

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

Dissertação de Mestrado

Parecer

Este exemplar corresponde a redação final da
Dissertação de Mestrado defendida por Antônio Carlos Lima
Nogueira e aprovada pela Comissão Julgadora em 19 de mar-
ço de 1991.

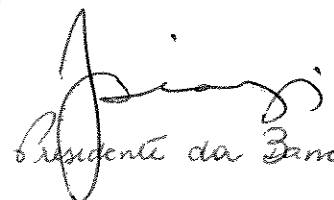
Campinas, 08 de agosto de 1991

AVALIAÇÃO DE SECAGEM DE ARROZ (*Oryza sativa* L.)

POR FLUXO CRUZADO EM ESCALA DE LABORATÓRIO

Antônio Carlos Lima Nogueira

Engenheiro Agrícola


Presidente da Bm

Orientador: Prof. Dr. João Domingos Biagi

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

AVALIAÇÃO DE SECAGEM DE ARROZ (*Oryza sativa* L.)
POR FLUXO CRUZADO EM ESCALA DE LABORATÓRIO

Antonio Carlos Lima Nogueira
Engenheiro Agrícola

Orientador: Prof. Dr. João Domingos Biagi ñ

Dissertação apresentada como
parte dos requisitos para a
obtenção do título de Mestre
em Engenharia Agrícola.

Campinas
- Março de 1991 -

2-9108195

A meus pais

Silvio e Leodyr

AGRADECIMENTOS

- Ao Prof. Dr. João Domingos Biagi, pelo apoio e incentivo durante a realização do trabalho.
- À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Ensino Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de Mestrado.
- À Faculdade de Engenharia Agrícola, pelos recursos materiais e pela concessão da bolsa de Incentivo Acadêmico.
- Aos professores Kil Jil Park, Sylvio Luis Honório e Cláudio Bianor Sverzut pela ajuda durante o desenvolvimento do trabalho.
- Aos funcionários da Faculdade de Engenharia Agrícola: Rosa Helena Aguiar da Fonseca, Clóvis Tristão, Célia Tereza Bonatto Lessa, Dagoberto Favoretto Júnior, Francisco Ferreira de Oliveira, Vânia Aparecida Bellodi Sant'Ana Furlan, Dércio Tabossi, José Maria da Silva, Luís Carlos dos Santos Silva, Roberto Carlos de Souza, Kellen Maria Junqueira e Ana Paula Montagner, pela colaboração em várias fases do trabalho.
- Ao Depto. de Construções Rurais pelo uso da câmara fria.
- Ao GEPRON, da Faculdade de Engenharia Mecânica, pelo empréstimo do variador de tensão.
- À Empresa MACHINA DANDREA, pela doação do elevador de canecas.

SUMÁRIO

Lista de Figuras	viii
Lista de tabelas	x
Resumo	xi
Abstract	xiii
1. INTRODUÇÃO	01
2. OBJETIVOS	04
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	05
3.1. Princípios gerais de secagem	05
3.2. Sistemas de secagem	08
3.3. Desempenho de sistemas de secagem	10
3.3.1. Capacidade	11
3.3.2. Consumo específico de energia.....	12
3.3.3. Qualidade do grão	17
3.4. Tipos de secadores	22
3.4.1. Secadores de camada fixa ..	22
3.4.2. Secadores contínuos	24
3.5. Secadores de fluxo cruzado	27
3.5.1. Características ..	27

3.5.2. Variação da espessura de coluna	27
3.5.3. Reversão de fluxo de ar	30
3.5.4. Reciclagem de ar	31
3.5.5. Tempo de repouso	33
3.6. Resumo da Revisão Bibliográfica	35
4. MATERIAL E MÉTODOS	37
4.1. Material	37
4.1.1. Secador	37
4.1.1.1. Câmara de secagem	37
4.1.1.2. Sistema de circulação e aquecimento do ar	39
4.1.1.3. Elevador de canecas	41
4.1.1.4. Silo alimentador	41
4.1.2. Aparelhos de medição e equipamentos auxiliares	42
4.2. Produto	43
4.3. Método	44
4.3.1. Tipos de testes	44
4.3.2. Obtenção de dados	47
4.3.2.1. Temperatura	47
4.3.2.2. Vazão de ar	49
4.3.2.3. Umidade do produto	49
4.3.2.4. Consumo de energia	50
4.3.2.5. Renda e rendimento do produto	50
4.3.3. Operação	50
4.3.4. Tratamento dos dados experimentais	52

4.3.4.1. Uniformidade de secagem	52
4.3.4.2. Taxa de secagem	52
4.3.4.3. Eficiência energética	53
4.3.4.4. Qualidade do produto final	54
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	55
5.1. Considerações gerais	55
5.2. Espessura de coluna	56
5.2.1. Uniformidade de secagem	61
5.2.2. Taxa de secagem	63
5.2.3. Eficiência energética	65
5.2.4. Qualidade do produto final	66
5.2.5. Resumo de espessura de coluna.....	67
5.3. Reversão de fluxo	68
5.3.1. Uniformidade de secagem	68
5.3.2. Taxa de secagem	71
5.3.3. Eficiência energética	71
5.3.4. Qualidade do produto final	72
5.3.5. Resumo de reversão de fluxo	72
5.4. Reciclagem de ar	75
5.4.1. Uniformidade de secagem	75
5.4.2. Taxa de secagem	76
5.4.3. Eficiência energética	76
5.4.4. Qualidade do produto final	77
5.4.5. Resumo de reciclagem de ar.....	77
5.5. Tempo de repouso	78
5.5.1. Uniformidade de secagem	78

5.5.2. Taxa de secagem	78
5.5.3. Eficiência energética	79
5.5.4. Qualidade do produto final	79
5.5.5. Resumo de tempo de repouso	79
6. CONCLUSÕES	81
7. BIBLIOGRAFIA	83
8. APÊNDICES	89
Apêndice A	90
Apêndice B	103

LISTA DE FIGURAS

Fig. nº	Assunto	Página
3.1	Tipos de secadores contínuos básicos. (A) Concorrente, (B) Contracorrente e (C) Cruzado	25
4.1	Esquema do sistema completo de secagem	38
4.2	Esquema dos tipos de configurações adotadas pelo secador	45
4.3	Esquema da câmara de secagem com as posições das tomadas de amostras e temperatura	48
5.1	Umidade do produto (% BU) durante o Teste 2 (padrão de 20 cm de espessura de coluna)	57
5.2	Temperatura (°C) do produto e do ar de entrada e saída no Teste 2 (padrão de 20 cm de espessura)	58

5.3	Umidade do produto (% BU) durante o Teste 10 (padrão de 10 cm de espessura)	59
5.4	Temperatura (°C) do produto e do ar de entrada e saída no Teste 10 (padrão de 10 cm de espessura)	60
5.5	Umidade do produto (% BU) durante o Teste 12 (10 cm, reversão, sem recic. e sem t. repouso)	69
5.6	Temperatura (°C) do produto e do ar de entrada e saída no Teste 12 (10 cm, reversão, sem recic. e sem t. repouso)	70
5.7	Gráficos de umidade do produto (% BU) durante o Teste 06 (20 cm, sem rev., recic. de 56/44 e sem t. repouso)	73
5.8	Temperatura (°C) do produto e do ar de entrada e saída no Teste 12 (20 cm, sem rev., recic. de 56/44 e sem t. repouso)	74

LISTA DE TABELAS

Tabela n°	Assunto	Página
4.1	Condições experimentais dos testes	46
5.1	Tipos de testes e condições ambientais	56
5.2	Gradiente de umidade na coluna de secagem	61
5.3	Taxa de secagem e consumo específico de energia dos testes realizados	63
5.4	Qualidade do produto final após os testes realizados	66

RESUMO

Os secadores de fluxo cruzado são bastante utilizados pela sua simplicidade de construção, mas realizam uma secagem pouco uniforme e de baixa eficiência energética. A secagem pouco uniforme do arroz pode provocar diminuição no rendimento de grãos inteiros após o beneficiamento. Os objetivos do trabalho foram avaliar o efeito das alterações de projeto e operação (espessura de coluna, reversão de fluxo de ar, reciclagem de ar e tempo de repouso) em um secador de fluxo cruzado de dois estágios, construído em escala de laboratório. A avaliação foi feita a partir do gradiente de umidade na coluna, taxa de secagem, consumo específico de energia e rendimento de grãos inteiros. A secagem foi efetuada com temperatura média de 45,4 °C, fluxo de ar de 15,52 m³/min.m², fluxo de grãos de 600 kg/h, espessuras de 20 e 10 cm para a coluna de grãos e taxas de reciclagem entre 60/40 e 40/60 (ar ambiente/ar reciclado). A diminuição de 20 para 10 cm na espessura de coluna não apresentou resultados satisfatórios quanto à configuração padrão, foi equivalente quanto à reciclagem e apresentou melhores resultados quanto à reversão de fluxo. A reversão

de fluxo apresentou melhores resultados para a espessura de 10 cm e não para a de 20 cm, em relação à configuração padrão. A reciclagem de ar no segundo estágio a níveis entre 60/40 a 40/60 produz melhores resultados para as espessuras de 20 e 10 cm em relação à configuração padrão. A melhor configuração foi com espessura de 10 cm, sem reversão, reciclagem de 54/46 e sem tempo de repouso. Esta configuração produziu um gradiente de umidade de 0,51% BS, taxa de secagem de 3,02 g de água ret./h, consumo específico de energia de 3,25 MJ/kg de água ret. e rendimento de grãos inteiros de 55,94 baseado em renda padrão de 68%.

ABSTRACT

The crossflow driers are widely used for its simple design and construction, but it produces a high moisture content gradient in the drying column and a low energy efficiency. A uneven rice drying may cause a decrease in the head yeald. The objective of this study was to evaluate the effects of some changes in design and operation (column thickness, reversal of airflow, air recicling and tempering time) of a laboratory scale crossflow dryer. The evaluation was based in moisture content gradient, drying rate, specific waste of energy and head yeald. The drying air temperature was 45,4 °C, the airflow rate 15,52 m³/min.m², the grain flow rate 600 kg/h, column thickness 20 and 10 cm, air recycling ratio from 60/40 to 40/60 (ambient/recycled). For the standard configuration, the thickness column of 20 cm showed to be better than 10 cm. For the air recycling configuration, the drier had almost the same performance with both thickness column (20 and 10 cm). The thickness column of 10 cm showed to be better than 20 cm for the reverse airflow configuration. The airflow reverse configuration showed better results than the standard

configuration for the 10 cm thickness column, but not for the 20 cm thickness. The air recycling from 60/40 to 40/60 showed to be better than standard configuration for 20 and 10 cm thickness column. The best configuration for this dryer was a 10 cm thickness column, no airflow reverse, 54/46 air recycling ratio and no tempering time. This configuration produced a moisture gradient of 0,51% BS, a drying rate of 3,02 kg water removed/h , a specific energy waste of 3,25 MJ/kg of water removed and a head yeald of 55,94% for a standart total yeald of 68%.

1. INTRODUÇÃO

A agricultura brasileira apresenta algumas distorções históricas quanto à sua estrutura de produção. Podemos citar a alta concentração fundiária, a falta de políticas de longo prazo, o descaso quanto aos impactos ambientais de suas operações e a descapitalização dos pequenos produtores. Esta última característica é responsável pela falta de infraestrutura de armazenagem a nível de produtor.

Apesar dos problemas citados acima este setor tem conseguido produzir safras razoáveis, que atendem às necessidades internas de consumo e permitem pequena exportação de excedentes. Um exemplo foi a safra de 1986/87, que atingiu 64 milhões de toneladas de grãos (BANESPA, 1988). Este volume de produção manteve-se estável, durante a segunda metade da década de 80. Sabe-se que existe potencial para aumentar muito este valor.

A conjugação entre a capacidade de produção citada e a falta de infraestrutura de armazenagem a nível de produtor resulta em um elevado nível de perdas de produto e favorece grandes oscilações de preços. Essas consequências representam prejuízos para a economia do País.

Pela evidente necessidade do aumento da estrutura de armazenagem, percebe-se que todo um sistema de pré-

-processamento deve ser incrementado paralelamente. Este sistema inclui a pré-limpeza, a secagem e o beneficiamento. Dentre estas operações, a secagem é a mais intensiva em aplicação de energia. Por outro lado, representa o meio mais eficiente e barato de condicionar o produto para ser armazenado por longos períodos. Baseia-se no abaixamento do conteúdo de umidade do produto para evitar o aparecimento de fungos e insetos durante a armazenagem. Por essa relação com a armazenagem, é importante o estudo de métodos eficientes de secagem de grãos.

Dentre as culturas anuais do Brasil, o arroz tem grande importância, pois faz parte da dieta básica da maioria da população. Segundo o IBGE (1987), em 1986 o Brasil produziu 10.404.676 toneladas de arroz com uma produtividade média de 1.861 kg/ha. O Rio Grande do Sul produziu 2.987.503 ton com uma produtividade de 4.110 kg/ha, colocando-se como o Estado líder na produção de arroz (29% da produção nacional). Segundo o Guia Rural Abril (1987), os níveis de produtividade obtidos no Brasil (mesmo no RS) estão abaixo dos obtidos em países como a Espanha e Austrália, que chegam a 6.000 kg/ha. A liderança do RS na produção de arroz deve-se às condições de topografia, clima e solo, aliadas ao uso intensivo de insumos modernos como máquinas, irrigação e fertilizantes. A cultura do arroz neste Estado possui um grau de mecanização de 98% (Instituto Riograndense do Arroz, 1983).

A secagem do arroz no Brasil varia conforme a região. Os métodos usados são a secagem natural em camadas e a

secagem artificial. Para evitar quebras e o gessamento durante o beneficiamento, são feitos alguns tratamentos, como a atapa e a maceração. O tratamento mais simples são a atapa, originário do sudoeste da Ásia. Os grãos são encharcados à temperatura ambiente por 24 horas e depois secados ao sol. Em Santa Catarina o método mais utilizado é a maceração, que consiste em colocar os grãos em imersão à temperatura ambiente por 48 a 72 horas. Estando inchados a ponto de iniciar a germinação os grãos são submetidos à secagem rápida, com temperaturas entre 120 °C e 150 °C (Guia Rural Abril, 1988).

No RS consome-se lenha para a secagem artificial do arroz em secadores de fluxo cruzado. Em 1982, este consumo chegou a 6.086 ton. equivalentes de petróleo (TEP), enquanto o consumo total para secagem de grãos foi de 19.864 TEP, (CENERGS, 1984). Dadas as condições em que o arroz é produzido neste Estado, com alto grau de mecanização e consumo significativo de energia em secagem, justifica-se o estudo do processo de secagem artificial de arroz. O secador de fluxo cruzado é um tipo de equipamento bastante comum pela sua facilidade de construção. Entretanto, este tipo de secador apresenta pequena eficiência energética e promove secagem pouco uniforme, que pode afetar a qualidade do produto final. Por isso é importante o estudo de modificações neste tipo de secador com a finalidade de melhorar a eficiência energética do processo e melhorar a qualidade do produto final.

2. OBJETIVOS

O objetivo geral do trabalho é estudar a secagem de arroz por fluxo cruzado através de um secador em escala de laboratório. Pretende-se atingir este objetivo pela análise das seguintes alterações de projeto e operação neste secador, que constituem os objetivos específicos:

- Espessura de coluna e seu efeito na uniformidade de secagem, taxa de secagem, eficiência energética e qualidade do produto final.

- Reversão de fluxo e seu efeito na uniformidade de secagem, taxa de secagem, eficiência energética e qualidade do produto final.

- Reciclagem de ar e seu efeito na uniformidade de secagem, taxa de secagem, eficiência energética e qualidade do produto final.

- Tempo de repouso e seu efeito na uniformidade de secagem, taxa de secagem, eficiência energética e qualidade do produto final.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão abordados os temas pertinentes ao estudo da secagem de arroz em secadores de fluxo cruzado. Após uma introdução aos princípios gerais de secagem de produtos biológicos, são apresentados os diferentes sistemas de secagem e os parâmetros utilizados para a avaliação destes sistemas. Em seguida apresentam-se os diversos tipos de secadores e a influência de algumas alterações de projeto sobre o desempenho de secadores de fluxo cruzado.

3.1. Princípios gerais de secagem

A secagem é a separação de um líquido contido em um sólido por meios de transferência de calor. Trata-se de um processo simultâneo de transferência de calor e massa. PORTER *et al.* (1984), tratando da secagem de sólidos em geral, apresentaram uma revisão das bases teóricas deste processo. Segundo estes autores, o estudo da secagem em sólidos pode ser baseado nos mecanismos internos de fluxo de líquido ou nos efeitos das condições externas como temperatura, fluxo de ar sobre a taxa de secagem dos

sólidos. O primeiro procedimento geralmente requer um estudo aprofundado da condição interna. O segundo procedimento, ainda que seja menos aprofundado, é mais usado porque os resultados têm aplicação imediata em projetos e avaliações de equipamentos.

Ainda segundo estes autores, a estrutura do sólido determina o mecanismo pelo qual pode ocorrer o fluxo líquido dentro do material. Os mecanismos são o fluxo líquido por capilaridade, a difusão líquida e a difusão de vapor. A seguir são apresentados os fundamentos de cada mecanismo e as principais condições externas que influem na secagem.

Fluxo capilar: A umidade que é contida nos interstícios de sólidos, como líquido sobre a superfície ou como umidade livre nas cavidades celulares move-se por gravidade e capilaridade, desde que existam passagens para os fluxos contínuos. Na secagem o fluxo líquido resultante de capilaridade ocorre para umidades acima do ponto de saturação das fibras para têxteis, papel e couro e valores acima da umidade de equilíbrio em ambientes com saturação atmosférica em granulados e poeira fina.

Difusão de vapor: A difusão de vapor é provocada por gradiente de pressão de vapor resultante de gradiente de temperatura. Este processo pode ocorrer em sólidos contínuos submetidos a aquecimento em somente uma superfície e quando o líquido está isolado entre grânulos de sólidos.

Difusão líquida: Este processo está restrito a umidades de equilíbrio abaixo do ponto de saturação atmosférica e a

sistemas nos quais os sólidos são solúveis. A primeira categoria se aplica aos últimos estágios de secagem de argila, farelos e papel; a segunda categoria inclui a secagem de sabão, colas e pastas.

Condições externas: As principais variáveis externas envolvidas em qualquer estudo de secagem são: temperatura, umidade e fluxo de ar, estado de subdivisão do sólido, método de manuseio e formas de aquecimento do sólido.

Os grãos são considerados materiais porosos e higroscópicos. Para os grãos o objetivo da secagem é o abaixamento do conteúdo de umidade para permitir a armazenagem por períodos longos sem a ocorrência de fungos. É necessário fornecer calor ao grão para evaporar a umidade que será removida da superfície através de convecção pelo meio de secagem, geralmente o ar. Pode-se realizar a secagem por meios naturais (exposição do produto ao ambiente com aquecimento solar) ou artificiais (convecção forçada pela circulação de ar aquecido).

Segundo BROOKER et al. (1974) a secagem de produtos biológicos sob condições externas constantes, considerados como partículas individuais, apresenta duas fases distintas. Uma fase inicial com perda de umidade a taxa constante, seguida de uma segunda fase em que a taxa de secagem é decrescente. Entretanto, dentro das faixas de umidade em que os grãos geralmente são tratados, estes produtos apresentam somente a fase de taxa de secagem decrescente.

Ainda segundo BROOKER et al. (1974), na fase de taxa

de secagem decrescente de grãos deve-se considerar não somente os mecanismos externos de transferência (calor e massa transferidos por convecção), mas também os mecanismos internos ao grão. Têm sido propostas algumas teorias sobre os mecanismos responsáveis pelo movimento da umidade dentro do grão. São elas:

- Movimento de líquido devido a forças de superfície (capilaridade).
- Movimento de líquido devido a diferenças de concentração de umidade (difusão líquida).
- Movimento de líquido devido à difusão da umidade pela superfície dos poros (difusão de superfície).
- Movimento de vapor devido a diferenças de concentração de umidade (difusão de vapor).
- Movimento de vapor devido a diferenças de temperatura (difusão térmica).
- Movimento de líquido e vapor devido a diferenças de pressão total (fluxo hidrodinâmico).

As considerações acima são relativas ao comportamento dos grãos individualmente ou em camadas finas. Entretanto, nos sistemas de secagem os grãos são tratados em camadas espessas, podendo ser fixas ou em movimento. O próximo item trata do estudo da secagem de camadas espessas de grãos.

3.2. Sistemas de secagem

Os sistemas de secagem dividem-se em dois grandes

grupos: a secagem natural e artificial. A secagem natural consiste em expor o produto às condições ambientais, geralmente com a incidência direta de radiação solar. Estes sistemas fornecem ar a baixa temperatura, o que provoca um aumento do tempo de operação, e dependem das condições climáticas para a realização da secagem.

A secagem artificial consiste em condicionar o ar que será utilizado para a remoção de umidade. Neste processo geralmente existe o aumento de sua temperatura e fluxo, de modo a facilitar a secagem.

Segundo BROOKER *et al.* (1974), as vantagens da secagem artificial de grãos são as seguintes:

- Permite que a colheita seja feita mais cedo, o que diminui as perdas no campo por infestações.
- Permite o planejamento da colheita de acordo com as possibilidades de máquinas e mão de obra, visto que a colheita não depende das variações de umidade do grão no campo.
- Permite a armazenagem por longos períodos.
- Se o produtor tiver armazéns ou silos, permite o controle da venda do produto quando o preço do mercado for favorável.
- Mantém o grau de germinação do produto pela redução do aquecimento natural durante a armazenagem.

A secagem artificial pode ser por camadas fixas ou secagem contínua. A diferença básica é que na secagem em camada fixa os grãos não se movimentam durante a passagem do

fluxo de ar enquanto na secagem contínua existe tanto o fluxo de grãos quanto de ar. Os secadores contínuos são classificados de acordo com a direção relativa entre os fluxos de ar e de grãos. Os secadores em que os fluxos são paralelos e de mesmo sentido são chamados de secadores de fluxo concorrente. Se os fluxos forem paralelos e de sentidos opostos trata-se de um secador de fluxo contracorrente. No caso dos fluxos serem perpendiculares o secador é classificado como de fluxo cruzado.

