min.}$

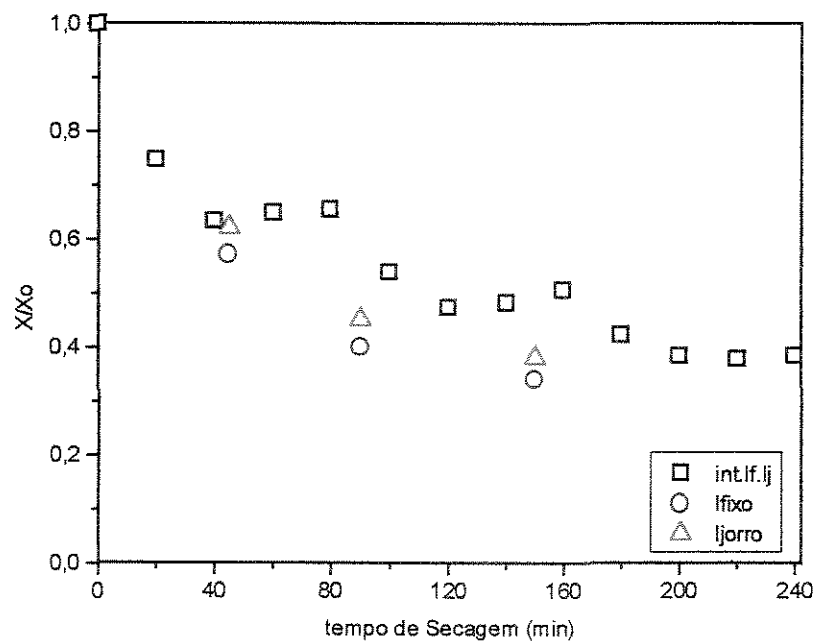


FIGURA 4.56 - Comparação entre tipos de secagem: Leito de Jorro/Descanso - Umidade x tempo de secagem

$T_{ar} = 80^{\circ}\text{C}$; $X_0 = 30\%\text{b.s.}$; $t_i = 40\text{min}$

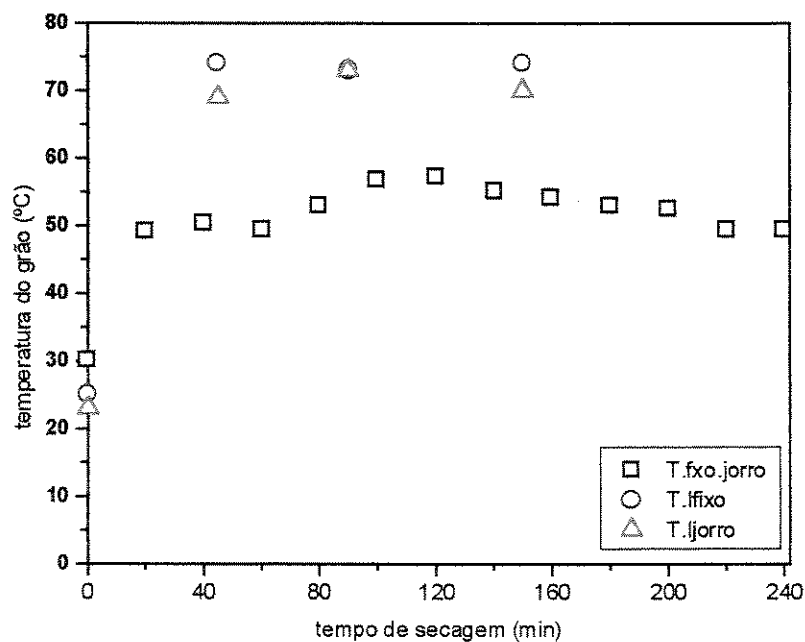


FIGURA 4.57 - Comparação entre tipos de Secagem: Leito de Jorro/fixo - Temperatura do grão