Para CAMPOS & CANECHIO FILHO (1973) o arroz deve ser colhido com uma umidade entre 20 e 26% BU. Este procedimento garante pequeno índice de grãos mal formados e gessados (umidade acima de 26%) e também diminui o nível de perdas por queda no campo (umidade abaixo de 20%). Segundo estes autores, no Brasil a secagem natural é realizada por pequenos produtores. Esta secagem é feita de forma lenta e a espessura da camada deve ser diminuída à medida que a secagem prossegue. São realizados revolvimentos periódicos na massa de grãos. Em grandes propriedades geralmente são utilizados secadores contínuos. A temperatura de secagem utilizada é de 40 °C no início, chegando a 50 °C. No caso de sementes a temperatura é fixa em 41 °C.

3.3. Desempenho de sistemas de secagem

A aplicação da secagem artificial consiste na combinação dos parâmetros de secagem tais como temperatura e

fluxo de ar, tempo de exposição ao ar quente, número de passagens pelo secador, espessura de camada, temperatura e umidade relativa do ar ambiente e umidade inicial do grão. Os resultados obtidos são avaliados pelos seguintes fatores: capacidade, eficiência energética e qualidade do produto final. Os itens seguintes apresentam a influência dos parâmetros de secagem sobre os fatores de avaliação do processo.

3.3.1. Capacidade

A capacidade de secagem de um sistema é a quantidade de produto que ele processa por unidade de tempo (fluxo de grãos). Se o sistema fizer parte de uma propriedade agrícola que possua colheita mecanizada, esta capacidade deve estar ajustada ao ritmo de colheita, evitando-se que o sistema de secagem seja um ponto de estrangulamento do programa de colheita e pré-processamento.

BEENY & NGIN (1970) estudaram a secagem de arroz com várias passagens pelo secador, intercaladas por períodos de repouso e concluíram que esta técnica pode chegar a dobrar a capacidade do sistema de secagem. Em épocas de pico de colheita pode-se secar o arroz até 18% BU e armazená-lo por algumas semanas com aeração para posteriormente completar a secagem até 13% BU.

BAKKER-ARKEMA *et al.* (1978) relata que nos EUA os secadores são especificados quanto à capacidade em bushels

(0,035 m³) de milho em grãos (seco ou úmido), com remoção de 10 pontos (25 - 15% BU) ou 5 pontos (20 - 15% BU) de umidade. O valor em bushell para milho é dado dividindo o peso seco ou úmido em libras por 56, sem considerar o teste de peso ou o conteúdo de umidade. Segundo estes autores seria mais adequado classificar o secador por peso úmido por unidade de tempo.

Segundo NELLIST (1982), a capacidade é definida como a quantidade de grãos que passa pelo equipamento por unidade de tempo, expressos em toneladas/h para secadores contínuos ou toneladas/24 h para secadores de batelada. Entretanto, os secadores não têm um valor único de capacidade, mas uma larga faixa que depende de vários fatores. Os principais são a temperatura de operação e a umidade removida. Na Grã Bretanha, geralmente a capacidade está definida em relação a 5% de redução de umidade, a uma temperatura de 150 °C. Nem sempre é especificado se a capacidade refere-se a grãos úmidos ou secos.

3.3.2. Consumo específico de energia

O consumo específico de energia é definido como a energia necessária para remover uma unidade de peso de água do grão (MJ/kgv ou Btu/lbv). Este dado geralmente não é fornecido pelos fabricantes de secadores comerciais. Este consumo depende das condições do ar de secagem (temperatura e umidade relativa) e do grão (umidade e temperatura)

(BAKKER-ARKEMA et al (1978)

BAKKER-ARKEMA et al. (1973) propuseram o índice DPEI (Dryer Performance Evaluation Index) que corresponde à energia total requerida por um secador para remover uma libra de umidade do grão durante a secagem sob condições especificadas. A energia total inclui a energia para aquecer o ar de secagem, energia para mover o ar de secagem e de resfriamento e a energia para mover o grão. As condições a serem especificadas são a temperatura e umidade absoluta do ar ambiente e umidade, temperatura, tipo e qualidade (teste de quebras) do grão.

YOUNG & DICKENS (1975) avaliaram os efeitos de vários parâmetros de secagem sobre os custos dessa operação, considerando a secagem de camada fixa de grãos e secagem com fluxos de ar e grãos perpendiculares. Os testes foram feitos através de simulação matemática e mostraram que os custos com combustível por bushel tendem a alcançar um valor máximo e decrescem à medida que se aumenta a temperatura de secagem. Isto demonstra que a partir de um determinado valor de temperatura a eficiência energética aumenta. Outro resultado foi que os custos de combustível por bushel aumentam com o acréscimo do fluxo de ar para qualquer temperatura de secagem. Isto mostra que a eficiência energética diminui com o aumento do fluxo de ar.

MOREY et al. (1976) apresentaram dados de consumo e formas de economia de energia na secagem de milho. Os secadores de alta temperatura utilizados eram de fluxos de

ar e grãos perpendiculares. Baseados em simulação das condições de secagem eles concluíram que o uso de baixas vazões de ar ($60 - 90 \text{ m}^3/\text{min.m}^2$ de prod.) produz economia de energia, aliado ao aumento da temperatura de secagem. Outra recomendação foi a secagem inicial com alta temperatura (90°C) seguida por resfriamento e secagem em silo com baixas temperaturas e pequenos fluxos de ar. Os consumo energético (MJ/ton) foi calculado usando a energia requerida para o aquecimento do ar e para os motores dos ventiladores.

WALKER e BAKKER-ARKEMA (1978) estudaram o efeito da temperatura do ar de secagem, fluxo de grãos, tipo de secador e tempo de repouso sobre a eficiência energética. Este estudo baseou-se em testes experimentais com um secador multiestágio de tipo fluxo concorrente e simulação matemática. Os resultados indicaram que a combinação do aumento da temperatura do ar de secagem e aumento do fluxo de grãos com a diminuição do fluxo de ar implica em maior eficiência energética (menor consumo específico de energia).

BAKSHI et al. (1978) estudaram os requerimentos energéticos da secagem de arroz em secador de fluxos de ar e grãos perpendiculares. Estes autores utilizaram a seguinte equação de balanço de entalpia entre o ar de entrada e de saída do secador.:

$$E = \frac{d_a v_a (C_a + W_e C_v) T_e J_{ent} - d_a v_a (C_a + W_s C_v) T_s J_{sai}}{d_a v_a W_s J_{sai} - d_a v_a W_e J_{ent}} \quad (3.1)$$

Onde:

E : energia específica (Btu/lb vapor)
 d_a : densidade do ar seco (lb ar seco/cm³)
 v_a : velocidade do ar (cm/s)
 C_a : calor específico do ar seco (Btu/°C.lb ar seco)
 C_v : calor específico do vapor (Btu/°C.lb vapor)
 W_s : umidade absoluta do ar de saída (lb vapor/lb ar seco)
 W_e : umidade absoluta do ar de entrada (lb vapor/lb ar seco)
 T_e : temperatura do ar de entrada (°C)
 T_s : temperatura do ar de saída (°C)

Para NELLIST (1982), a energia térmica constitui 95% do total de energia consumida. Por isso poderia se pensar em usar o consumo de combustível por tonelada de grãos como indicador da eficiência do secador. Entretanto este consumo está relacionado a uma determinada condição inicial dos grãos e uma dada remoção de umidade. Em vista disto a medida ideal é a energia requerida para evaporar uma unidade de peso de água (MJ/kgv). Para a água, o calor latente de vaporização é de 2,45 MJ/kgv. Os secadores geralmente apresentam valores de 3,5 a 10 MJ/kgv. O consumo específico pode ser obtido pelas seguintes fontes: testes de secadores, experimentos em laboratórios, simulação matemática e literatura dos fabricantes.

Para NELLIST (1982), o consumo específico diminui com

aumento da temperatura do ar de secagem. Para a saturação adiabática do ar inicialmente a 10 °C e 8% de UR até 100% o consumo específico é de 3,5 MJ/kgv a 50 °C e 3,25 MJ/kgv a 200°C. No caso de altas temperaturas o consumo específico não sofre grande aumento quando não ocorre a saturação completa do ar. Para 200 °C e 20% de UR como condição final, o consumo será de 4 MJ/kgv. O uso de altas temperaturas diminui a vazão necessária de ar por unidade de massa de grãos, diminuído a potência necessária no ventilador e a emissão de poeira ao ambiente. Apesar de requerer mais energia no aquecimento do ar, isto é compensado pela maior capacidade de retirar umidade que ele adquire, resultando em um baixo consumo específico.

PEREIRA (1985) projetou um sistema de secagem de café em camada fixa usando como fonte de energia térmica e mecânica um gaseificador alimentado com madeira. O gás pobre produzido foi utilizado no motor do ventilador. O aquecimento do ar foi feito através do aproveitamento das perdas térmicas do motor estacionário e obtendo-se temperaturas de secagem inferiores a 60 °C. Observou-se que a redução da vazão e correspondente aumento da temperatura propiciou uma secagem mais rápida, com um menor consumo de energia. Além disso o autor concluiu que o efeito da vazão é predominante sobre a temperatura no início da secagem. Em vista disso o autor recomenda que no início da secagem seja utilizada vazão máxima, sendo diminuída no decorrer do processo.

SABIONI (1986) projetou e avaliou um secador de fluxos cruzados intermitente com reversão de fluxo e realizou testes de secagem de milho. Na avaliação da eficiência energética este autor utilizou a seguinte expressão:

$$EEs = EC / (M_i - M_f) \quad (3.2)$$

onde:

EEs: eficiência energética de secagem, kJ/kg de água

EC : energia consumida, kJ.

M_i : massa inicial do produto, kg.

M_f : massa final do produto, kg.

Neste trabalho, a energia consumida é representada pela energia da queima do combustível (lenha) e a energia elétrica necessária para movimentar os motores do ventilador e elevador de canecas. Foram obtidas as eficiências com e sem a inclusão da energia elétrica.

3.3.3. Qualidade do grão

SCHIMIDT & JEBE (1959) estudaram os efeitos da secagem sobre o rendimento de grãos inteiros e germinação de arroz. Foram utilizadas temperaturas de secagem entre 32 e 60 °C, UR de 9 a 84% e potencial de saturação entre 0,3 e 5,6 in de Hg (diferença de pressão de vapor de saturação entre o ponto de orvalho e na temperatura de bulbo seco) em um secador de laboratório. A remoção de umidade foi de 17 a 29% (umidade inicial até 13% BU e utilizou-se de duas ou mais passagens

intercaladas por períodos de repouso. Estes autores concluíram que o aumento da temperatura e do déficit de saturação provocam a diminuição do rendimento de grãos inteiros e da germinação. Segundo estes autores o déficit de saturação parece estar intimamente relacionado ao rendimento de grãos inteiros porque influi na taxa de secagem. Verificou-se também que o aumento da velocidade do ar provoca diminuição no rendimento de grãos inteiros (os menores rendimentos foram obtidos com velocidade de 1,0 m/s). O déficit de saturação ideal está entre 1,0 e 2,0 in de Hg.

A proporção de grãos quebrados aumenta com as tensões causadas pela exposição prolongada ao ar de secagem. Por isso as condições de secagem devem ser moderadas. A secagem realizada por várias passagens de ar quente resulta em maiores rendimentos de beneficiamento e aumenta a capacidade do secador. Este procedimento é acompanhado pelo uso do tempo de repouso entre as passagens, para permitir a diminuição dos gradientes de umidade e temperatura dentro do grão (BEENY & NGIN, 1970).

CALDERWOOD & WEBB (1971) estudaram o efeito da temperatura de secagem, fluxo de grãos, tempo de retenção no secador e fluxo de ar quente sobre o rendimento de beneficiamento e características de cozimento do arroz. Utilizando-se de temperaturas mais altas (82 °C) e tempos de exposição do grão em cada passagem menores (15 min) resultou em menor tempo de operação do secador para a mesma remoção

de umidade e maiores rendimentos de beneficiamento em relação ao uso de ar de secagem a 70 °C e 25 min de exposição. Alterando-se somente a temperatura e mantendo-se inalterados todos os outros parâmetros foi obtida uma secagem mais rápida com pequena redução do rendimento de beneficiamento. Aumentando-se o fluxo de ar quente e mantendo-se os outros parâmetros constantes não se observou alterações no rendimento de beneficiamento.

KUNZE (1979) estudou o desenvolvimento de fissuras em grão de arroz após a secagem. Submetidos à secagem com temperaturas de 37,8; 48,9 e 60 °C e tempos de exposição de 1, 2, 4 e 8 horas, os grãos foram observados quanto ao aparecimento de fissuras durante 24 a 48 horas após o término da secagem. Concluiu-se que alguns grãos não desenvolvem fissuras imediatamente após a secagem e sim após um intervalo de tempo. O tempo de secagem e a remoção de umidade parecem ter pequena relação com o número de grãos fissurados. Os danos estão relacionados à taxa de secagem. Quanto mais alta a velocidade de secagem maiores serão as perdas. A exposição de grãos relativamente secos ao ambiente pode provocar fissuras pela absorção de umidade. Grãos com alta umidade inicial (29,8% BU) que sofreram secagem rápida devem ser beneficiados imediatamente para produzir altos rendimentos de grãos inteiros.

SHARMA & KUNZE (1982) estudaram o aparecimento de fissuras após a secagem de arroz em casca. A secagem foi realizada com temperaturas de 39, 47 e 60 °C com conteúdos

de umidades iniciais de 14 a 20% BS. Foram feitas observações após a secagem em intervalos de 12 horas durante 144 hs. Concluiu-se que a secagem de arroz a 60 °C por 2 hs ou mais provoca grande incidência de fissuras logo após a secagem. Poucos grãos sofrem fissuras durante a secagem. Quando sujeito a um alto potencial de secagem durante 2 hs ou mais o arroz com alta umidade inicial sofrerá maior número de fissuras do que o arroz com baixa umidade, se as condições de secagem forem idênticas.

Segundo NELLIST (1982), a qualidade do grão é influenciada pela temperatura a que ele é submetido. A diferença entre a temperatura do ar de secagem e a do grão depende do projeto do secador. Atualmente os secadores permitem que a máxima temperatura do grão fique abaixo da temperatura do ar.

A qualidade do grão requerida varia conforme a sua utilização após a secagem. Para o caso de alimentação animal, os grãos podem estar ligeiramente tostados, para a alimentação de ruminantes. Para não ruminantes deve-se evitar a denaturação de proteínas até um nível de 10% segundo MUHLBAUER & CHRIST, citado por NELLIST (1982). Nestes casos a secagem envolve algumas combinações como 120 °C por 1 h e 100 °C por 3 hs.

Para o caso do arroz, a deterioração da qualidade do grão está relacionada ao nível de quebras durante o processo de beneficiamento. Estas quebras são provocadas por fissuras decorrentes de tensões internas dos grãos, geradas por

gradientes de umidade (predominantes) e de temperatura, segundo PRASAD et al. citado por WALKER & BAKKER-ARKEMA (1978).

As exigências básicas de qualidade de arroz incluem a presença de grãos perfeitos, maduros, secos e isentos de impurezas e matérias estranhas. Além disso a porcentagem de grãos quebrados influi no valor de mercado, visto que os consumidores em geral preferem um produto com grãos inteiros. No Brasil o beneficiamento do arroz é feito pelos maquinistas, que geralmente operam nas zonas produtoras e mantêm agências de distribuição por atacado nos principais centros de consumo. A operação de beneficiamento visa basicamente a remoção da casca que envolve o grão. O arroz obtido após o descascamento é chamado de arroz pardo ou integral. Em seguida o arroz integral passa por polimento para retirar a película escura que recobre o grão (tegumento), produzindo o arroz polido e o farelo. Existem dois parâmetros de avaliação de qualidade de grãos após o beneficiamento:

- Renda: relação percentual entre o peso de arroz beneficiado (grãos inteiros e quebrados) e o peso do arroz em casca.

- Rendimento: relação entre o peso de grãos inteiros ou peso de grãos quebrados (menos o farelo) em relação ao peso do arroz em casca.

O valor comercial do arroz é calculado segundo a Resolução no. 61 do CONCEX aplicando-se os seguintes

coeficientes: 0,77206 para os grãos inteiros e 0,22794 para os grãos quebrados. Para a aplicação destes coeficientes a Resolução estabelece uma renda base de 68%, com um rendimento de 40% de grãos inteiros e 28% de grãos quebrados (PUZZI, 1986).

3.4. Tipos de secadores

3.4.1. Secadores de Camada Fixa

Consistem em equipamentos nos quais certa quantidade de grãos é colocada formando uma camada espessa, através da qual passa o fluxo de ar. Estes sistemas podem ser do tipo que o grão é armazenado no próprio equipamento onde ocorreu a secagem (silo cheio) ou o sistema em que o produto removido para outro silo após a secagem (secagem por cargas).

BROOKER et al. (1974) relatam as seguintes vantagens e desvantagens do sistema de silo cheio:

Vantagens:

- A colheita pode ser feita a qualquer ritmo.
- A operação é relativamente simples.
- O manuseio de grãos é mínimo.
- Grande eficiência energética.
- Não ocorre secagem excessiva.
- Baixo índice de quebras com baixas temperaturas.

Desvantagens:

- Não permite o uso de grãos com alto teor de umidade.

- O período de operação é longo.

Outro método é a secagem por cargas, em que certa quantidade de grãos sofre secagem e é transferida para o silo de armazenagem. O princípio de operação é o uso de grande quantidade de ar aquecido através de uma camada relativamente fina (0,9 a 1,2 m) para se obter uma secagem rápida. As vantagens e desvantagens desse método, segundo BROOKER *et al.* (1974), são:

Vantagens:

- Grande variedade de equipamentos, conforme a capacidade necessária.
- Possibilidade de alterar a espessura de camada a cada dia para dar flexibilidade ao esquema de colheita.
- O silo secador pode ser completado no final da colheita, utilizando a técnica de secagem por camadas.

Desvantagens:

- Alto gradiente de umidade entre o topo e a base da camada.
- O sistema opera durante 20 a 24 horas por dia, requerendo supervisão em horários excepcionais.
- O grão é manuseado pelo menos duas vezes.
- Gasta-se tempo para resfriar e descarregar o produto seco.

BAKKER-ARKEMA *et al.* (1983) realizaram comparações entre os sistemas de camada fixa, fluxo cruzado e fluxo concorrente. Na secagem em camada fixa utilizou-se uma camada de grãos com 3 m de espessura e umidade inicial de 24% BU, submetida a um fluxo de ar de $0,08 \text{ m}^3/\text{s.m}^2$ de

produto durante 50, 100 e 128 h, resultando em um consumo específico de 1,55 MJ/kgv. Recomenda-se controlar a umidade relativa do ar de secagem para evitar a secagem excessiva na base da camada. Este controle poderia ser feito por microprocessadores.

3.4.2. Secadores contínuos

Os três tipos básicos de secadores contínuos estão representados na Figura 3.1.

THOMPSON *et al.* (1968) desenvolveram um modelo de simulação de secagem de camadas espessas de grãos e o aplicaram aos sistemas de fluxo cruzado, concorrente e contracorrente. Os resultados das simulações para fluxo concorrente indicaram que grande parte da umidade é retirada nos primeiros 15 cm da coluna de secagem e que no restante do trajeto ocorre o resfriamento do ar de secagem, tendendo a entrar em equilíbrio com o grão.

Segundo WALKER *et al.* (1978) os secadores de fluxo concorrente parecem ter as melhores condições para realizar a secagem de arroz. Ele pode operar com temperaturas mais altas, diminuindo o consumo específico de energia, sem causar danos aos grãos. Isto ocorre porque o grão não atinge a temperatura do ar de secagem, visto que ele fica exposto por um período muito curto. Este secador promove uma secagem bastante uniforme por proporcionar condições parecidas de temperatura e umidade relativa do ar aos grãos em diferentes profundidades da camada. Para o secador de fluxo contra

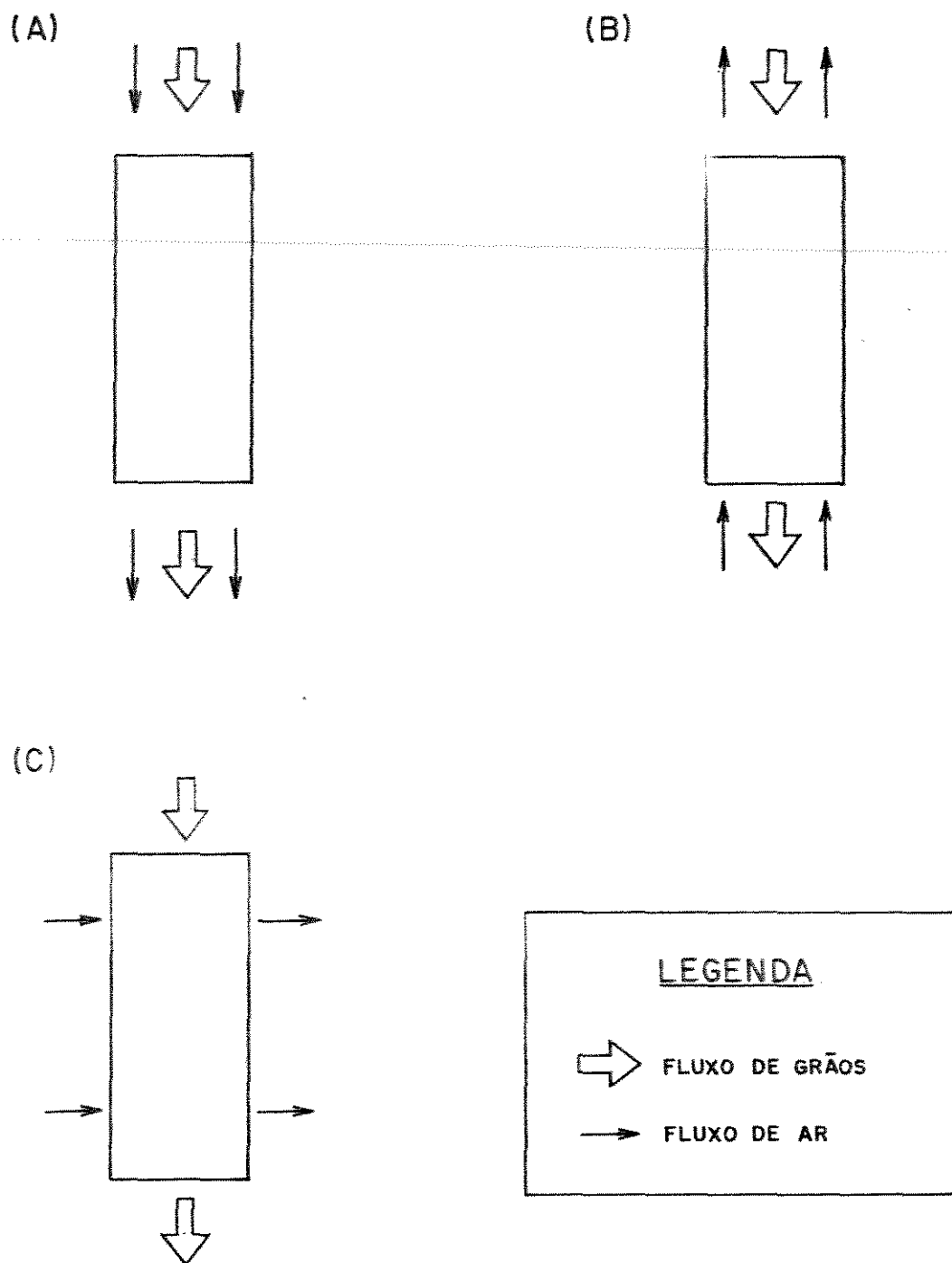


Fig. 3.1 – TIPOS DE SECADORES CONTÍNUOS BÁSICOS: (A) FLUXO CONCORRENTE, (B) FLUXO CONTRACORRENTE E (C) FLUXO CRUZADO.

corrente é possível saturar o ar de secagem provocando a contínua condensação sobre a superfície dos grãos frios que entram no secador. Neste tipo de secador a umidade de equilíbrio diminui à medida que o grão caminha na coluna, o que aumenta as tensões dentro do grão.

BAKKER-ARKEMA *et al.* (1982) realizaram testes simulados e experimentais de secagem de arroz em secador de fluxo concorrente de 2 e 3 estágios. Foi possível operar com temperaturas de secagem de 82 a 176 °C, com remoção de 6 pontos de umidade em cada passagem sem afetar o rendimento de grãos inteiros. A energia consumida foi de 3,5 a 3,6 MJ/kgv. O grão passa por um período de repouso no próprio secador a uma temperatura entre 40,5 e 43,3 °C, o que facilita o processo de equalização de umidade.

Segundo NELLIST (1982), em um secador de fluxo contra corrente operando em equilíbrio, os grãos deixam o secador à mesma temperatura do ar de entrada e o ar deixa o secador à mesma temperatura e em equilíbrio de umidade com o grão úmido. Este é um processo eficiente mas é limitado pela sensibilidade dos grãos a altas temperaturas, sendo mais adequado para o resfriamento de grãos.

O secador de fluxo cruzado será tratado no próximo item com mais detalhe por se tratar do assunto principal deste trabalho.

3.5. Secador de Fluxo Cruzado

3.5.1. Características

Segundo STEVENS & THOMPSON (1976) os secadores de fluxo cruzado são mais populares pela sua simplicidade de construção e baixo custo. Sua maior desvantagem é a falta de uniformidade de secagem. Ocorre secagem excessiva do lado da coluna em que o ar entra e secagem insuficiente do lado de saída do ar.

Outra característica é o alto consumo específico de energia pela exaustão do ar após passar pelos grãos. Com isso perde-se a energia ainda disponível no ar de secagem e provoca-se emissão de poeira no ambiente. Existem algumas alterações no projeto de secadores de fluxo cruzado que podem melhorar o seu desempenho. Estas alterações são analisadas nos itens seguintes.

3.5.5. Variação da espessura de coluna

A espessura de coluna representa a distância que o ar deve percorrer dentro do fluxo de grãos em um secador de fluxo cruzado.

MOREY & CLOUD (1973) efetuaram simulações de secagem em um secador de fluxo cruzado de várias colunas. Neste tipo de secador o ar atravessa três colunas sucessivas, fazendo com que o ar de exaustão da anterior seja o ar de entrada da próxima. As condições de secagem mais usadas foram:

temperatura de secagem a 115,5 °C, remoção de umidade de 30% até 15% BU, fluxo de ar de 15,2 m³/min.m². Os autores recomendam o uso de 20,3; 40,6 e 30,5 cm de espessura, respectivamente na primeira, segunda e terceira colunas. A primeira coluna é crítica, pelo gradiente de umidade que pode gerar. Por isso ela deve ser mais fina. Este tipo de secador com espessuras diferentes poderia resultar em maior eficiência e economia de energia, mantendo o gradiente de umidade em níveis adequados. O uso de baixas vazões de ar aumenta a eficiência, diminui os custos de operação e a potência requerida mas aumenta o gradiente de umidade. Neste caso é necessário aumentar o tamanho do secador para manter a mesma capacidade.

STEVENS & THOMPSON (1976) realizaram simulações comparando três tipos de secadores de fluxo cruzado: o convencional (um estágio de secagem e outro de resfriamento), o Hart-Carter, e um secador com espessuras diferentes entre os estágios (20 cm no topo do primeiro estágio, 30 cm no segundo estágio e 20 cm no final do resfriador). Este último tipo apresentou um gradiente de umidade de 2,2% e consumiu 7% menos energia que o Hart-Carter com um fluxo de grãos 4% maior. Neste secador o fluxo de ar passa pelos grãos na seguinte sequência: resfriador - segundo estágio - primeiro estágio, realizando reciclagem total e reversão entre os estágios.

NOYES (1978) analisou as características de um secador comercial de fluxo cruzado (Superb). Este modelo possui um equalizador de umidade que inverte as partes interna e

externa da coluna de grãos em relação à entrada de ar e promove reciclagem (30% a 50% do ar de exaustão). A espessura da coluna utilizada foi de 30 cm, resultado de otimização realizada com fluxos de ar de 60, 80 e 100 $\text{m}^3/(\text{min} \cdot \text{m}^2 \text{ de produto})$ e temperaturas de 82,2; 98,8 e 115,5 °C. Este secador apresentou eficiência energética de 4,9 MJ/kgv com remoção de 19-21,2% até 13,4-13,9% BU.

PIERCE & THOMPSON (1981) utilizaram espessura de coluna de 38 cm com temperaturas entre 38 a 149 °C, fluxos de ar de 8 a 80 $\text{m}^3/(\text{min} \cdot \text{m}^2 \text{ de produto})$ para a secagem de milho. Estas condições foram assumidas para os secadores convencional, Hart-Carter e de fluxo recirculado.

LACERDA FILHO *et al.* (1982) realizaram testes experimentais de secagem arroz com um secador comercial (CASP) de fluxo cruzado sem reversão ou reciclagem. Trata-se de um secador de coluna que possui uma câmara de estabilização na parte superior. Foram utilizadas temperaturas de secagem de 45, 80, 100 e 115 °C. O secador possuía uma espessura de camada de 14 cm fixa. Os resultados mostraram que o secador pode secar 9 toneladas de arroz em 7 horas, com uma remoção de umidade de 20% até 13% BU operando com temperaturas de 80 a 110 °C. Para temperaturas entre 80 e 115 °C concluiu-se que a espessura de camada foi subdimensionada. Portanto esta medida poderia ser maior para aumentar a capacidade do secador.

3.5.2. Reversão de fluxo de ar

A reversão de fluxo de ar representa inverter o sentido de passagem do ar entre o primeiro e segundo estágios de secagem. LEREW et al. (1972) realizaram simulações de secagem com o secador modelo Hart-Carter. Este secador de fluxo cruzado possui 3 estágios (2 de secagem e 1 de resfriamento) e permite a reversão de fluxo entre os dois primeiros estágios e reciclagem do ar de exaustão do segundo estágio. A reversão de fluxo permitiu diminuir o gradiente de umidade na coluna de secagem. No final do primeiro estágio ocorre o máximo valor de gradiente de umidade, que é 5,3%. No final do estágio de resfriamento o gradiente é de 1,9%. Este valor é significativamente menor que nos secadores convencionais.

PAULSEN & THOMPSON (1973) estudaram o efeito da reversão de fluxo de ar em metade da coluna de secagem em um secador de fluxo cruzado. Avaliaram também os efeitos de parâmetros como fluxo e temperatura do ar na vazão de grãos, gradiente de umidade final dos grãos e eficiência de secagem. Foi utilizado o modelo de Thompson para simular a reversão de fluxo. Foi adotada a proporção de 40%, 40% e 20% do comprimento total para o primeiro estágio, segundo estágio com reversão e terceiro estágio de resfriamento, respectivamente, para se obter o mínimo gradiente de umidade na coluna. Os resultados mostraram que a reversão de fluxo pode reduzir em 60% o gradiente de umidade de grãos após o resfriamento. Observou-se também uma

diminuição da temperatura média dos grãos no final do primeiro e segundo estágios com reversão em relação ao estágio único. Como a eficiência de secagem depende da temperatura do grão de forma direta, esta consequência resultou em ligeira diminuição na capacidade (fluxo de grãos) do secador. Outra conclusão foi que o uso de temperaturas de secagem acima de 60 °C provoca aumento dos grãos quebrados.

BAKSHI et al. (1978) encontraram uma redução de 7,2% para 5% no gradiente de umidade na coluna pela reversão de fluxo em um secador de laboratório.

3.5.3. Reciclagem de ar

A reciclagem de ar significa utilizar parcialmente ou totalmente o ar de exaustão de algum estágio de secagem como ar de entrada em outro estágio. Esta utilização geralmente é feita após a mistura com ar do ambiente e aquecimento.

LEREW et al. (1972) estudaram o efeito da variação da taxa de reciclagem sobre a eficiência de secagem, o consumo específico de energia e a poluição do ambiente. A taxa de reciclagem do teste padrão era de 45:55. Isto significa que 55% do ar (em peso) é recirculado e 45% do ar é expelido para o ambiente, saindo do primeiro estágio. A variação da taxa de reciclagem de 40:60 até 60:40 (ar ambiente:ar reciclado) afetou ligeiramente a umidade de saída do secador (0,5%) enquanto influenciou significativamente as

características de poluição do ambiente (aumento de 50% da massa de ar de saída). Aumentando-se a taxa de reciclagem de ar provoca-se uma melhoria na eficiência energética do secador. O consumo específico de energia passou de 3,04 MJ/kgv com taxa de 40:60 para 4,13 MJ/kgv com taxa de 60:40.

BAKSHI et al. (1978) pesquisaram o efeito da reciclagem de ar sobre os requerimentos energéticos da secagem de arroz por fluxo cruzado. Foi utilizado um secador em escala de laboratório de 3 estágios (120 cm de altura cada) que permitia diversas combinações de reciclagem. As temperaturas de secagem ficaram entre 43,3 e 50,0 °C, o fluxo de ar foi de 0,4 m³/s.m² e a umidade inicial variou de 20% a 32% BS. Inicialmente foi usado o modelo de simulação de Michigan para calcular o tempo de secagem e o fluxo de grãos. Os autores concluíram que o uso de reciclagem resulta em menor requerimento energético (valor mínimo: 3,4 MJ/kgv), secagem mais uniforme e não tem efeito sobre o rendimento de beneficiamento. Observaram também a necessidade de desenvolvimento de outro modelo de simulação para arroz.

PIERCE & THOMPSON (1981) realizaram simulações para comparar o desempenho de 4 tipos de secadores de fluxo cruzado: convencional, fluxo reverso, Hart-Carter (reversão e reciclagem) e o com reciclagem total de fluxo. Este último modelo utiliza o ar de exaustão do estágio de resfriamento como ar de entrada no aquecedor e posterior passagem no segundo estágio. Após a passagem por este estágio, o ar é utilizado como ar de entrada no primeiro estágio, sendo finalmente expelido para o ambiente. Este modelo apresentou

os melhores resultados de consumo de energia (4,38 MJ/kgv), menor gradiente de umidade (1,1% BUD sem diminuir a capacidade de secagem. Estes resultados foram obtidos com temperaturas de secagem de 66 °C e fluxo de ar de 51 m³/(min.m³ de produto).

3.5.4. Tempo de repouso

Esta técnica consiste em deixar o grão em repouso após a passagem do ar quente a fim de permitir a uniformização da umidade dentro do grão. Isto ocorre pela migração da umidade do centro para a periferia do grão. Trata-se de uma técnica bastante utilizada nos EUA, onde geralmente o arroz sofre secagem por várias passagens no secador intercaladas por tempos de repouso de 10 a 24 horas.

BEENY & CHIN (1970) estudaram a secagem de arroz através de várias passagens no secador, usando "tempering" entre uma passagem e outra. Foram feitos vários experimentos alterando o número de passagens, a duração do "tempering" (10 min, 5 e 10 horas) e o fluxo de ar, para avaliar os efeitos destas variações sobre o rendimento de beneficiamento e tempo de residência necessário para efetuar determinada remoção de umidade. Concluiu-se que a secagem por 3-4 passagens com tempo de repouso entre 5-6 horas representa uma boa condição quanto ao rendimento de beneficiamento e capacidade de secagem. Estes resultados foram obtidos com ar de secagem a 54,4 °C e camadas fixas de grãos com 5 cm de espessura.

os melhores resultados de consumo de energia (4,38 MJ/kgv), menor gradiente de umidade (1,1% BU sem diminuir a capacidade de secagem. Estes resultados foram obtidos com temperaturas de secagem de 66 °C e fluxo de ar de 51 m³/(min.m² de produto).

3.5.4. Tempo de repouso

Esta técnica consiste em deixar o grão em repouso após a passagem do ar quente a fim de permitir a uniformização da umidade dentro do grão. Isto ocorre pela migração da umidade do centro para a periferia do grão. Trata-se de uma técnica bastante utilizada nos EUA, onde geralmente o arroz sofre secagem por várias passagens no secador intercaladas por tempos de repouso de 10 a 24 horas.

BEENY & CHIN (1970) estudaram a secagem de arroz através de várias passagens no secador, usando "tempering" entre uma passagem e outra. Foram feitos vários experimentos alterando o número de passagens, a duração do "tempering" (10 min, 5 e 10 horas) e o fluxo de ar, para avaliar os efeitos destas variações sobre o rendimento de beneficiamento e tempo de residência necessário para efetuar determinada remoção de umidade. Concluiu-se que a secagem por 3-4 passagens com tempo de repouso entre 5-6 horas representa uma boa condição quanto ao rendimento de beneficiamento e capacidade de secagem. Estes resultados foram obtidos com ar de secagem a 54,4 °C e camadas fixas de grãos com 5 cm de espessura.

CALDERWOOD & WEBB (1971) concluíram que o uso de tempos de repouso maiores que 12 hs com alta temperatura não afeta significativamente a remoção de umidade no estágio posterior de resfriamento. Segundo estes autores a duração do "tempering" parece não ter efeito sobre o rendimento de beneficiamento.

STEFFE *et al.* (1978) estudaram o tempo de repouso para a secagem de arroz em casca, analisando a influência sobre a facilidade de secagem na segunda passagem e sobre a qualidade dos grãos. Para a secagem com ar a 38 °C e 20 min de exposição o tempo de repouso mínimo foi de 35 min. Se for utilizado ar a 50 °C durante 20 min ou 38 °C durante 35 minutos, o tempo de repouso recomendado foi de 3 horas. Concluiu-se que o tempo de repouso ("tempering") facilita a remoção de umidade na segunda passagem e mantém alto rendimento final (pequena quantidade de grãos quebrados em relação ao peso inicial em casca).

WALKER & BAKKER-ARKEMA (1978) concluíram que o "tempering" tem pequena influência sobre a remoção de umidade na segunda passagem e sobre a eficiência energética, quando a secagem é feita por fluxo concorrente. Segundo estes autores isto pode ser devido ao pequeno gradiente de umidade dentro do grão após a secagem por este sistema. Estes resultados foram obtidos por simulação matemática do processo.

EZEIKE & OTTEN (1981) realizaram uma análise teórica do processo de "tempering" baseada em considerações termodinâmicas da distribuição de calor, trabalho e massa

durante esta fase. Os resultados indicaram que durante o tempo de repouso ocorre apenas troca de calor entre o grão e o ar. Demonstrou-se também que quando promove-se a passagem de ar ambiente através dos grãos durante o "tempering", é necessária maior quantidade de energia para efetuar qualquer remoção de umidade que possa ocorrer por este processo. Assim existe vantagem em promover o "tempering" em condições de ar quase estacionário.

3.6. Resumo da Revisão Bibliográfica

Segundo a literatura consultada, os parâmetros de avaliação de sistemas de secagem estão relacionados às condições de secagem como se segue:

- Capacidade: este parâmetro deve ser quantificado em peso úmido por unidade de tempo (kg/h ou ton/h), relacionado a uma determinada remoção de umidade. A capacidade de secagem depende da umidade inicial do produto e da temperatura de secagem. O aumento da temperatura do ar de secagem provoca um acréscimo da capacidade de secagem. A umidade inicial do produto influi no fluxo de grãos necessário para se obter a umidade final desejada.
- Eficiência energética: este parâmetro depende de forma direta da temperatura e do ar de secagem e de forma inversa do fluxo e umidade relativa de ar (MOREY *et al.*, 1976; YOUNG & DICKENS, 1975; WALKER & BAKKER- ARKEMA, 1978; PEREIRA, 1985) para qualquer sistema de secagem.
- Qualidade do produto final: avaliando-se o

rendimento de grãos inteiros após o beneficiamento (para o caso do arroz), percebe-se que o aumento da temperatura e da taxa de secagem diminuem a qualidade do produto final. As fissuras nos grãos (que provocam as quebras durante o beneficiamento) podem ocorrer logo após a secagem se a exposição do ar quente for prolongada (2h ou mais) ou após um período de tempo, se a taxa de secagem foi alta.

Com relação às modificações no secador de fluxo cruzado a literatura consultada permite as seguintes observações:

- Espessura de coluna: o aumento da espessura de coluna provoca acréscimo no gradiente de umidade na coluna de secagem. A espessura recomendada está entre 30 e 40 cm.

- Reversão de fluxo: provoca diminuição no gradiente de umidade na coluna de secagem e da temperatura do grão no final da secagem, o que diminui a taxa de secagem.

- Reciclagem de ar: provoca aumento da eficiência energética e diminui o gradiente de umidade, mas não tem efeito sobre o rendimento de grãos inteiros.

- Tempo de repouso: Aumenta a capacidade de secagem do sistema, mas não melhora o rendimento de grãos inteiros quando utilizado entre várias passagens no secador (apenas mantém os níveis obtidos antes da secagem). Os períodos recomendados são de 3 a 6 horas. Acima de 12 horas não afeta a remoção de umidade no estágio posterior de resfriamento.

4. MATERIAL E MÉTODOS

A fase experimental deste trabalho foi realizada no Laboratório de Secagem do Departamento de Pré-Processamento de Produtos Agropecuários, com os testes no período de maio a julho de 1989.

4.1. Material

4.1.1. Secador

Foi construído um secador de fluxo cruzado em escala de laboratório constituído dos seguintes elementos: câmara de secagem, sistema de circulação e aquecimento do ar, elevador de canecas e silo alimentador. O secador está representado na Figura 4.1. Os elementos que o compõem são detalhados nos itens seguintes:

4.1.1.1. Câmara de secagem

A câmara de secagem foi construída no Laboratório de Protótipos do Departamento de Máquinas Agrícolas. Este elemento constitui o corpo do secador, onde ocorre o cruzamento dos fluxos de ar (horizontal) e de grãos

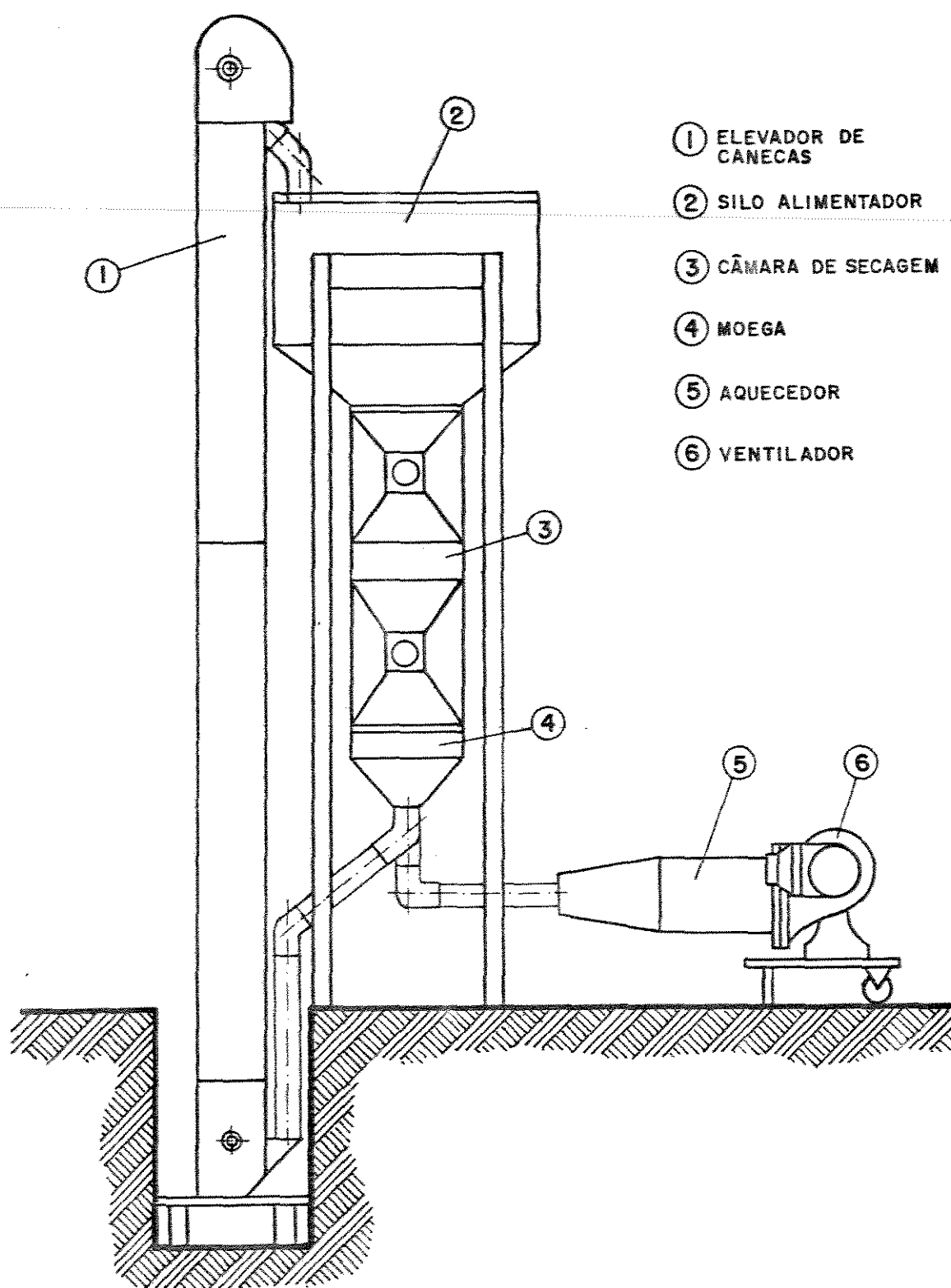


Fig.4.1 - ESQUEMA DO SISTEMA COMPLETO DE SECAGEM EM VISTA LATERAL.