$$T_{ar} = 80^{\circ}\text{C} ; X_0 = 20\%\text{b.s.}; t_i = 40\text{min}$$

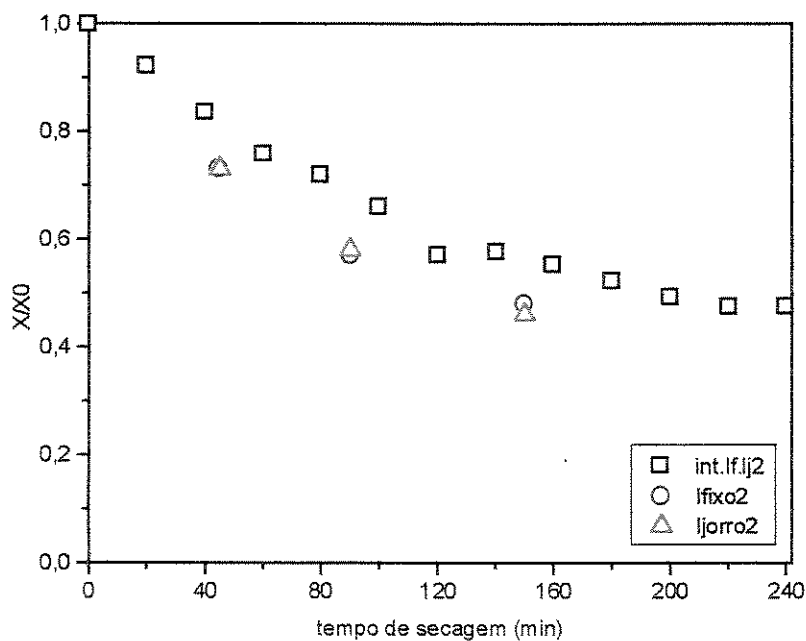


FIGURA 4.58 - Comparação entre tipos de Secagem: Leito de Jorro/fixo - Umidade x tempo de secagem

$$T_{ar} = 80^{\circ}\text{C} ; X_0 = 20\%\text{b.s.}; t_i = 40\text{min}$$

Diante dos resultados obtidos, pode-se verificar que a utilização de critérios energéticos para o estudo do desempenho da secagem variando as condições operacionais dos regimes fluidodinâmicos utilizados neste trabalho, é uma ferramenta muito útil, principalmente no sentido de se obter as melhores condições operacionais de trabalho para o leito secador. Porém em escala de laboratório os valores encontrados para os parâmetros energéticos são muito baixos, fato que se fosse analisado isoladamente resultaria na inviabilização da operação de secagem sob o ponto vista econômico.

A utilização do secador em regime de leito de jorro/leito fixo em escala industrial, apresenta uma vantagem, pois elimina um fato conhecido que é a distribuição heterogênea da umidade e temperatura dos grãos no equipamento. Isto ocorre, devido a utilização do conceito de intermitência aplicado no regime fluidodinâmico, que durante a secagem alterna-se os regimes de leito de jorro e leito fixo uniformizando a temperatura e fluxo de calor no interior do leito de grãos.

A operação da secagem no regime de leito de jorro/descanso alcançou os maiores valores de eficiências de secagem e obteve-se os maiores valores dos coeficientes de secagem. Isto se explica devido ao fato de se utilizar menor quantidade de energia térmica e mecânica durante a secagem. Vale ressaltar que procurou-se trabalhar com valores de vazões mínimas para a manutenção do movimento no leito de jorro.

Para uma escolha e possível implantação destes regimes, torna-se muito importante a análise das vantagens e desvantagens de tais regimes de secagem em relação às características do produto final a que se deseja obter, às facilidades de controle da operação e possibilidades de *'scale-up'*.

5. CONCLUSÕES

Diante dos resultados obtidos neste trabalho sobre secagem em leito de jorro, nas condições operacionais intermitentes utilizadas neste trabalho, de grãos de feijão variedade “carioca”, conclui-se que:

- reumidificador : o projeto do reumidificador se mostrou adequado aos objetivos de realizar a reumidificação em períodos de tempos curtos e sem alterar as características do produto úmido natural.
- a utilização de umidades do grão e temperaturas de secagem no nível superior (30% b.s. e 80 °C, respectivamente), resultaram em maiores taxas de secagem e menores valores de razões de umidades finais nos grãos de feijão.
- A aplicação da intermitência propiciou valores finais de umidade contida nos grãos nos níveis satisfatórios para armazenamento.
- na obtenção e análise dos dados experimentais, a técnica de planejamento fatorial permitiu a verificação quantitativa das influências e interações das variáveis de processo temperatura do ar, umidade inicial da partícula e tempo de intermitência na umidade final do grão e na eficiência energética, bem como, nos coeficientes de secagem CS e LM. Verificou-se para os dois experimentos estudados, que não houve influências significativas dessas variáveis na razão de umidade (RU) e na eficiência energética (ES). Porém, para os coeficientes de secagem CS (regime de leito de jorro/fixo) e LM (regime de jorro/descanso), o tempo de intermitência se mostrou estatisticamente significativo.
- com base nos critérios energéticos, as operações foram dispendiosas, o que já é esperado quando se trata de secagem convectiva. Entretanto, a secagem realizada em condições operacionais intermitentes da fonte de aquecimento e do regime

fluidodinâmico, apresentou um desempenho superior em relação à eficiência de secagem e aos coeficientes energéticos avaliados.

- foram observadas temperaturas menores dos grãos de feijão nos dois tipos de experimentos intermitentes, quando comparadas com leito fixo e leito de jorro, sob fornecimento de ar quente continuamente ao longo de todo o tempo de secagem.
- para a operação a $T_{ar}=60^{\circ}\text{C}$, a temperatura do produto permaneceu abaixo do valor crítico estabelecido para a manutenção da qualidade.
- as operações de secagem realizadas, referentes aos experimentos I e II, apresentaram somente o período de secagem à taxa decrescente.
- com relação à cinética de secagem, o modelo empírico que melhor representou os dados experimentais de secagem em leito de jorro/fixo foi o de Page, com valores acima de 97,26%, embora o modelo da difusão utilizando um termo da série tenha apresentado ajustes que também podem ser considerados satisfatórios.
- o modelo empírico que melhor ajustou-se aos dados experimentais de secagem em leito de jorro/descanso também foi o de Page, com valores acima de 87,84.
- os secadores de leito de jorro operados em condições operacionais intermitentes apresentam potencial para a secagem de grãos de feijão, possibilitando a obtenção de um produto homogêneo, devido ao movimento cíclico do leito de grãos.

5.1. Sugestões para trabalhos futuros

Algumas sugestões para complementar este trabalho são:

- ampliação das faixas operacionais de tempo de intermitência, já que os experimentos realizados indicaram a viabilidade de se utilizar o conceito de intermitência.
- verificação dos efeitos estudados para outros grãos.
- análise sensorial, a fim de verificar possíveis alterações em relação ao potencial de consumo dos grãos, devido às elevadas temperaturas do ar de secagem.
- otimização das variáveis respostas estudadas no processo de secagem (X_f/X_0 , ES, CS e LM) e inclusão de um desumidificador do ar de secagem

Com relação ao ajuste do modelo cinético, apesar de se ter obtido bons valores de ajustes baseados em exponenciais, um estudo mais detalhado na busca de modelos que descrevam também a intermitência seria interessante.