(vertical). A câmara de secagem possui dois estágios de passagem de ar com 60 cm de altura por 50 cm de largura cada. O ar passa através de uma tela de arame com malha de 0,19 cm de abertura, montada sobre um quadro retangular (140 x 50 cm) de cantoneiras soldadas de 0,32 x 2,54 cm (espessura x largura). Estas estruturas servem de base para as coifas de entrada e saída do ar, que são ligadas ao sistema de circulação do ar. As paredes frontal e traseira da câmara são feitas em chapa com 0.09 cm de espessura. A parede frontal possui uma janela em acrílico de 30 x 15 cm para monitoração do estágio superior (primeiro estágio), aberturas para a tomada de amostras de grãos e estruturas de sustentação de termopares.

A altura total da câmara é de 140 cm, correspondendo aos dois estágios de 60 cm e 20 cm de separação entre eles. Pelo deslocamento de uma das estruturas com tela pode-se alterar a espessura da coluna de grãos para 10, 20 ou 30 cm. A câmara situa-se abaixo do silo alimentador e acima da moega de descarga, que está ligada ao elevador de canecas.

4.1.1.2. Sistema de circulação e aquecimento do ar

Este sistema é composto por ventilador, aquecedor e tubulação. O ventilador utilizado tem as seguintes características: centrífugo com pás viradas para frente, marca ASTEN, utiliza motor com potência de 2 Hp, corrente de 6,4 A, rotação de 3400 rpm, tensão de 220 V.

Para que o ar da saída do segundo estágio pudesse

passar novamente pelo conjunto ventilador/aquecedor foi colocada uma derivação de PVC na sucção do ventilador. Esta derivação possui um diâmetro principal de 15 cm, usado para o fluxo vindo do ambiente e uma entrada lateral com 10 cm de diâmetro, usada para receber o fluxo de ar reciclado do secador. A entrada principal recebeu uma válvula tipo borboleta para controle do fluxo proveniente do ambiente.

Na saída do ventilador foi conectado o aquecedor elétrico do sistema. Este aquecedor é constituído por um duto de madeira compensada com secção quadrada, contendo um jogo de resistências elétricas para o aquecimento do ar. Este jogo era composto de 3 resistências espirais de 2000 W a 220 V cada, ligadas em paralelo, mais 3 resistências espirais para ambiente, com potência de 400 W a 110 V cada, ligadas em série entre si, mas em paralelo com as outras resistências. As paredes internas do aquecedor receberam pintura de tinta betuminosa para evitar a passagem de umidade através da madeira. Na região das resistências foram coladas placas de asberite (material isolante térmico) com 0,3 cm de espessura. A parte final do aquecedor tinha formato de tronco de pirâmide, com uma saída circular de 10 cm de diâmetro. Ao aquecedor foi conectada a tubulação de PVC de 10 cm de diâmetro que conduzia o ar através do secador. A tubulação foi conectada sem o uso de cola, para permitir variações de montagem conforme o tipo de teste.

4.1.1.3. Elevador de canecas

Foi utilizado um elevador de canecas de 4 m de altura para a movimentação dos grãos dentro do secador. O equipamento foi obtido por doação junto à empresa MACHINA D'ANDREA. O elevador foi acionado por um motor de 0,75 CV e alcançou uma capacidade de 600 kg/h de arroz, sem provocar travamento.

Na base do elevador foi instalada uma pequena moega com duas entradas, sendo uma para o secador e outra para o carregamento de produto úmido. Esta moega possui um registro que controla o fluxo de grãos no elevador. O elevador promovia a circulação dos grãos retirando-os da parte inferior do secador e carregando o silo alimentador, colocado acima do secador. Para a descarga do secador, o elevador era desconectado do silo, colocando-se uma tubulação de desvio para fora.

4.1.1.4. Silo alimentador

Este silo foi construído em placa compensada de 1,5 cm, revestido internamente com tinta betuminosa e externamente com esmalte sintético. O silo possui 0,9 m de altura total, sendo a parte inferior em forma de tronco de pirâmide com altura de 20 cm. Na parte superior as dimensões são de 70 cm de largura, 90 cm de comprimento e 70 cm de altura.

O silo é fechado na parte superior com uma placa de compensado, apoiada em espuma de borracha para vedação. Esta

tampa possui apenas uma abertura de 10 cm de diâmetro, para a tubulação que sai do elevador. Na base do silo a saída dos grãos ocorre através de uma porta de abertura regulável tipo gaveta, que acompanha a espessura da coluna do secador (10, 20 ou 30 cm). Foi colocada uma placa metálica inclinada apoiada no lado interno da parede do silo e na abertura inferior do silo. A função desta placa é acompanhar a abertura para cada espessura de coluna, evitando o acúmulo de produto e favorecendo o fluxo de grãos dentro do silo.

4.1.2. Aparelhos de medição e equipamentos auxiliares

Foram utilizados os seguintes aparelhos de medição:

- Amperímetro: tipo alicate, mostrador analógico, escala de 0 a 50 A, precisão de 0,5 A, marca HEW SNAP.
- Voltímetro: Mostrador analógico, escala de 0 a 300 V, precisão de 2,5 V, marca SANWA.
- Registrador de temperatura: amplificador de sinais em milivolts obtidos por termopares, marcação das temperaturas por carimbo em papel graduado contínuo, 12 canais, uso de termopares de cobre-constantan, marca SPEEDOMAX.
- Anemômetro: dotado de hélice, mostrador digital, escala de 0 a 30 m/s, precisão de 0,01 m/s, acionado por bateria, marca AIRFLOW.
- Higrotermógrafo: dotado de sensor de fios de cabelo, fornece temperatura e umidade relativa do ambiente, acionado por pilha, papel com duração de 1 semana, marca COLE PALMER.
- Balança semi-analítica: fornece leitura digital,

dotada de campânula de vidro, tara, precisão de 0.001 g, marca MARTE.

- Balança de plataforma: dotada de pesos avulsos, capacidade máxima de 200 kg, precisão de 50 g, marca ARJA.

Foram utilizados os seguintes equipamentos auxiliares:

- Estufa: dotada de circulação de ar, graduação de temperatura por botão de 10 posições, marca FANEN.

- Regulador de tensão: dotado de variador contínuo, trifásico, opera de 0 a 240 V e corrente máxima de 35 A, marca VARIVOLT.

- Beneficiadora de arroz: pequeno porte, opera com roletes de borracha para descascar e faz o brunimento, marca SUZUKI.

- Câmara fria: volume interno de 16 m³, ajuste de temperatura, mostrador digital de temperatura obtida por termopares em 4 posições e a média no interior da câmara, marca FANEM.

4.2. Produto

Foram adquiridas 4 ton de arroz em casca, variedade IAC 4440, tipo longo fino junto a um produtor da região de São José dos Campos (SP). O arroz foi colhido, ensacado e transportado para Campinas no mesmo dia, ficando armazenado na câmara fria com temperaturas entre 10 e 13 °C e umidade relativa entre 80 e 85 %. A umidade do produto quando foi colhido era de 21,7% BU.

4.3. Método

4.3.1. Tipos de testes

Os testes se dividem em três grandes grupos de acordo com a espessura de coluna de grãos. Este parâmetro foi fixado em 30, 20 e 10 cm, conforme o projeto do secador permite. A Figura 4.2 apresenta os esquemas dos tipos de testes realizados. Para cada espessura existiu um teste considerado padrão, consistindo em fazer passar o ar quente pelos dois estágios no mesmo sentido, não reciclar o ar de saída e não utilizar tempo de repouso. Os outros testes incluíram as seguintes alterações:

- Reversão de fluxo: significa inverter o sentido do fluxo de ar entre o primeiro e o segundo estágio.

- Reciclagem de ar: significa reaproveitar o ar da saída do segundo estágio, misturando-o ao ar ambiente e passando novamente pelo aquecedor. Os níveis de reciclagem básicos são os seguintes:

- * 40/60: 40% de ar ambiente e 60% de ar reciclado.

- * 50/50: 50% de ar ambiente e 50% de ar reciclado.

- * 60/40: 60% de ar ambiente e 40% de ar reciclado.

Os valores de reciclagem obtidos variaram em torno destes três níveis, como pode ser observado na Tabela 4.1.

- Tempo de repouso: significa interromper o funcionamento do secador durante 3,5 h após 1 hora de operação. Como o fluxo de grãos foi de 600 kg/h, e a quantidade máxima de produto úmido para cada teste foi de 207 kg (teste 01), sabe-se que todo o produto passou pelo

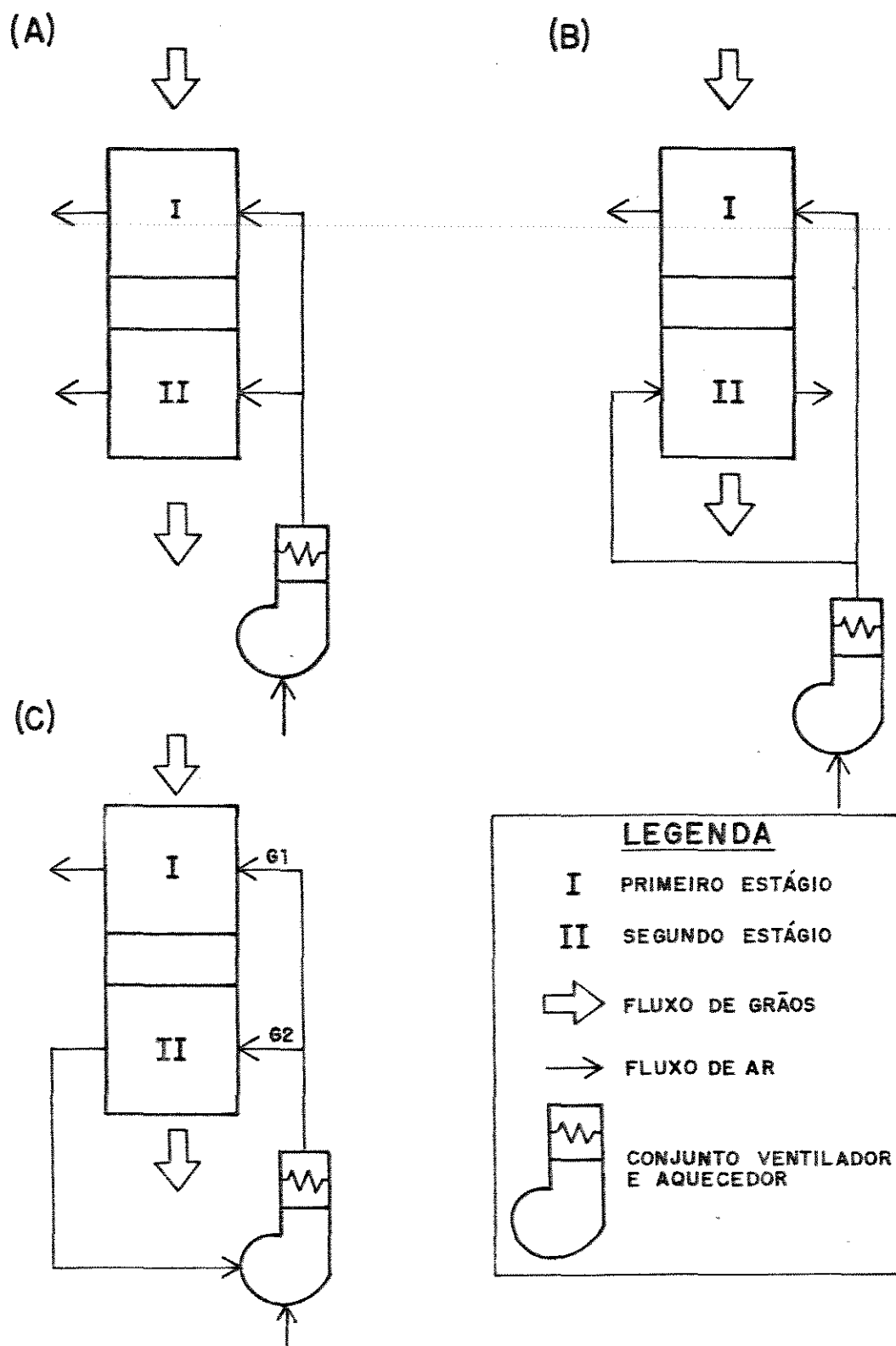


Fig.4.2- TIPOS DE TESTES REALIZADOS: (A) PADRÃO, (B) REVERSÃO E (C) RECICLAGEM, ONDE G1/G2 INDICA A TAXA DE RECICLAGEM.

menos uma vez pela câmara de secagem nesta primeira hora de operação.

Na Tabela 4.1 estão relacionados os testes realizados.

Tabela 4.1 - Condições experimentais dos testes

Teste n°	t (h)	M (kg)	e (cm)	Rev (sim,-)	Rec (amb/rec)	t _r (h)
01	3,0	207,2	30	-	-	-
02	3,0	129,4	20	-	-	-
03	2,5	129,2	20	sim	-	-
04	2,5	127,1	20	-	58/42	-
05	2,5	127,1	20	-	60/40	-
06	2,5	127,6	20	-	56/44	-
07	2,5	125,9	20	-	58/42	-
08	2,5	127,9	20	-	-	3,5
09	2,0	84,5	10	-	-	-
10	2,0	81,5	10	-	-	-
11	2,0	85,4	10	-	-	-
12	2,0	83,4	10	sim	-	-
13	2,0	81,6	10	sim	-	-
14	2,0	84,3	10	sim	-	-
15	2,0	85,2	10	-	54/46	-
16	2,0	85,0	10	-	54/46	-
17	2,0	83,3	10	-	54/46	-
18	2,0	85,1	10	-	56/44	-
19	2,0	81,3	10	-	55/45	-
20	2,0	81,3	10	-	41/59	-
21	2,0	124,7	10	-	-	3,5
22	2,0	122,5	10	-	40/60	-

Nesta Tabela, os parâmetros utilizados são os seguintes:

t: tempo de operação do secador em horas, sem considerar os 30 min de resfriamento

M : peso do produto úmido em kg.

e : espessura da coluna de grãos no secador, em cm.

Rev : reversão do fluxo de ar do segundo estágio.

Rec : reciclagem do ar de saída do segundo estágio, com indicação da razão ar ambiente/ar reciclado em termos de volume.

t_r : tempo de repouso em horas.

4.3.2. Obtenção dos dados

Neste item serão detalhados os métodos de obtenção de dados experimentais durante os testes.

4.3.2.1. Temperatura

Os dados de temperatura foram obtidos através do registrador de sinais SPEEDOMAX, a partir de termopares de cobre-constantan instalados em diversos pontos na câmara de secagem. A localização destes pontos está indicada na Figura 4.3. Os dados lidos no papel do registrador foram alterados por uma equação de calibração do equipamento, determinada previamente. O registrador foi acionado a cada leitura de temperatura.

Para temperatura de bulbo seco do ar na entrada e saída dos estágios, os termopares foram introduzidos nas coifas e fixados de modo que as pontas (sensores) ficassem no centro do estágio. Para medir a temperatura dentro da coluna de grãos foram fixados em um tubo de PVC de 2,0 cm de diâmetro, sustentado por uma haste metálica horizontal.

Para a temperatura de bulbo úmido, os sensores foram envolvidos em uma gaze cuja extremidade ficou mergulhada em água de um tubo de plástico transparente com 0,8 cm de diâmetro. Tanto o termopar quanto o tubo plástico foram fixados na tubulação de PVC de entrada ou saída do estágio. O tubo plástico estava ligado a um recipiente externo que permite o abastecimento de água.

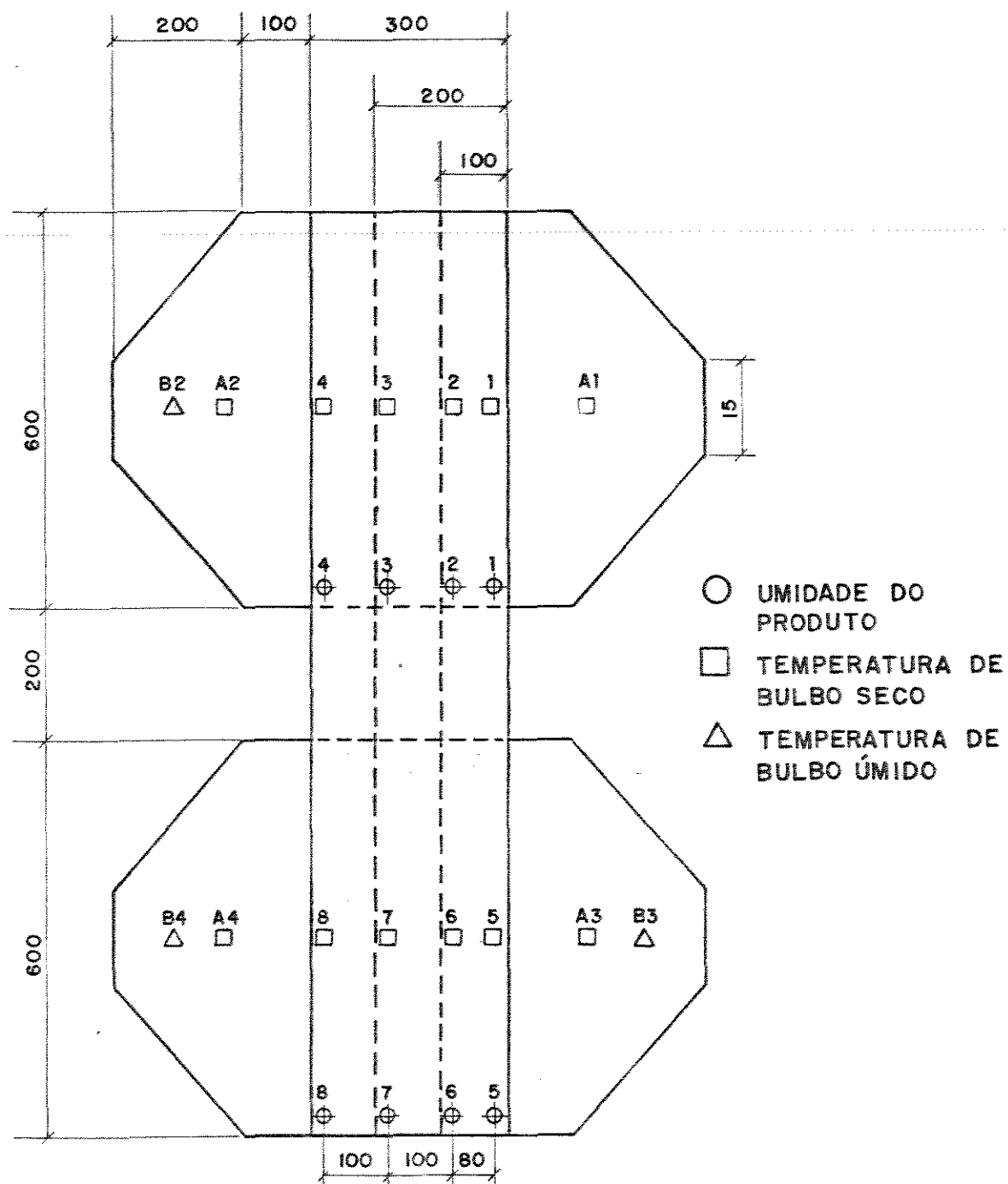


Fig. 4.3 – ESQUEMA DA CÂMARA DE SECAGEM, COM A LOCALIZAÇÃO DAS TOMADAS DE AMOSTRAS DE GRÃOS, TEMPERATURAS DE BULBO SECO E BULBO ÚMIDO.

A temperatura de bulbo seco e a umidade relativa do ambiente foram obtidas pelo higrôtermógrafo COLE PALMER colocado próximo ao ventilador.

4.3.2.2. Vazão de ar

A velocidade do fluxo de ar foi obtida através do anemômetro AIRFLOW. Este equipamento possui uma hélice com diâmetro de 10 cm, igual à saída das coifas dos estágios. A cada medição, o anemômetro foi colocado na saída da coifa e recebeu o fluxo durante 10 segundos antes de ser acionado para fornecer a leitura digital.

4.3.2.3. Umidade do produto

A amostra para umidade inicial foi retirada do centro do sacos, assim que foram abertos para o carregamento do secador. Foi retirada uma amostra de cada saco, que posteriormente foi dividida em três cápsulas para a determinação de umidade. A retirada de amostras da coluna de grãos foi feita com um tubo de 2 cm de diâmetro e 25 cm de comprimento, inserido nas aberturas da parede frontal da câmara de secagem. Os grãos foram recolhidos em pequenos sacos plástico, que foram fechados e colocados dentro de dessecadores. Foram tiradas amostras de 50 g, divididas em três cápsulas para a determinação de umidade. A determinação de umidade foi feita pelo método da estufa a 105 °C durante 24 horas. As cápsulas receberam cerca de 10 g de produto e

foram pesadas na balança MARTE.

4.3.2.4. Consumo de energia

Foi obtido o consumo de energia elétrica do aquecedor..... através da medição de tensão com o voltímetro SANWA, corrente através do aperímetro HEW SNAP e tempo por relógio digital CASIO. As medidas elétricas foram tomadas no painel de controle do aquecedor, onde estão os disjuntores de ligação das resistências e um voltímetro de menor precisão.

4.3.2.5. Renda e rendimento do produto

Foram retiradas três amostras de 100 g de saco de produto após a secagem. Estas amostras foram processadas na beneficiadora SUZUKI durante 1 min. A seguir foi feita a separação com um ajuste que permitiu que apenas os pedaços maiores que $3/4$ do grão ficassem junto com os grãos inteiros. As pesagens das amostras foram feitas na balança digital MARTE.