Uma avaliação econômica dos custos de instalação e manutenção do leito de jorro operado em condições intermitentes em pequenas e médias propriedades rurais, torna-se também necessário para viabilizar a obtenção de dados para uma análise econômica, que justificaria ou não emprego destes equipamentos como secadores de grãos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANTUNES, P.L. *Composição e propriedades nutricionais das proteínas do feijão rosinha G2 (Phaseolus vulgaris L)*. Campinas, 1979. 166p. Tese (Doutorado) - Faculdade de Engenharia de Alimentos e Agrícola, Universidade Estadual de Campinas.
- BAKKER-ARKEMA, F.W.; BICKERT, W.G.; PATTERSON, R.J. Simultaneous heat and mass transfer during the cooling of a deep bed of biological products under varying inlet air conditions, *J. agric. Engng. Res.*, v.12, n.4, p.297-307, 1967
- BECKER, H. A., *An investigation of laws governing the spouting of coarse particles*. Chem. Eng. Sci. 13, 245(1961).
- BIMBINET, J.J. Criteria of energetic performance for convection-type dryers, *Drying's 82*, Washington, Hemisphere Publishing Company, p. 121-128, 1982
- BOX, G.E.P., HUNTER, J.H., HUNTER, W.G. *Statistics for experimenters – in Introduction do design, data analysis and model building*, New York, John Wiley & Sons, 1978, 653p
- BROOKER, D.B.; BAKKER-ARKEMA, F.W.; HALL, C.W.; *Drying cereal grains*, The Avi Publishing Company Inc., 1974. 265p.
- BRUNELLO, G.; PECK, R.E.; DELLA NINA, G. *The drying of barley malt in the spouted bed dryer*, Can. J. Chem. Eng, v.52, p.201-205, 1974.
- CAVALCANTI MATA, M. E. R. M., *Efeito da secagem em altas temperaturas por curtos períodos de tempo em camada estacionária, sobre armazenabilidade de sementes de feijão (Phaseolus vulgaris L.) variedade "carioca": avaliação experimental, modelagem e simulação*, Campinas, 1997 . Tese (Doutorado) - Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas.
- CREMASCO, M.A.; MASSARANI, G. *Secador em batelada de leito de jorro para arroz III*. In: MASSARANI, G. Secagem de produtos agrícolas - coletânea de trabalhos 2. Rio de Janeiro, UFRJ, 1987. p.69-76.
- CREMASCO, M.A.; ROCHA, S.C.S.; MASSARANI, G. *Secagem de milho em leito de jorro*. In: Xv Encontro Sobre Escoamento Em Meios Porosos, Uberlândia, 1987. Anais, UFU, Uberlândia, 1987. v.2, p.382-393.

- CURRAY, J.K., *Analysis of sphericity and roundness of quartz grains*. Pensylvania State University, 1951, 56 p. (Thesis M.Sc.)
- ERGUN, S., *Chem. Eng. Prog.*, 48-49 (1952).
- FLEMING, R.J., *The spoutability of particulate solids in air*, M.A.Sc. thesis, Univ. of Toronto, Canada, 1966.
- FREITAS, M.E.A.; PASSOS, M.L. *Estudo da secagem de grãos e sementes em leito de jorro em regime transiente*, In: XXIV CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, Viçosa, 1995. Resumos. Viçosa, UFV, 1995. Res.146
- GELPERIN, N. I., AINSHTEIN, V. G., GELPERIN, E. N., AND L'VOVA, S. D., *Hydrodynamics properties of fluidized granular materials in conical and conical-cylindrical sets*. Khim. Tekhnol. Top. Masel 5, No. 8, 51(1960).
- GOLTSIKER, A.D., *Doctoral dissertation*, Lensovet Technol. Inst., Leningrad, (1967).
- GORSHTEIN, A.E., AND MAKHULENOV, I.P., *On the mechanics of formation of spouting beds*, Zh. Prikl. Khim. (Leningrad) 37, 1887 (1964).
- HUSTRULID, A., FLIKKE, A.M. *Theoretical drying curve for shelled corn*. Transaction of the ASAE, St. Joseph, Michigan. V2, n1, p. 31-34, 1959.
- JORDÃO, B.A.; CARVALHO, G.R.; SARTORI, M.R.; ANGELOUCCI, E.; LEITÃO, M.F.F.; COSTA, S.I.; MIYA, E.E. Armazenamento de feijão de mesa em escala industrial, a granel em silo ventilado artificialmente. Coletânea do ITAL, Campinas, v.7, p 265-298, 1976.
- JUMAH, R.Y. e MUJUNDAR, S.A. *A Mathematical Model for Constant and Intermittent Batch Drying of Grains in a Novel Rotating Jet Spouted Bed*, Drying Technology, v.14, n. 3 e 4, p.765-803, 1996
- KALWAR, M.I.; RAGHAVAN, G.S.V. *Batch drying of shelled corn in two-dimensional spouted beds with draft plates*, Drying Technology, v.11, n.2, p.339-354, 1993.
- KUNII, D., AND LEVENSPIEL, O., *Fluidization Engineering*, Wiley , New York, 1969.
- LAIJOLO, M.F.; GENOVESE, I.M.; MENEZES, W.E. Qualidade Nutricional, Cultura do Feijoeiro Comum no Brasil, coordenado por Ricardo Silva et al, Piracicaba, Potafos, p.23-32, 1996.
- LAMA, R. F., *Pressure drop in spouted beds*. M.Sc. thesis, Univ. of Ottawa, Ottawa, Can., 1957.