4.3.3. Operação

Após as fases de projeto, construção e montagem de todo o sistema de secagem e aquisição do produto iniciou-se a fase de testes para a tomada de dados. Esta fase teve início em maio de 1989, com a realização de 5 testes preliminares a fim de se conhecer o equipamento. Foi determinada a vazão

máxima permitida pelo sistema secador/elevador (600 kg/h de arroz a 21% BU). Em seguida foram eliminados os vazamentos de ar com massa plástica. Os testes incluíram as seguintes etapas:

- Montagem da tubulação conforme o tipo de teste.
- Operação temporária do ventilador e aquecedor para ajuste de temperatura. Isto é feito escolhendo-se quantas resistências elétricas serão acionadas e regulando o variador de tensão até que se obtenha a temperatura desejada. O sistema fica ligado por 10 minutos para o aquecimento da tubulação e paredes do secador.
- Pesagem do produto em balança de plataforma para sacos. Carregamento do produto úmido e tomada de amostras para determinação da umidade.
- Acionamento do elevador e ajuste da vazão de produto.
- Início da operação do ventilador e aquecedor.
- Medição da velocidade do ar na saída dos estágios e ajuste nas válvulas da tubulação, se necessário. Durante o teste são feitas medições a cada 20 min em média.
- Acionamento do registrador de temperatura após 5 min do início da operação seguindo-se leituras a cada 15 min.
- Tomadas de amostras de umidade a cada 15 min, alternando-se os estágios de onde elas são retiradas.
- Leituras das condições ambiente no higrotermógrafo a cada 20 min, em média.
- Leituras da tensão e corrente no aquecedor a cada 30 min ou quando é feito algum ajuste de temperatura através do variador de tensão.

- Passado o tempo de secagem determinado (2,5 ou 3 h), o aquecedor é desligado e promove-se o resfriamento do produto por 30 min.

As operações realizadas após cada teste foram as seguintes:

- Descarregamento do secador.
- Tomada de amostras para beneficiamento.
- Determinação de umidade a partir do método da estufa.

4.3.4. Tratamento dos dados experimentais

4.3.4.1. Uniformidade de secagem

A partir das curvas de umidade do produto (% BS) em relação ao tempo, calculou-se as diferenças entre os pontos extremos da coluna (entrada e saída do ar) para cada instante registrado. A média destas diferenças (denominado de gradiente de umidade) foi o parâmetro considerado para avaliar a uniformidade de secagem. Foram obtidos resultados para cada estágio e calculada a média entre eles.

4.3.4.2. Taxa de secagem

A partir dos dados de temperatura de bulbo seco do ambiente, da entrada e saída dos estágios, umidade relativa do ambiente e temperatura de bulbo úmido da saída dos estágios sabe-se os pontos na carta psicrométrica percorridos pelo ar durante o processo de secagem. Com os

dados de velocidade do ar e tempo de operação do teste calculou-se a taxa de secagem e o consumo específico de energia. Adotando-se as seguintes convenções:

Ponto 1: Ambiente.

Ponto 2: Entrada de ar do estágio.

Ponto 3: Saída de ar do estágio.

A taxa de secagem foi calculada pelo seguinte método:

$$Q_2 = 28,274 V_2 \quad (4.1)$$

$$vm_2 = \frac{Q_2}{v_2} \quad (4.2)$$

$$s = vm_2 (W_3 - W_2) \quad (4.3)$$

$$MA = s.t \quad (4.4)$$

Onde:

Q : Vazão de ar (m^3/h)

V : velocidade do ar (m/s)

28,274 : Área da tubulação ($0,00785 m^2$) x conversão de segundos para horas (3600 s/h) ($m^2.s/h$)

vm : vazão mássica de ar seco (kg_a/h)

v : volume específico do ar seco (m^3/kg_a)

MA : massa de vapor retirado no estágio (kgv)

W : umidade absoluta do ar (kgv/kg_a)

s : taxa de secagem no estágio (kgv/h)

t : tempo de duração do teste (h)

A taxa de secagem global foi calculada dividindo-se a massa de vapor retirada nos dois estágios pelo tempo do teste.

4.3.4.3. Eficiência energética

A eficiência energética da secagem foi avaliada pelo consumo específico de energia, definido como a energia gasta em MJ para retirar um kg de água do produto. Este consumo foi calculado a partir de diferenças de entalpia do ar.

4.3.4.4. Qualidade do produto final

Foi calculada a renda e o rendimento de grãos inteiros após cada teste. Para que fosse possível a comparação entre os rendimentos, estes valores foram calculados com base em uma renda de 68%, que é o valor aceito comercialmente. A comparações entre os valores foram avaliadas por análise de variância através do programa AOVONE (CHEWLETT PACKARD,1982).

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Considerações gerais

A forma adotada para a apresentação de resultados foi a divisão em espessura de coluna, reversão, reciclagem e tempo de repouso. No item espessura de coluna foram comparados os testes de mesmo tipo com espessuras diferentes, enquanto nos outros itens avaliou-se o efeito das alterações em relação ao teste padrão para a mesma espessura de coluna. A avaliação foi feita a partir dos parâmetros uniformidade de secagem, taxa de secagem, eficiência energética e qualidade do produto final (forma de cálculo definida no Capítulo 4).

A avaliação dos resultados considerou a média dos testes de mesmo tipo e também a comparação de testes com condições ambientais semelhantes. Os resultados dos parâmetros de avaliação são apresentados em tabelas. Para alguns testes são apresentados os gráficos de umidade e temperatura dentro da coluna de grãos. Os dados experimentais correspondentes a estes tipos de gráficos estão reunidos nos Apêndices A e B para todos os testes realizados.

A Tabela 5.1 apresenta os tipos de testes realizados.

Tabela 5.1 - Tipos de testes e condições ambientais.

TESTE n°	e cm	Rev sim/-	Rec amb/rec	tr h	Ta °C	URa %
1	30	-	-	-	18,7	62,5
2	20	-	-	-	22,7	42,7
3	20	sim	-	-	22,7	34,6
4	20	-	58/42	-	20,9	62,4
5	20	-	60/40	-	20,2	49,4
6	20	-	56/44	-	21,1	53,3
7	20	-	58/42	-	21,6	39,3
8	20	-	-	3,5	21,4	47,0
9	10	-	-	-	19,0	67,0
10	10	-	-	-	25,4	47,0
11	10	-	-	-	22,6	80,1
12	10	sim	-	-	20,7	40,3
13	10	sim	-	-	22,7	47,5
14	10	sim	-	-	24,3	47,2
15	10	-	54/46	-	24,8	45,0
16	10	-	54/46	-	26,9	39,0
17	10	-	54/46	-	29,2	40,0
18	10	-	56/44	-	28,7	43,1
19	10	-	55/45	-	28,1	41,5
20	10	-	41/59	-	21,2	63,0
21	10	-	-	3,5	19,4	73,0
22	10	-	40/60	-	23,7	53,0

5.2. Espessura de coluna

Os resultados dos testes preliminares indicaram que a espessura de 30 cm não era adequada para o secador em estudo devido à falta de uniformidade de fluxo de grãos e de ar dentro da coluna. Esta condição impediu a realização de testes com reversão e reciclagem. Os testes foram limitados às espessuras de 20 e 10 cm, com ênfase a esta última, pela menor quantidade de produto necessária para cada teste.

As Figuras 5.1 e 5.2 apresentam, respectivamente, a umidade do produto e temperatura durante o teste 2 (20 cm, sem reversão, sem reciclagem e sem tempo de repouso). Nas Figuras 5.3 e 5.4 estão a umidade do produto e temperatura

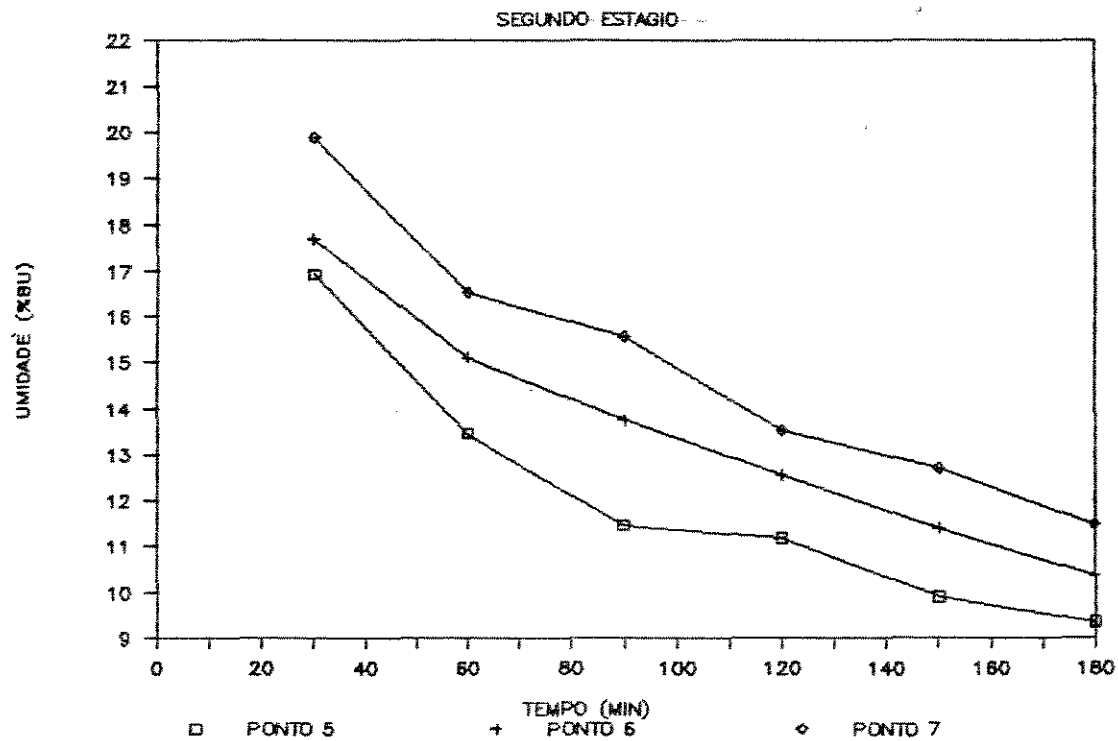
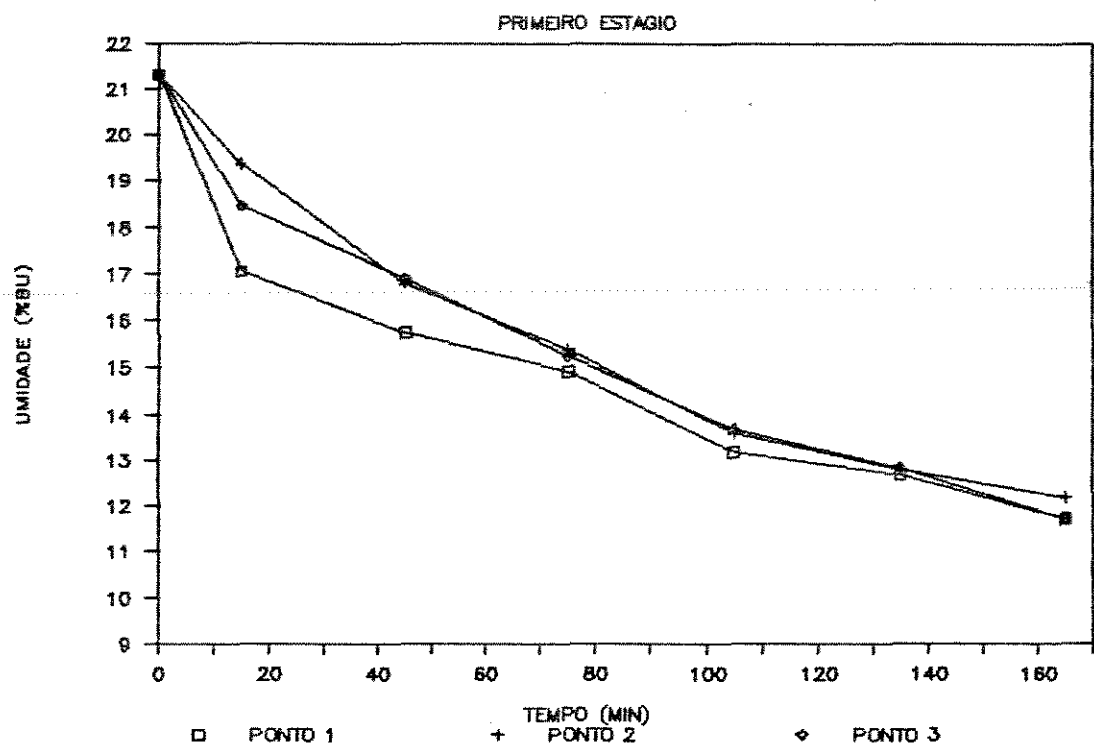


Figura 5.1 - Gráficos de umidade do produto (% BU) durante o Teste 2 (padrão de 20 cm de espessura).

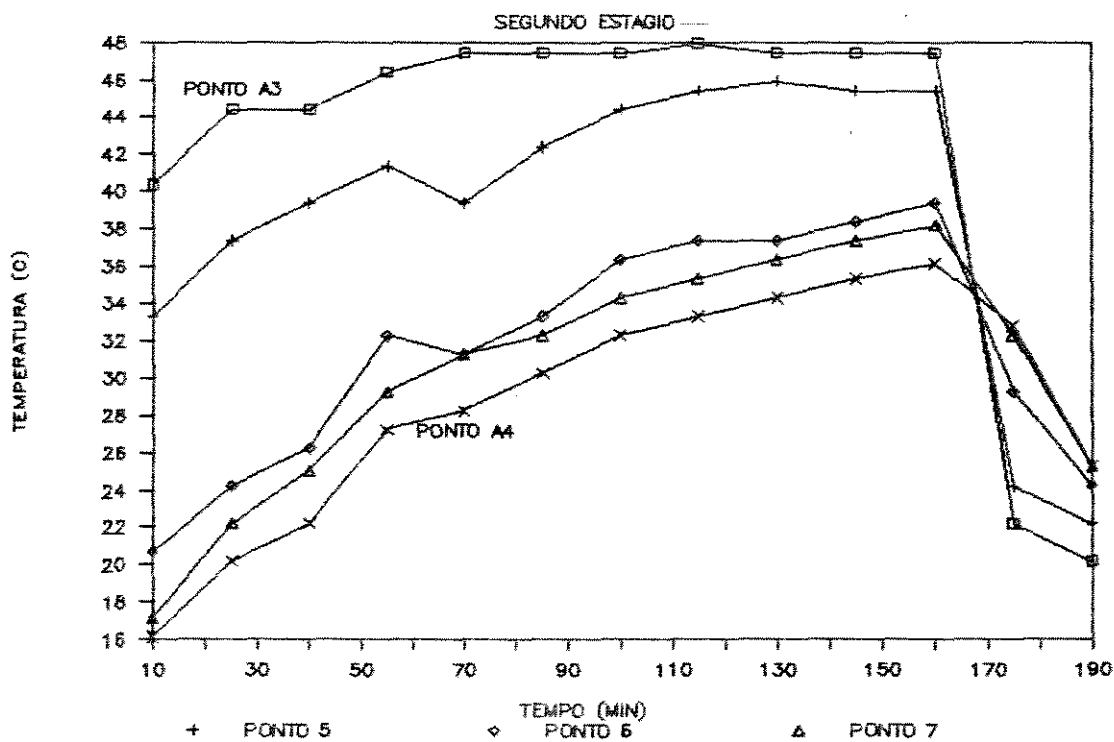
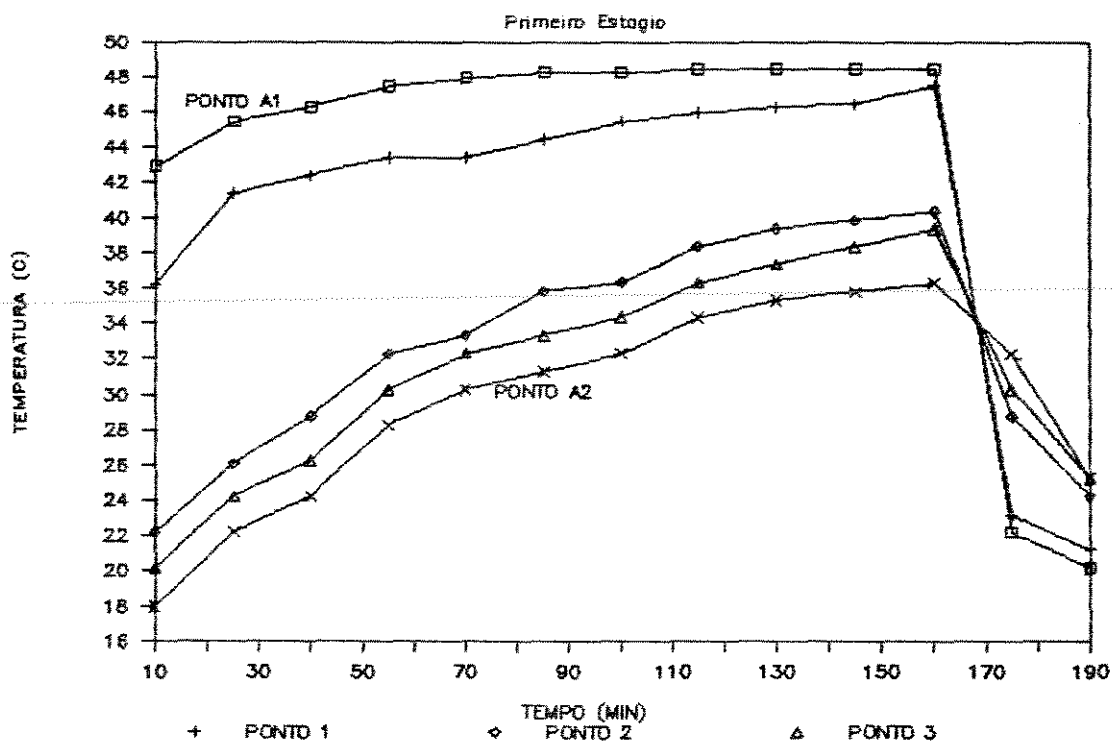


Figura 5.2 - Gráficos de temperatura do produto (°C) e do ar de entrada e saída no Teste 2 (padrão de 20 cm)

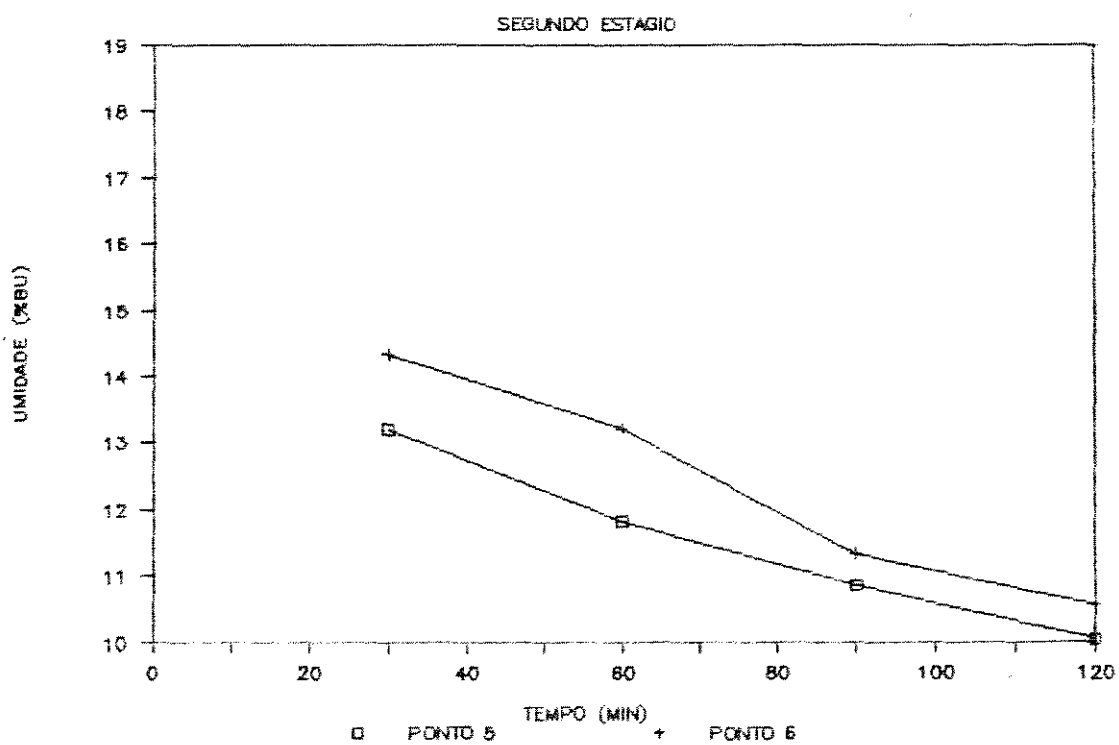
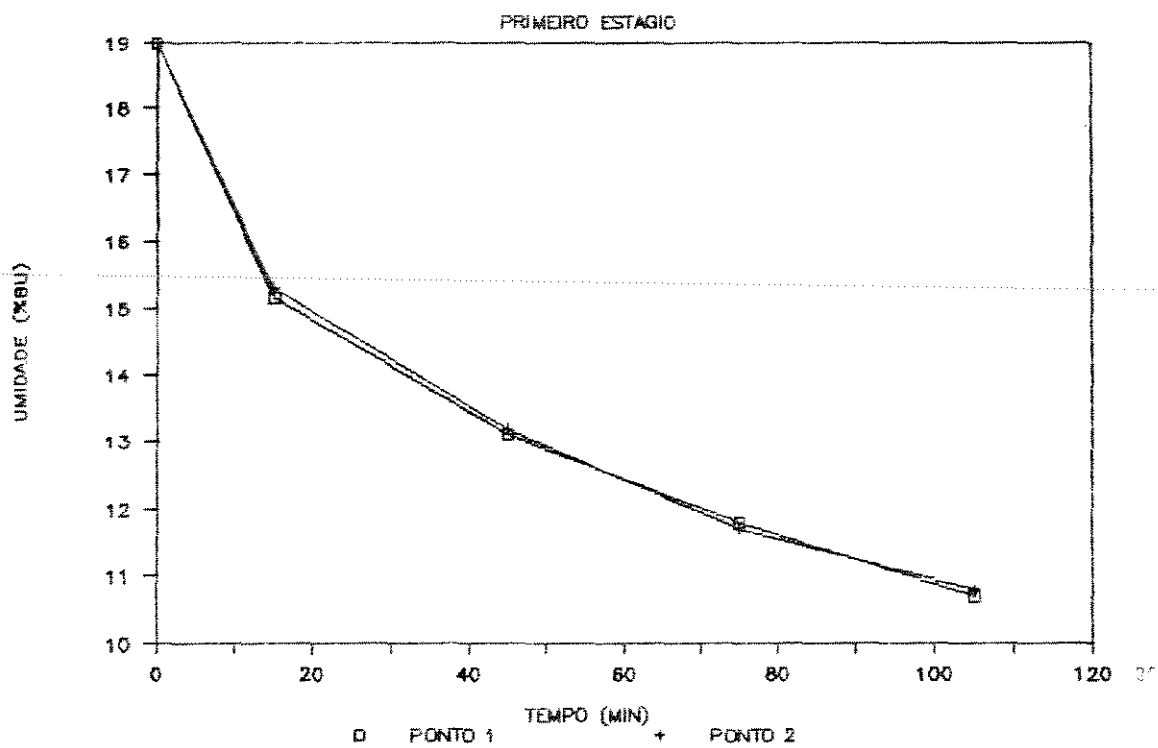