- LEFROY, G.A. AND DAVIDSON, J.F., *The mechanics of spouted beds*, Trans. Instn. Chem. Eng. 47, T120-T128 (4969).
- LEVA, M., *Fluidization*, McGraw-Hill, New York, (1959).
- LIMA, A. C.C., *Análise experimental da secagem de feijão em leito fixo, leito de jorro e leito de jorro fluidizado*, Campinas, 1995 . Tese (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas.
- MADONNA, L. A., LAMA, R. F., *Pressure drop in spouted beds*. Ind. Eng. Chem. 52, 169 (1960).
- MALEK, M. A., AND LU, B. C. Y., *Pressure drop and spoutable bed height in spouted beds*. Ind. Eng. Chem. Process Des. Develop. 4, 23(1965).
- MAMURO , T. AND HATTORI, H., *Flow pattern of fluid in spouted beds*, J. Chem. Eng. Japan 1, 1-5 (1968).
- MANURUNG, F., *Studies in the spouted beds technique with particular reference to low temperature coal carbonization*. Ph.D. thesis, Univ. of New South Wales, Kensington, Australia, 1964.
- MASSARANI, G. *Projeto de secadores de leito de jorro para grãos*, In: MASSARANI, G. Secagem de produtos agrícolas - coletânea de trabalhos 2. Rio de Janeiro, UFRJ, 1987. p.129-136.
- MATHUR, K.B.; EPSTEIN, N. *Spouted beds*, New York, Academic Press, 1974. 304 p.
- MATHUR, K.B., AND GISHLER, P. E., *A study of the application of the spouted bed technique to wheat drying*. J. Appl. Chem. 5, 624 (1955).
- MATHUR, K.B.; GISHLER, P.E. *A study of the application of the spouted bed technique to wheat drying*, J. Appl. Chem., v.5, p.624, 1955a apud MATHUR, K.B.; EPSTEIN, N. Spouted beds, New York, Academic Press, 1974. 304 p.
- MATHUR, K.B.; GISHLER, P.E. *A technique for contacting gases with coarse solid particles*, A. I. Ch. E. J., v.1, p.157, 1955b apud MATHUR, K.B.; EPSTEIN, N. Spouted beds, New York, Academic Press, 1974. 304 p.
- MÓLNAR, K. Experimental techniques in drying In: MUJUMDAR, A. S. (ed) Handbook of industrial drying. New York: Marcel Deckker, 1987.
- MOHSEININ, N. N. *Physical properties of plant and animal materials*. New York, Gordon and Breach Science Publishers, 1970. 734p.

- MORAES, J.M. de, *Determinação de parâmetros básicos de feijão carioquinha necessários ao modelamento matemático de secagem em camada espessa*. Campina Grande, PB, Universidade Federal da Paraíba, 1991, 70 p. (Tese de Mestrado)
- MUKHLENOV, I.P. AND GORSHTAIN, A.E., *Investigation of a spouting bed*, Khim. Prom. (Moscow) 41, 443 (1965).
- NELSON, G. L., AND GAY, E., *Spouted bed fluid and particle transport processes for coarse biological materials*. Meeting Amer. Soc. Agr. Eng., Lafayette, 1969, Paper No. 69-371. ASAE, St. Joseph, Michigan.
- OWER, E.; PANKHURST, R.C. *The Mensurement Of Air Flow*, 5th Edition, Pergamon Press, 1977, p 148-183.
- PAGE, C. *Factors influencing the maximum rates of drying shelled corn in layer*. West Lafayette, Department of the Agricultural Engineering. Purdue University, 1949.
- PALLAI, I., AND NÉMETH, J., *Analysis of flow forms in a spouted bed apparatus by the socalled phase diagram*. Int. Congr. Chem. Eng. (CHISA), 3rd, Prague, September 1969, Paper No. C2.4. Czechoslovak Society for Industrial Chemistry.
- PASSOS, M.L.; MUJUMDAR, A.S. ; RAGHAVAN, V.G.S. Spouted and spout-fluidized beds for grain drying, *Drying Technology*, v.7, n.4, p.663-696, 1989
- PETERSON, W.S., *Cem. Div., Nat. Res. Council of Can., Ottawa. Personal communications*, 1969-1972.
- REDDY, K.V.S., *Studies in the spouting of mixed particle size beds*, M.A.Sc. Thesis, Univ. of Brit. Columbia, Vancouver, Can., 1963.
- RICHARDSON, J.F., AND ZAKI W.N., *Sedimentation and fluidization*, Trans. Inst. Chem. Eng. 32, 35 (1954).
- SARTORI, R.M. *Armazenamento*, Cultura do Feijoeiro Comum no Brasil, coordenado por Ricardo Silva et al, Piracicaba, *Potafos*, p.543-558, 1996.
- SHERWOOD, T.K. *The Drying of Solids II. Industrial and Engineering Chemistry*, vol 22, nº10, 976-980. Oct. 1929.
- SILVA, G.F. *Processamento de urucum em leito de jorro*, Campina Grande, 1991, 138p., Dissertação (Mestrado). Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba.

- STRUMILLO, C. and KUDRA, T. *Drying : principles, applications and design* / by C. Strumillo and T.Kudra. New York : Gordon and Breach, c1986.
- THORLEY, B., SAUNBY, J.B., MATHUR, K.B., AND OSBERG, G.L., *An analysis of air and solid flow in a spouted wheat bed*, Can. J. Chem. Eng. 37-184 (1959).AM. SOC. AGRL. ENGRS. ASAE 1982 Agricultural engineers yearbook,. St. Joseph, apud.
- THU,V.P.; CHATTOPADHYAY,P.K. Prediction of heat of vaporization of moisture from cereal grains - a modelling approach, Drying Technology, v.11 n.7, p.1855-1862, 1993
- VAINBERG, YU. P., *Granulation of medicinal preparations in multistage continuously operated conical fluidized beds*, Dissertation Abstract, Moscow Inst. of Fine Chem. Technol., 1968 (in Russian).
- VIEIRA, B.M., et al., *Produção de grãos de feijão*, Cultura do Feijoeiro Comum no Brasil, coordenado por Ricardo Silva et al, Piracicaba,Potafos, 1996.
- VISWANATHAN,K.; LYALL,M.S.; RAYCHAUDHURI,B.C. *Spouted bed drying of agricultural grains*, Can. J. Chem. Eng, v.64, p.223-232, 1986
- VOLPICELLI, G., RASO, G., AND MASSIMILIA, L., *Gas and solid flow in bidimensional spouted beds*. Proc. Eindhoven Fluidizn. Symp., 1967, p. 123. Netherlands Univ. Press, Amsterdam.
- WEN, C.Y., AND YU, Y.H., *A generalized method for predicting the minimum fluidization velocity*, *A.I.Ch.E.J.* 12, 610 (1966).
- YOKOYAMA, P.L.; BANNO, K. e KLUTHCOUSKI, J. *Aspectos Socioeconômicos da Cultura*, Cultura do Feijoeiro Comum no Brasil, coordenado por Ricardo Silva et al, Piracicaba,Potafos, p.1-20, 1996.
- ZHANG,D e MUJUMDAR, S.A. *Deformation and Stress Analysis of Porous Capillary Bodies During Intermittent Volumetric Thermal Drying*, , Drying Tecnology, v.10, n. 2, p.421-443, 1992.
- ZHANG,Q e LITCHFIELD,J.B. *Optimization of Intermittent Corn Drying in a Laboratory Scale Thin Layer Dryer*, , Drying Tecnology, v.9, n. 2, p.383-395, 1991
- ZIMMERMANN, O.J.M. e TEIXEIRA, G.M. *Origem e Evolução*, , Cultura do Feijoeiro Comum no Brasil, coordenado por Ricardo Silva et al, Piracicaba,Potafos, p.57-68, 1996.