Figura 5.3 - Gráficos de umidade do produto (% BU) durante o Teste 10 (padrão de 10 cm)

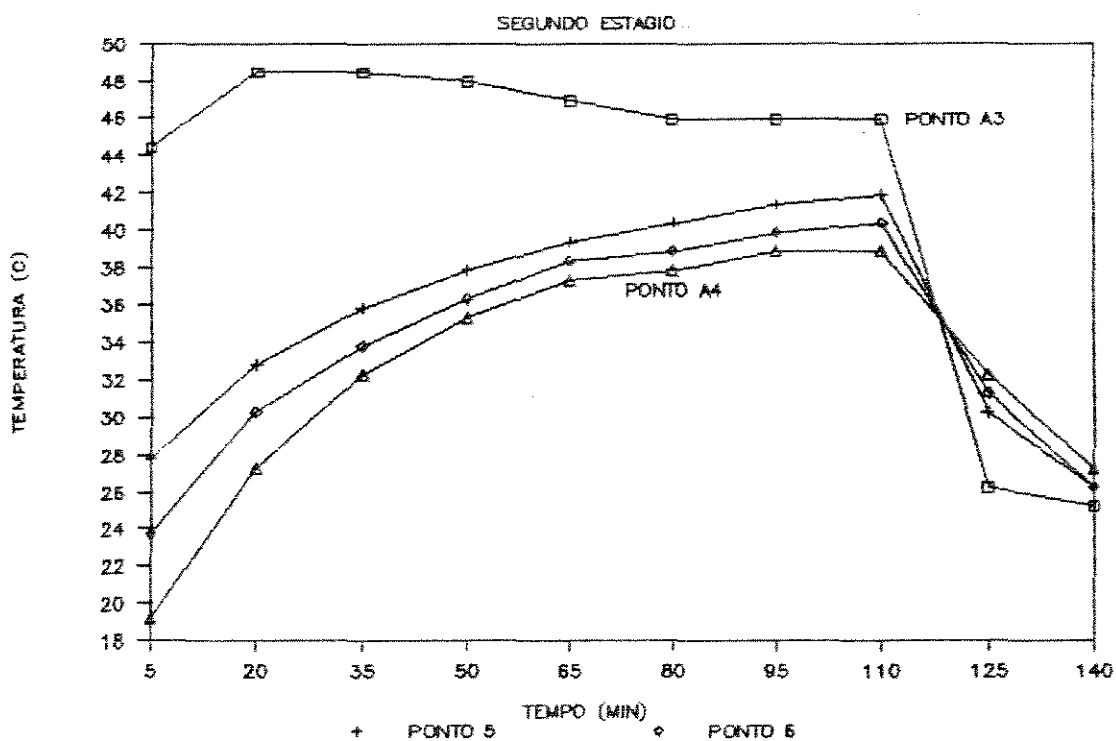
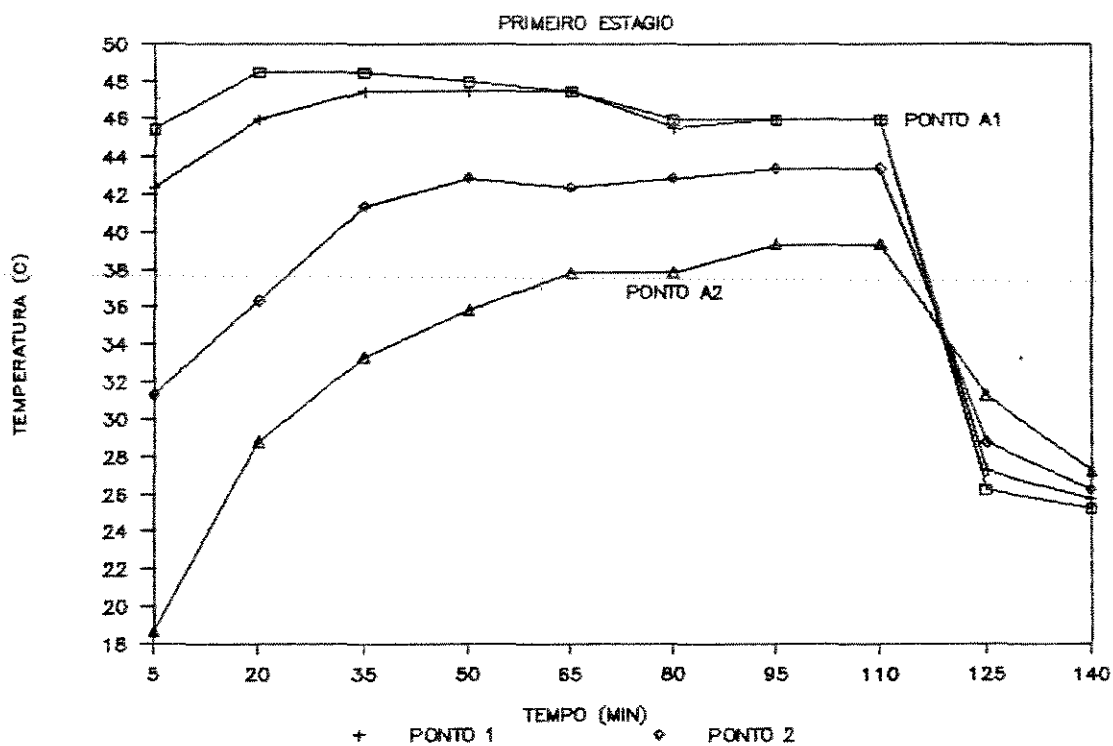


Figura 5.4 - Gráficos de temperatura (°C) do produto e ar de entrada e saída no teste 10 (padrão de 10 cm)

do teste 10 (10 cm, sem reversão, sem reciclagem e sem tempo de repouso). Os pontos indicados nos gráficos de umidade e temperatura correspondem aos indicados na Figura 4.3. Observa-se o mesmo padrão das curvas para as duas espessuras, com o primeiro estágio apresentando menor gradiente de umidade do que o segundo.

5.2.1. Uniformidade de secagem

Na Tabela 5.2 são apresentados os resultados de gradiente de umidade dos testes realizados. A diminuição do gradiente de umidade representa uma melhor uniformidade de secagem.

Tabela 5.2 - Gradiente de umidade na coluna de secagem

TESTE n°	G (% BS)		Média
	1° Est.	2° Est.	
01	4,42	15,95	10,18
02	0,84	3,91	2,37
03	0,77	2,28	1,52
04	1,22	4,49	2,85
05	1,44	4,17	2,80
06	0,66	5,99	3,32
07	1,02	4,21	2,61
08	1,16	4,10	2,63
09	0,35	0,58	0,46
10	0,14	1,15	0,64
11	0,42	0,58	0,50
12	0,36	0,64	0,50
13	0,36	0,64	0,50
14	0,16	0,35	0,25
15	0,79	1,01	0,90
16	0,49	1,33	0,91
17	0,14	0,88	0,51
18	0,26	1,26	0,76
19	0,34	0,86	0,60
20	0,56	1,24	0,90
21	0,46	1,20	0,83
22	0,24	1,66	0,95

O gradiente de umidade diminuiu 76,6% na média dos dois estágios com a mudança da espessura de coluna de 30 para 20 cm (comparação entre os testes 1 e 2, ambos sem reversão, sem reciclagem e sem tempo de repouso). O alto valor do gradiente de umidade no segundo estágio do teste 1 indica falta de uniformidade do fluxo de ar e de grãos.

A comparação entre o teste 2 (20 cm padrão) e a média dos testes 9, 10 e 11 (10 cm padrão) indicou uma diminuição de 77% no gradiente médio de umidade. Para os testes 2 e 10, que têm condições ambientais semelhantes, ocorreu uma queda de 73% no gradiente médio de umidade.

Entre os testes com reversão, a comparação entre o teste 3 (20 cm, com reversão, sem reciclagem e sem tempo de repouso) com a média dos testes 12, 13 e 14 (10 cm, com reversão, sem reciclagem e sem tempo de repouso) resultou em uma diminuição de 72% no gradiente de umidade pela mudança de espessura de 20 para 10 cm. Entre o teste 3 e o 13, de condições ambientais semelhantes, a diminuição no gradiente de umidade médio foi de 67%.

A comparação entre a média dos testes 4, 5, 6 e 7 (20 cm, sem reversão, vários níveis de reciclagem e sem tempo de repouso) e a média dos testes 15, 16, 17, 18, 19, 20 e 22 (10 cm, sem reversão, vários níveis de reciclagem e sem tempo de repouso) apresentou uma diminuição de 73% no gradiente médio de umidade.

Para os testes com tempo de repouso, a mudança da espessura de 20 cm (teste 8) para 10 cm (teste 21) apresentou uma diminuição de 68,4% no gradiente médio de

umidade

A mudança da espessura de 20 para 10 cm apresentou uma melhoria na uniformidade de secagem para qualquer configuração do secador (padrão, reversão, reciclagem ou tempo de repouso).

5.2.2. Taxa de secagem

Na Tabela 5.3. estão os resultados de taxa de secagem e eficiência energética dos testes realizados.

Tabela 5.3 - Taxa de secagem e consumo específico de energia dos testes realizados.

TESTE n°	s kgv/h	E MJ/kgv
01	5,01	3,21
02	3,18	3,92
03	2,06	5,32
04	2,72	3,59
05	2,92	3,40
06	2,40	3,22
07	2,91	3,49
08	3,36	3,44
09	2,40	6,29
10	3,02	4,99
11	2,42	5,48
12	2,88	6,18
13	2,74	6,04
14	2,90	5,56
15	2,44	4,04
16	2,47	3,41
17	3,02	3,25
18	2,42	3,72
19	2,56	3,73
20	3,57	3,47
21	1,85	6,54
22	1,79	3,74

A taxa de secagem diminuiu 36,5% com a mudança da

espessura de 30 (teste 1) para 20 (teste 2).

A comparação entre o teste 2 e a média dos testes padrão de 10 cm mostra uma queda de 18%. Entre os testes 2 e 10, de condições ambientais semelhantes, observamos uma queda de 5% na taxa de secagem.

Em relação à reversão, entre o teste 3 e a média dos testes 12, 13 e 14 observamos um aumento de 38% na taxa de secagem pela mudança da espessura de 20 para 10 cm. Entre o teste 3 e o teste 13, de condições ambientais semelhantes, ocorreu um aumento de 33%.

Para a reciclagem a comparação entre a média dos testes de 20 cm com a média dos testes de 10 cm demonstrou uma queda de 4,8% na taxa de secagem.

Para o tempo de repouso, a comparação entre os testes 8 e 21 apresentou uma queda de 45% na taxa de secagem.

A taxa de secagem diminuiu com a mudança de espessura de 20 para 10 cm, no caso dos testes padrão, nos testes com reciclagem e nos testes com tempo de repouso. A menor espessura faz com que o produto tenha maior velocidade dentro do secador, visto que o fluxo de grãos foi mantido em relação à espessura de 20 cm. Isto faz com que o grão atinja temperaturas menores do que para a espessura de 20 cm (Figuras 5.4 e 5.2), o que pode diminuir a taxa de secagem. Entretanto, para os testes com reversão, a taxa de secagem aumentou. Estes resultado quanto aos testes com reversão pode ser creditado à entrada de ar quente pelos dois lados do secador compensando o efeito citado acima.

5.2.3. Eficiência energética

O teste 2 apresentou um consumo específico de energia 22% maior do que o teste 1, que está de acordo com a redução da taxa de secagem.

A comparação entre o teste 2 (padrão de 20cm) e a média dos testes padrão de 10 cm apresentou um aumento de 42,5% no consumo específico de energia, que é coerente com a diminuição da taxa de secagem indicada no item anterior. Entre os testes 2 e 10, que têm condições ambientais semelhantes, ocorreu um aumento de 27% no consumo específico de energia, decorrente da menor umidade removida.

Em relação à reversão, a comparação entre o teste 3 (20 cm) e a média dos testes 12, 13 e 14 (10 cm) apresentou um aumento de 11,4% no consumo específico de energia com a mudança da espessura de 20 para 10 cm, apesar do aumento da taxa de secagem. Isto ocorreu porque o consumo de energia da média dos testes 12, 13 e 14 foi maior do que a teste 3, o que compensou a maior quantidade de umidade removida. Entre o testes 3 e 13, de condições ambientais semelhantes, ocorreu um aumento de 13,5%, também decorrente da maior energia gasta pelo teste 13, de espessura menor.

Quanto à reciclagem, a média dos testes de 10 cm apresentou um consumo específico de energia 6% maior do que a média dos testes de 20 cm, que é coerente com a diminuição da taxa de secagem.

Para o tempo de repouso, o teste 21 apresentou um consumo específico de energia 90% maior do que o teste 8,

que está de acordo com a diminuição da taxa de secagem.

5.2.4. Qualidade do produto final

Na Tabela 5.4 estão os resultados de qualidade do produto final dos testes realizados. A comparação entre estes testes foi feita entre os rendimentos de grãos inteiros baseados na renda de 68% (r₆₈).

Tabela 5.4 - Qualidade do produto final após os testes realizados.

TESTE n°	R (%)	ri (%)	r ₆₈ (%)
01	66,09	54,45	55,99
02	66,07	53,81	55,38
03	68,17	59,48	59,42
04	48,14	41,80	59,04
05	49,55	43,20	59,30
06	48,16	42,30	59,74
07	68,56	54,12	53,67
08	69,09	55,29	54,41
09	69,48	50,65	49,57
10	66,99	52,78	53,56
11	64,51	52,24	55,05
12	66,33	50,91	52,18
13	65,54	51,67	53,56
14	69,56	55,21	53,92
15	68,52	53,75	53,34
16	69,21	56,19	55,19
17	68,12	56,05	55,94
18	69,48	55,32	54,14
19	66,99	55,11	55,96
20	65,90	51,41	53,00
21	68,09	54,35	54,25
22	64,75	50,46	53,40

Entre os testes 1 e 2 observamos uma queda de 1% no rendimento de grãos inteiros com a diminuição da espessura de coluna.

Comparando-se o teste 2 com a média dos testes padrão de 10 cm (8, 9 e 10) observa-se uma queda de 4,8% no rendimento de grãos inteiros. Entre os teste 2 e 10, observa-se uma queda de 3,3%.

Quanto à reversão, entre o teste 3 e a média dos testes 12, 13 e 14 ocorreu uma queda de 10% no rendimento de grãos inteiros. Entre o teste 3 e o 10, de condições ambientais semelhantes, a queda foi de 10%.

Em relação à reciclagem, a média dos testes de 10 cm em rendimento de grãos inteiros ficou 6% menor do que a média dos testes de 20 cm.

Para o tempo de repouso, o teste 21 apresentou um rendimento de grãos inteiros 0,3% menor do que o teste 8.

Em todos os casos, os valores de rendimento situam-se acima dos aceitos comercialmente.

5.2.5. Resumo de espessura de coluna

Entre os testes padrão, a espessura de 10 cm apresentou diminuição de 76,6% no gradiente médio de umidade, diminuição de 5% na taxa de secagem, consumo específico de energia 42,5% maior e diminuição de 4,8% no rendimento de grãos inteiros em relação à espessura de 20 cm. Estes resultados, principalmente quanto ao consumo específico de energia, inviabilizam o uso da espessura de 10 cm.

Entre os testes com reversão de fluxo, com a espessura de 10 cm houve uma diminuição de 72% no gradiente de umidade, aumento de 38% na taxa de secagem, aumento de 11,4%

no consumo específico de energia e diminuição de 10% no rendimento de grãos inteiros. Neste caso, temos resultados positivos quanto ao gradiente médio de umidade, taxa de secagem e um aumento do consumo específico de energia menor do que nos testes padrão. Estes resultados viabilizam a configuração de 10 cm.

Entre os testes com reciclagem, o gradiente médio de umidade diminuiu 73%, a taxa de secagem diminuiu 4,8%, o consumo específico de energia aumentou 6% e o rendimento de grãos inteiros diminuiu 6% com a mudança de 20 para 10 cm. Com exceção do gradiente de umidade, os resultados não apresentam diferenças que justifiquem a modificação. São opções equivalentes de configuração.

5.3. Reversão de fluxo

As Figuras 5.5 e 5.6 apresentam as curvas de umidade (% BU) e temperatura (°C) do Teste 12 (10 cm, com reversão, sem reciclagem e sem tempo de repouso). No gráfico de umidade observamos o efeito da reversão de fluxo pela aproximação das curvas em relação à Figura 5.3. no segundo estágio. Esta aproximação representa uma diminuição do gradiente de umidade

5.3.1. Uniformidade de secagem

Entre os testes 2 e 3 observa-se uma diminuição de 8,3% no gradiente de umidade do primeiro estágio.

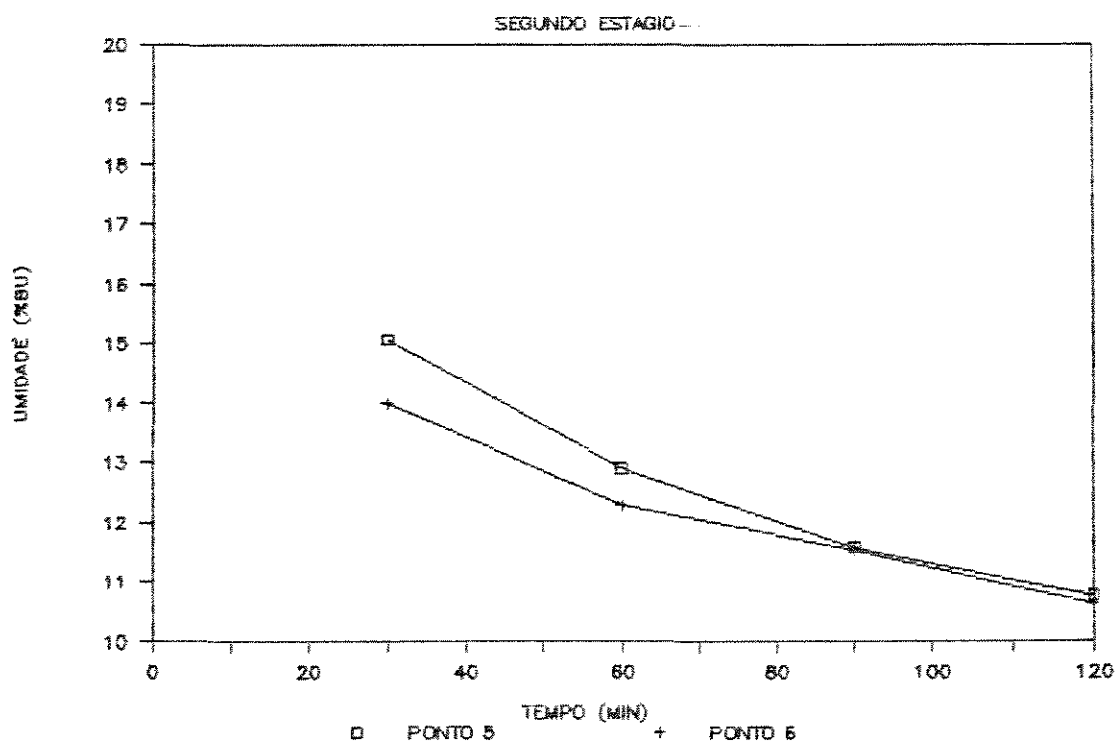
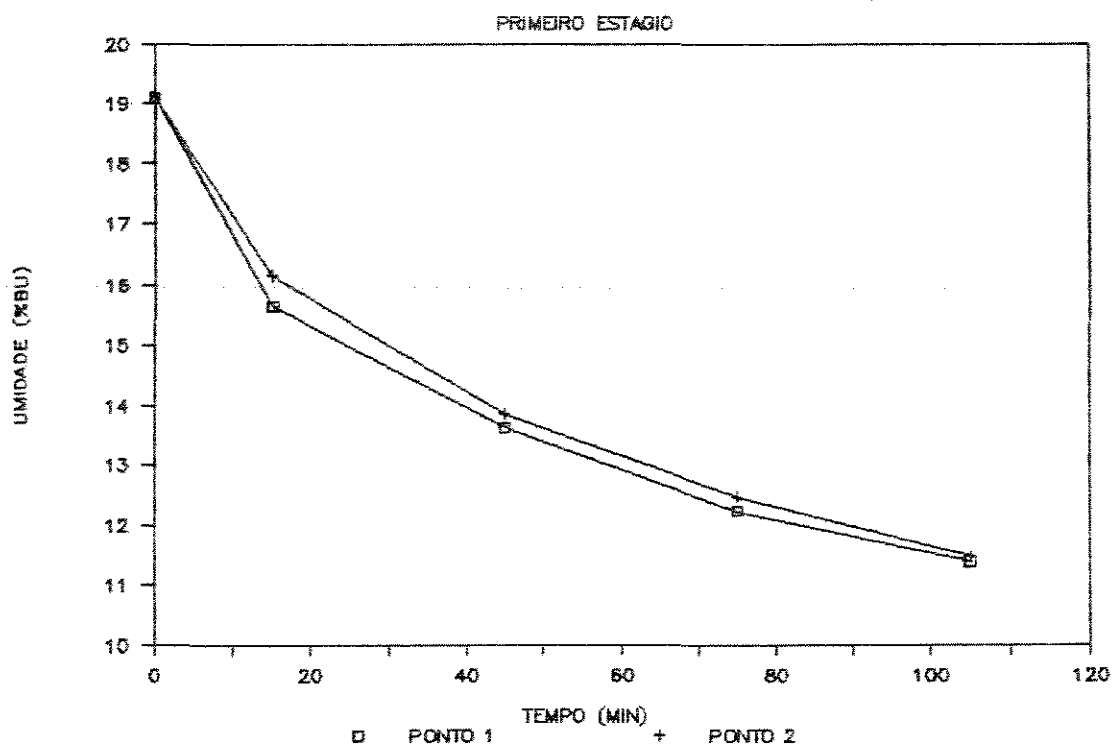


Figura 5.5 - Umidade (% BU) durante o Teste 12 (10 cm, reversão, sem reciclagem e sem t. de repouso).

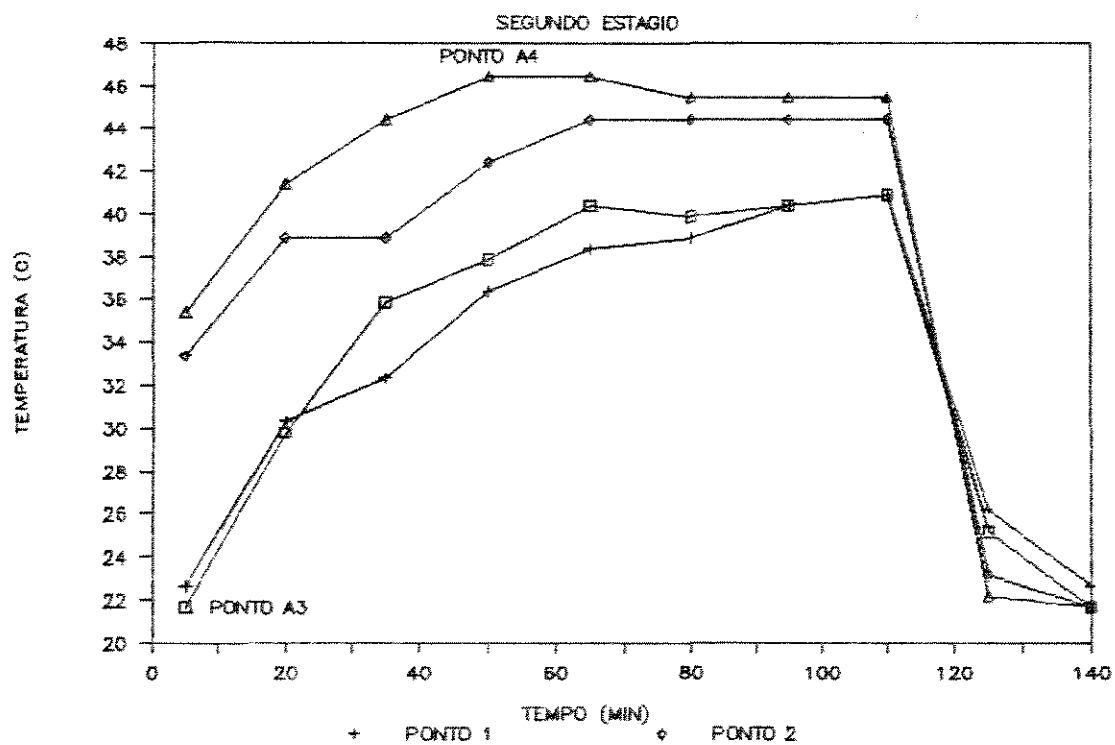
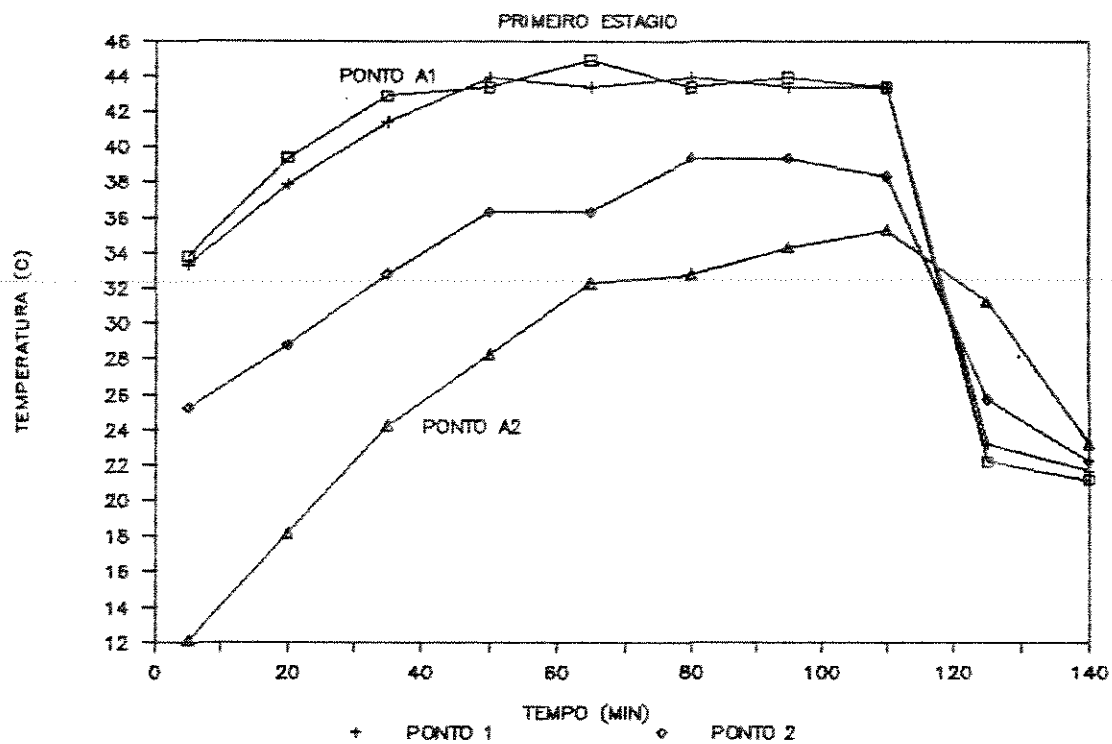


Figura 5.6 - Temperatura do produto e ar (°C) no Teste 12
(10 cm, reversão, sem rec. e sem t. de repouso)

Para a espessura de 10 cm, comparando-se a média dos testes padrão (9, 10 e 11) com a média dos testes com reversão (12, 13 e 14) observamos uma queda de 3,3%. Entre os testes 10 e 14, que tem condições ambientais semelhantes, ocorreu um aumento de 14,3% no gradiente do primeiro estágio.

5.3.2. Taxa de secagem

Entre os testes 2 e 3 ocorreu uma redução de 35,2% na taxa de secagem.

Para a espessura de 10 cm, entre a média dos testes padrão e a média dos testes com reversão ocorreu um aumento de 8,6% na taxa de secagem. Entre os testes 10 e 14, de condições ambientais semelhantes, ocorreu uma diminuição de 4% na taxa de secagem.

5.3.3. Eficiência energética

Entre os testes 2 e 3 (20 cm) observamos um aumento de 36% no consumo específico de energia, pela utilização da reversão de fluxo.

Para a espessura de 10 cm, a média dos testes com reversão apresentou um consumo específico de energia 6% maior do que a média dos testes padrão. Entre os testes 10 e 14, de condições ambientais semelhantes, ocorreu um aumento de 11%.

5.3.4. Qualidade do produto final

Entre os testes 2 e 3 ocorreu um aumento de 7,3% no rendimento de grãos inteiros.

Para a espessura de 10 cm, a média dos testes com reversão apresentou um rendimento 0,9% maior do que a média dos testes padrão. O teste 14 apresentou um rendimento de grãos inteiros 0,7% maior do que o teste 10, de condições ambientais semelhantes.

5.3.5. Resumo de reversão de fluxo

Para os testes de 20 cm a reversão representou uma diminuição de 35,8% no gradiente médio de umidade, redução de 35,2% na taxa de secagem, aumento de 36% no consumo específico de energia e aumento de 7,3% no rendimento. Estes resultados combinados mostram um desempenho pior do secador com reversão, pois os resultados positivos quanto ao gradiente de umidade e rendimento de grãos inteiros são superados pelos resultados negativos quanto à taxa de secagem e consumo específico de energia. Por isto a reversão de fluxo não é indicada para a espessura de 20 cm.

Para os testes de 10 cm, a reversão representou uma diminuição de 21% no gradiente de umidade, aumento de 8,6% na taxa de secagem, aumento de 6% no consumo específico de energia e aumento de 0,9% no rendimento. A combinação destes parâmetros mostra que a reversão teve efeito que justifica a sua utilização para a espessura de 10 cm.

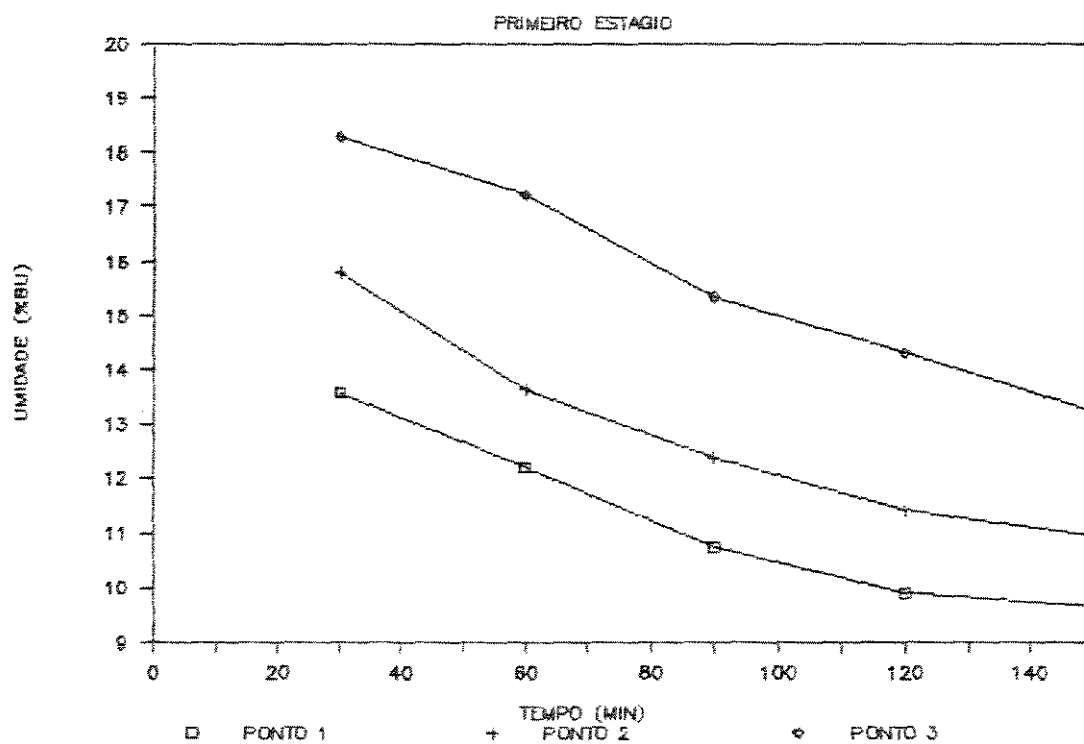
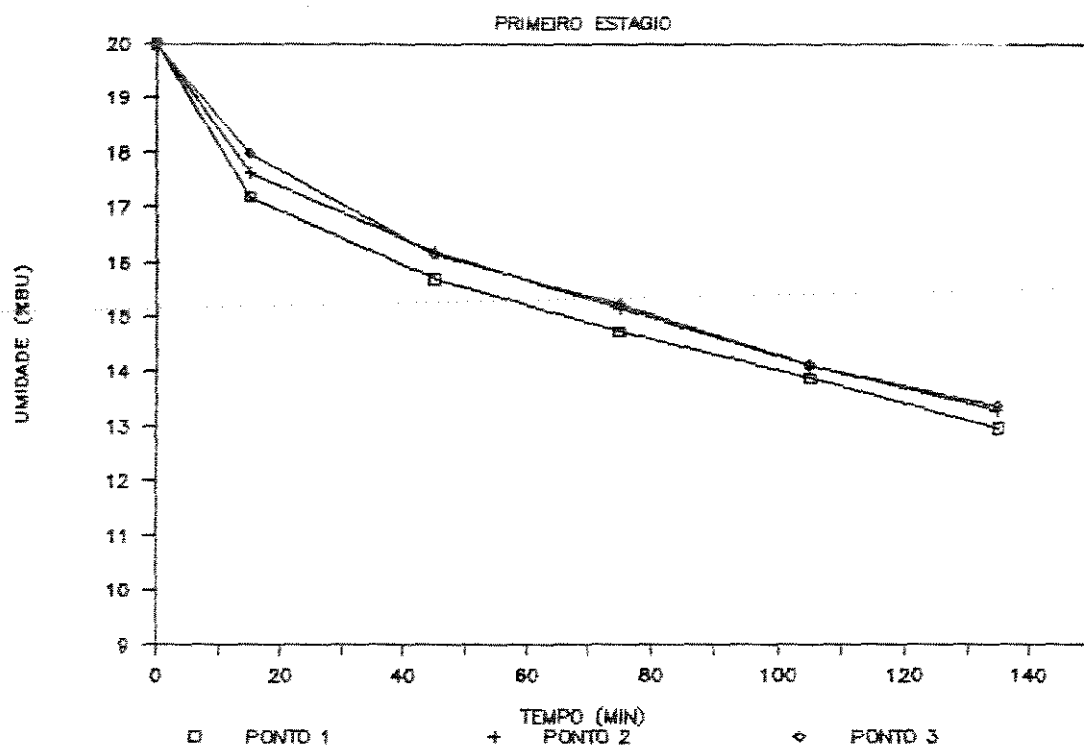


Figura 5.7 - Umidade do produto no Teste 6 (20 cm, s/ rev, com reciclagem de 56/44 e sem t. de repouso)

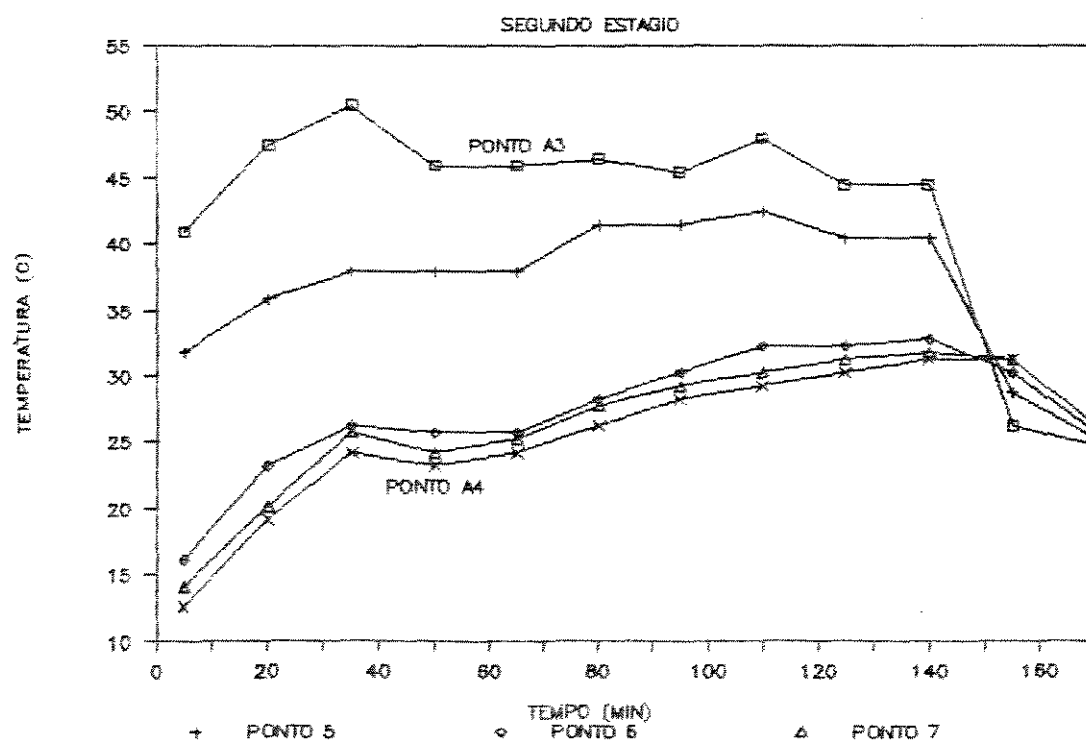
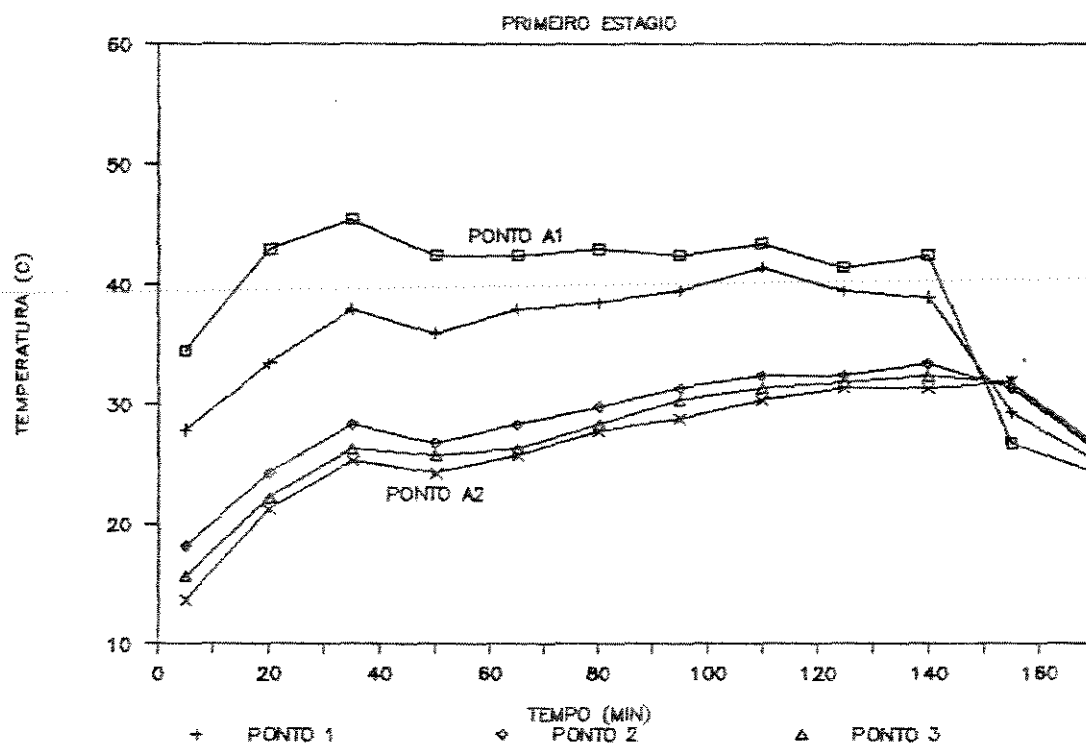


Figura 5.8 - Temperatura do produto e ar (°C) no Teste 6 (20 cm, s/ rev, reciclagem de 56/44 e s/ t. repouso)

5.4. Reciclagem de ar

Nas Figuras 5.7 e 5.8 estão, respectivamente, as curvas de umidade e temperatura para o teste 18 (10 cm. sem reversão, com reciclagem e sem tempo de repouso).

Comparando-se as Figuras 5.7 e 5.8 com as Figuras 5.1 e 5.2 observa-se uma manutenção do padrão das curvas, apenas com um ligeiro afastamento das curvas de umidade no segundo estágio da Figura 5.7 em relação à Figura 5.1. Este afastamento pode ser creditado à menor taxa de secagem nos testes com reciclagem, principalmente no segundo estágio, devido à instalação da tubulação na saída do ar. Esta tubulação aumenta a perda de carga no sistema, dificultando o fluxo de ar.

5.4.1. Uniformidade de secagem

A média dos testes com reciclagem para a espessura de 20 cm (4, 5, 6 e 7) foi 22% maior do que o valor do teste padrão (2) quanto ao gradiente de umidade. O teste 5 apresentou um valor de gradiente de umidade 10% maior do que o teste 2, de condições ambientais semelhantes.

Para a espessura de 10 cm, a média dos testes com reciclagem (15, 16, 17, 18, 19, 20 e 22) para o gradiente médio de umidade ficou 57,6% maior que a média dos testes padrão (9, 10 e 11). O teste 15 apresentou um gradiente de umidade 39,5% maior do que o teste 10, que tem condições ambientais semelhantes.

5.4.2. Taxa de secagem

Para a espessura de 20 cm, a taxa de secagem média dos testes com reciclagem (2,74 kgv/h) ficou 14% menor do que o teste padrão (3,18 kgv/h). O teste 7 apresentou uma taxa de secagem 8,5% menor do que o teste 2, com condições ambientais semelhantes.

Para a espessura de 10 cm, a taxa de secagem média para os testes com reciclagem resultou igual à média dos testes padrão (2,61 kgv/h). O teste 15 apresentou uma taxa de secagem 19,2% menor do que o teste 10, de condições ambientais semelhantes.

5.4.3. Eficiência energética

Para a espessura de 20 cm, o consumo específico de energia médio dos testes com reciclagem ficou 12% menor do que o teste padrão. O teste 7 apresentou um consumo específico 11% menor do que o teste 2, de condições ambientais semelhantes.

Para a espessura de 10 cm, a média dos testes com reciclagem apresentou uma queda de 35% no consumo específico de energia em relação à média dos testes padrão. O teste 15 apresentou um consumo 19% menor do que o teste 10, de condições ambientais semelhantes.

5.4.4. Qualidade do produto final

Para a espessura de 20 cm, o rendimento médio de grãos inteiros para os testes com reciclagem ficou 4,6% maior do que o teste padrão. O teste 7 apresentou um rendimento de grãos inteiros 3,08% menor do que o teste 2 (padrão), de condições ambientais semelhantes. Para esta comparação a análise de variância indicou que há diferença significativa entre as médias ao nível de 5% de probabilidade, mas não ao nível de 1%.

Para a espessura de 10 cm, o rendimento médio de grãos inteiros dos testes com reciclagem ficou 4,6% menor do que a média dos testes padrão. O teste 15 apresentou um rendimento de grãos inteiros 0,4% menor do que o teste 10, de condições ambientais semelhantes.

5.4.5. Resumo de reciclagem de ar

Para os testes de 20 cm a reciclagem representou um aumento de 22% no gradiente de umidade, diminuição de 14% na taxa de secagem, consumo específico de energia 12% menor e rendimento de grãos inteiros 4,6% maior. Neste caso a opção de reciclagem é válida pois o valor de gradiente para os testes com reciclagem foi de 2,9% BS, que é bastante aceitável.

Para os testes de 10 cm a reciclagem representou um aumento de 47,6% no gradiente de umidade, taxa de secagem igual, diminuição de 35% no consumo específico de energia e

diminuição de 4,6% no rendimento. Novamente a opção de reciclagem se justifica, pelos resultados de consumo específico de energia e pelo baixo valor de gradiente de umidade, que foi de 0,8% BS.

5.5. Tempo de repouso

5.5.1. Uniformidade de secagem

Para a espessura de 20 cm, o teste 8 apresentou um gradiente de umidade 38% maior do que o teste 2 (padrão) para o primeiro estágio.

Para a espessura de 10 cm, o gradiente de umidade do teste ficou 51% maior do que a média dos testes padrão. O teste 21 apresentou um gradiente de umidade 9,5% maior do que o teste 11, de condições ambientais semelhantes.

5.5.2. Taxa de secagem

Para a espessura de 20 cm, o teste 8 apresentou uma taxa de secagem 5,6% maior do que o teste 2 (padrão).

Para a espessura de 10 cm, o teste 21 apresentou uma taxa de secagem 29% menor do que a média dos testes padrão. A taxa de secagem do teste 21 ficou 23% menor que a do teste 11, de condições ambientais semelhantes.

5.5.3. Eficiência energética

Para a espessura de 20 cm, o teste 8 apresentou um consumo específico de energia 12% menor do que o teste 2 (padrão).

Para a espessura de 10 cm, o teste 21 apresentou um consumo específico de energia 17% maior do que a média dos testes padrão. Em relação ao teste 11, de condições ambientais semelhantes, o consumo específico de energia ficou 16% maior.

5.5.4. Qualidade do produto final

Para a espessura de 20 cm, o teste 8 apresentou um rendimento de grãos inteiros 2% menor do que o teste padrão. A análise de variância indicou que não existe diferença significativa entre os valores de rendimento ao nível de 5% de probabilidade.

Para a espessura de 10 cm, o teste 21 apresentou um rendimento 3% menor do que a média dos testes padrão, mantendo-se acima dos níveis aceitos comercialmente. Em relação ao teste 11, o teste 21 apresentou um rendimento 1,5% menor.

5.5.5. Resumo de tempo de repouso

Para os testes de 20 cm, o tempo de repouso apresentou um gradiente de umidade 10,7% maior, taxa de secagem 5,6%

maior, consumo específico de energia 12% menor e rendimento de grãos inteiros 2% menor. Estes resultados justificam a sua aplicação.

Para os testes de 10 cm, o tempo de repouso apresentou um gradiente de umidade 55% maior, taxa de secagem 29% menor, consumo específico de energia 17% maior e rendimento 3% menor. Estes resultados não justificam a sua aplicação.

6. CONCLUSÕES

Para um processo de secagem de arroz variedade IAC 4440 tipo longo fino fluxo cruzado efetuado com temperatura de ar a 45,4 °C, fluxo de ar de 15,52 m³/min.m² e fluxo de grãos de 600 kg/h, considerando a combinação dos parâmetros gradiente médio de umidade, taxa de secagem, eficiência energética e qualidade do produto final, as conclusões sobre as alterações de projeto são as seguintes:

- A diminuição da espessura de coluna de 20 para 10 cm não apresenta resultados satisfatórios para a configuração padrão do secador. Para a configuração com reciclagem a níveis entre 40/60 e 60/40 a espessura de 10 cm oferece resultados equivalentes aos da espessura de 20 cm. A espessura de 10 cm apresenta melhores resultados do que 20 cm para a configuração com reversão de fluxo.

- A reversão de fluxo de ar produz melhores resultados para a espessura de 10 cm e não para a de 20 cm em relação à configuração padrão.

- A reciclagem de ar a níveis entre 40/60 a 60/40 produz melhores resultados para as espessuras de 20 e 10 cm em relação à configuração padrão.

- O tempo de repouso de 3,5 h aparentemente é adequado para a espessura de 20 cm e não para a espessura de 10 cm em relação ao teste padrão.

- A melhor configuração encontrada para o secador em estudo é o uso de espessura de 10 cm, sem reversão, reciclagem à taxa de 54/46 e sem tempo de repouso. Esta conclusão baseia-se nos resultados do teste 17, com gradiente médio de umidade de 0.51% BS, taxa de secagem de 3,02 kgv/h, consumo específico de energia de 3,25 MJ/kgv e rendimento de grãos inteiros de 55.94 baseado em renda padrão de 68%

7. BIBLIOGRAFIA

BAKKER-ARKEMA, F.W.; S.F. De BOER; L.E. LEREW ; M. G. ROTH .
1973. "Energy conservation in grain dryers: I -
Performance Evaluation". ASAE Paper no. 73-324.
St. Joseph, MI.

BAKKER-ARKEMA, F.W.; C. FONTANA ; I.P. SCHISLER . 1983.
"Comparison of rice drying systems". ASAE Paper no.
83-3532. St. Joseph, MI.

BAKKER-ARKEMA, F.W.; L.E. LEREW; R.C. BROOK; D.B. BROOKER.
1978. "Energy and capacity performance evaluation of
grain dryers". ASAE Paper no. 78-3523. St. Joseph, MI.

BAKSHI, A.S.; R.P. SINGH; C.Y. WANG ; J.F. STEFFE. 1978.
"Energy costs of a conventional and air recycling cross
flow rice dryer". ASAE Paper no. 78-3011. St. Joseph, MI.

BANESPA. 1988. Banespa Agropecuário, ano V n. 53, pag 01.
São Paulo, SP.

BEENY, J.M. & S.C. NGIN . 1970. "Multipass drying of paddy (rice) in the humid tropics". Jr. Agric. Engr. Res., 15(4): 364-374.

BROOKER, D.B; F.W. BAKKER-ARKEMA; C.W. HALL . 1974. Drying Cereal Grain. The AVI Publishing Co. Inc. Westport, CT.

CALDERWOOD, D.L. & B.D.WEBB. 1971. "Effect of the method of dryer operation on performance and on the milling and cooking characteristics of rice". TRANS. of the ASAE, 14(1):142-146.

CAMPOS, T. & V. CANÊCHIO FILHO. 1973. Principais Culturas, Instituto Campineiro de Ensino Agrícola, Campinas, SP. 2a. ed., Vol I, 128-174.

CENERGS, 1984. A lenha e seus derivados no Balanço Energético do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, FEE, 62 p.

EZEIKE, G.O.I. & L. OTTEN, 1981. "Theoretical analysis of the tempering phase of a cyclic drying process". TRANS. of the ASAE, 24(6): 1590-1594.

GUIA RURAL Abril, 1988. Anuário 1988. Editora Abril, São Paulo, pg. 246.

HEWLETT PACKARD, Analysis of Variance (One Way), in HP 41C Stat Pac, Corvallis, 18-21, 1982.

INSTITUTO RIOGRANDENSE DO ARROZ, 1983. Anuário Estatístico do Arroz. Porto Alegre, RS.

IBGE, 1987. Anuário Estatístico do Brasil 1986. Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, vol 47, p 279. Rio de Janeiro, RJ.

KUNZE, O.R. 1979. "Fissuring of the rice grain after heated air drying". TRANS. of the ASAE, 22(5): 1197-1201,1207.

LACERDA FILHO, A.F.; D.M. QUEIROZ; G. ROA. 1982. "Avaliação experimental de secador comercial intermitente de arroz". Rev. Bras. de Armazenamento, 7(1): 39-49.

LEREW, L.E.; F.W. BAKKER-ARKEMA; R.C. Brook, 1972. "Simulation of a commercial crossflow dryer - The Hart Carter model". ASAE Paper n 72-829. St. Joseph, MI.

MOREY, R.V.; H.A. CLOUD; W.E. LUESCHEN. 1976. "Practices for the efficient utilization of energy for drying corn". TRANS of the ASAE, 19(1): 151-155.

MOREY, R.V.; H.A. CLOUD. 1973. "Simulation and evaluation of a multiple column crossflow grain dryer". TRANS. of the ASAE, 16(5): 984-987.

NELLIST, M.E. 1982. "Developments in continuous flow grain driers". The Agricultural Engineering, Autumn, 74 -80.

NOYES, R.T. 1978. " The present status of commercial grain drying - Superb - Optimum continuous cross-flow grain dryer". ASAE Paper no. 78-3008. St. Joseph, MI.

PAULSEN, M.R & T.L. THOMPSON, 1973. "Effects of reversing airflow in a crossflow grain dryer" TRANS. of the ASAE , 16(3): 541-545.

PEREIRA, J.T.V. 1985. Sistema autônomo de secagem. Tese de Doutorado, Faculdade de Engenharia de Campinas, Unicamp, Campinas, SP.

PIERCE, R.O. & T.L. THOMPSON, 1981. "Energy use and performance related to crossflow dryer design". TRANS. of the ASAE. 24(1): 216-220.

PORTER, H.F.; G.A. SCHURR; D.F.WELLS; K.T. SEMRAU. 1984. "Solids Drying and Gas-Solid systems". In Perry's Chemical Engineers Handbook. McGraw-Hill, 6a. ed. New York. sec. 20.

PUZZI, D. 1986. Abastecimento e Armazenagem de grãos. Instituto Campineiro de Ensino Agrícola, 3a. ed., Campinas, SP.

SABIONI, P.M. 1986. Projeto e avaliação de um secador de fluxos cruzados, intermitente e com reversão de fluxo de ar, na secagem de milho (Zea mays L.). Tese de Mestrado. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

SHARMA, A.D. & O.R. KUNZE. 1962. "Post-drying fissure developments in rough rice". TRANS. of the ASAE, 25(1): 465-468, 474.

SCHMIDT, J.L. & E.H. JEBE. 1959. "The effect of artificial drying on the yield of head rice and the germination of rice". TRANS. of the ASAE, 2(1): 26- 29,31.

STEFFE, J.F.; R.P. SINGH ; A.S. BAKSHI, 1978 "Influence of Tempering Time an Cooling on Rice Milling Yield and Moisture Removal". ASAE Paper no. 78-3055. St. Joseph, MI.

STEVENS, G.R. & T.L. THOMPSON. 1976. " Improving cross-flow grain drier design using simulation". TRANS. of the ASAE, 19(4): 778-781.

THOMPSON , T.L.; R.M. PEART; G.H. FOSTER. 1966. "Matematical simulation of corn drying - A new model". TRANS. of the ASAE, 11(4): 582-586.

WALKER, L. P. & F. W. BAKKER-ARKEMA, 1978. "Energy Efficiency in Concurrent Flow Rice Drying". ASAE Paper n. 78-3540. ST. Joseph, MI.

..... YOUNG, J. H. & J. W. DICKENS, 1975. "Evaluation of costs for
drying grain in batch or cross-flow systems". TRANS. of
the ASAE, 18(4): 734-739.

APENDICES

APENDICE A - Tabelas de unidade do produto (% BU)

Tabela A.1 - Unidade do produto (%BU) durante o
Teste 1, no segundo estágio.

TEMPO (MIN)	PONTOS			
	1	2	3	4
0	19.66	19.66	19.66	19.66
15	15.66	19.10	19.94	19.62
45	16.36	18.12	18.83	19.92
75	14.79	16.54	17.46	18.80
105	13.82	14.91	15.55	17.58
135	13.41	14.28	15.16	15.60
165	12.54	13.13	13.29	13.51

Tabela A.2 - Unidade do produto (%BU) durante o
Teste 1, no segundo estágio.

TEMPO (MIN)	PONTOS			
	5	6	7	8
30	17.77	24.23	24.36	24.88
60	12.79	17.88	20.52	24.70
90	9.94	15.07	18.17	22.66
120	8.99	12.53	17.50	21.60
150	8.48	10.40	13.56	20.34
180	8.45	9.93	13.41	18.79

Tabela A.3 - Umidade do produto (%BU) durante o Teste 2, no primeiro estágio.

TEMPO (MIN)	1	PONTOS 2	3
0	21.31	21.31	21.31
15	17.05	19.37	18.45
45	15.74	16.81	16.90
75	14.92	15.39	15.24
105	13.17	13.57	13.67
135	12.67	12.80	12.82
165	11.71	12.18	11.72

Tabela A.4 - Umidade do produto (%BU) durante o Teste 2, no segundo estágio.

TEMPO (MIN)	5	PONTOS 6	7
30	16.93	17.70	19.90
60	13.45	15.11	16.54
90	11.46	13.75	15.57
120	11.19	12.56	13.52
150	9.90	11.40	12.70
180	9.35	10.38	11.48

Tabela A.5 - Umidade do produto (%BU) durante o Teste 3, no primeiro estágio.

TEMPO (MIN)	1	PONTOS 2	3
0	20.20	20.20	20.20
15	16.20	17.10	17.56
45	14.90	16.00	15.90
75	14.10	14.58	14.17
105	13.26	13.42	13.06
135	12.27	12.47	12.35

Tabela A.6 - Umidade do produto (%BU) durante o Teste 3, no segundo estágio.

TEMPO (MIN)	PONTOS		
	5	6	7
30	16.81	16.46	15.96
60	15.68	14.76	12.93
90	14.29	13.44	12.70
120	12.88	12.58	10.80
150	12.10	11.87	10.82

Tabela A.7 - Umidade do produto (%BU) durante o Teste 4, no primeiro estágio.

TEMPO (MIN)	PONTOS		
	1	2	3
0	17.74	17.74	17.74
15	14.57	16.67	16.81
45	14.41	15.09	15.22
75	13.31	13.81	13.93
105	12.41	12.77	12.79
135	11.60	11.98	11.99

Tabela A.8 - Umidade do produto (%BU) durante o Teste 4, no segundo estágio.

TEMPO (MIN)	PONTOS		
	5	6	7
30	13.66	15.73	17.98
60	12.06	13.79	16.48
90	10.83	12.62	14.23
120	10.60	11.76	12.94
150	10.17	11.17	12.45

Tabela A.9 - Umidade do produto (%BU) durante o Teste 5, no primeiro estágio.

TEMPO (MIN)	PONTOS		
	1	2	3
0	19.38	19.38	19.38
15	15.18	17.02	17.66
45	14.07	15.21	15.50
75	13.47	14.04	14.10
105	12.66	13.05	13.06
135	11.80	12.11	12.05

Tabela A.10 - Umidade do produto (%BU) durante o Teste 5, no segundo estágio.

TEMPO (MIN)	PONTOS		
	5	6	7
30	13.72	15.23	17.69
60	11.87	13.90	16.23
90	11.19	13.05	14.49
120	10.87	12.08	13.11
150	10.29	11.16	11.95

Tabela A.11 - Umidade do produto (%BU) durante o Teste 6, no primeiro estágio.

TEMPO (MIN)	PONTOS		
	1	2	3
0	20.00	20.00	20.00
15	17.19	17.62	17.98
45	15.70	16.20	16.15
75	14.72	15.14	15.22
105	13.88	14.11	14.11
135	12.98	13.29	13.37

Tabela A.12 - Unidade do produto (%BU) durante o Teste 6, no segundo estágio.

TEMPO (MIN)	PONTOS		
	5	6	7
30	13.58	15.80	18.29
60	12.20	13.44	17.22
90	10.74	12.38	15.35
120	9.90	11.41	14.33
150	9.67	10.96	13.24

Tabela A.13 - Unidade do produto (%BU) durante o Teste 7, no primeiro estágio.

TEMPO (MIN)	PONTOS		
	1	2	3
0'	20.10	20.10	20.10
15	18.07	16.14	16.64
45	13.61	14.47	14.65
75	12.74	13.25	13.35
105	11.82	12.26	12.17
135	11.17	11.40	11.35

Tabela A.14 - Unidade do produto (%BU) durante o Teste 7, no segundo estágio.

TEMPO (MIN)	PONTOS		
	5	6	7
30	12.50	14.87	16.86
60	11.15	12.75	15.32
90	9.67	11.81	13.03
120	9.61	10.85	12.26
150	9.54	10.33	11.06

Tabela A.15 - Umidade do produto (%BU) durante o Teste 8, no primeiro estágio.

TEMPO (MIN)	PONTOS		
	1	2	3
0	19.29	19.29	19.29
15	15.23	16.29	16.57
45	13.97	14.71	14.79
75	12.44	13.36	13.19
105	11.69	12.10	12.18

Tabela A.16 - Umidade do produto (%BU) durante o Teste 8, no segundo estágio.

TEMPO (MIN)	PONTOS		
	5	6	7
30	13.08	14.75	16.94
60	12.16	13.45	14.71
90	10.47	11.76	13.36
120	9.52	10.84	12.58

Tabela A.17 - Unidade do produto (%BU) durante o Teste 9, no primeiro estágio.

TEMPO (MIN)	PONTOS	
	1	2
0	19.68	19.68
15	15.26	15.79
45	13.56	13.73
75	12.14	12.40
105	11.23	11.31

Tabela A.18 - Unidade do produto (%BU) durante o Teste 9, no segundo estágio.

TEMPO (MIN)	PONTOS	
	5	6
30	13.84	14.80
60	12.45	12.68
90	11.41	11.67
120	10.24	10.56

Tabela A.19 - Unidade do produto (%BU) durante o Teste 10, no primeiro estágio.

TEMPO (MIN)	PONTOS	
	1	2
0	18.99	18.99
15	15.15	15.30
45	13.11	13.20
75	11.80	11.70
105	10.71	10.80

Tabela A.20 - Unidade do produto (%BU) durante o Teste 10, no segundo estágio.

TEMPO (MIN)	PONTOS	
	5	6
30	13.19	14.32
60	11.82	13.22
90	10.86	11.33
120	10.05	10.57

Tabela A.21 - Umidade do produto (%BU) durante o Teste 11, no primeiro estágio.

TEMPO (MIN)	PONTOS	
	1	2
0	18.66	18.66
15	15.44	15.82
45	13.50	13.93
75	12.32	12.65
105	11.50	11.40

Tabela A.22 - Umidade do produto (%BU) durante o Teste 11, no segundo estágio.

TEMPO (MIN)	PONTOS	
	5	6
30	13.87	14.48
60	12.62	13.08
90	11.48	11.81
120	10.44	10.81

Tabela A.23 - Umidade do produto (%BU) durante o Teste 12, no primeiro estágio.

TEMPO (MIN)	PONTOS	
	1	2
0	19.11	19.11
15	15.65	16.15
45	13.63	13.86
75	12.23	12.48
105	11.39	11.47

Tabela A.24 - Umidade do produto (%BU) durante o Teste 12, no segundo estágio.

TEMPO (MIN)	PONTOS	
	5	6
30	15.04	13.99
60	12.92	12.28
90	11.58	11.53
120	10.77	10.63

Tabela A.25 - Umidade do produto (%BU) durante o Teste 13 no primeiro estágio.

TEMPO (MIN)	PONTOS	
	1	2
0	18.61	18.61
15	14.64	15.41
45	13.22	13.28
75	12.12	12.25
105	11.26	11.35

Tabela A.26 - Umidade do produto (%BU) durante o Teste 13, no segundo estágio.

TEMPO (MIN)	PONTOS	
	5	6
30	14.18	13.48
60	12.66	11.96
90	11.48	11.16
120	10.75	10.51

Tabela A.27 - Umidade do produto (%BU) durante o Teste 14, no primeiro estágio.

TEMPO (MIN)	PONTOS	
	1	2
0	18.54	18.54
15	15.36	15.74
45	13.83	13.89
75	12.73	12.72
105	11.75	11.73

Tabela A.28 - Umidade do produto (%BU) durante o Teste 14, no segundo estágio.

TEMPO (MIN)	PONTOS	
	5	6
30	14.58	14.45
60	13.11	12.94
90	12.05	11.43
120	11.28	11.05

Tabela A.29 - Umidade do produto (%BU) durante o Teste 15, no primeiro estágio.

TEMPO (MIN)	PONTOS	
	1	2
0	20.09	20.09
15	16.44	17.03
45	14.41	14.57
75	12.01	13.03
105	11.63	12.21

Tabela A.30 - Umidade do produto (%BU) durante o Teste 15, no segundo estágio.

TEMPO (MIN)	PONTOS	
	5	6
30	14.55	15.46
60	13.12	13.81
90	12.07	12.75
120	11.13	11.9

Tabela A.31 - Umidade do produto (%BU) durante o Teste 16, no primeiro estágio.

TEMPO (MIN)	PONTOS	
	1	2
0	20.77	20.77
15	17.59	16.48
45	14.40	14.56
75	13.10	13.18
105	12.16	12.19

Tabela A.32 - Umidade do produto (%BU) durante o Teste 16, no segundo estágio.

TEMPO (MIN)	PONTOS	
	5	6
30	14.18	15.84
60	13.11	14.22
90	12.14	12.89
120	11.23	11.67

Tabela A.33 - U unidade do produto (%BU) durante o Teste 17, no primeiro estágio.

TEMPO (MIN)	PONTOS	
	1	2
0	18.80	18.80
15	15.50	15.67
45	13.82	13.67
75	12.60	12.56
105	11.47	11.52

Tabela A.34 - Unidade do produto (%BU) durante o Teste 17, no segundo estágio.

TEMPO (MIN)	PONTOS	
	5	6
30	13.82	14.55
60	12.54	13.21
90	11.30	11.98
120	10.30	10.93

Tabela A.35 - Unidade do produto (%BU) durante o Teste 16, no primeiro estágio.

TEMPO (MIN)	PONTOS	
	1	2
0	19.40	19.40
15	15.54	15.89
45	13.95	14.15
75	12.85	12.90
105	11.77	11.92

Tabela A.36 - Unidade do produto (%BU) durante o Teste 16, no segundo estágio.

TEMPO (MIN)	PONTOS	
	5	6
30	14.06	15.41
60	12.70	13.69
90	11.81	12.60
120	11.08	11.73

Tabela A.37 - Umidade do produto (%BU) durante o Teste 19, no primeiro estágio.

TEMPO (MIN)	PONTOS	
	1	2
0	18.23	18.23
15	14.25	14.87
45	13.17	13.35
75	12.44	12.28
105	11.37	11.33

Tabela A.38 - Umidade do produto (%BU) durante o Teste 19, no segundo estágio.

TEMPO (MIN)	PONTOS	
	5	6
30	13.19	14.24
60	12.19	12.68
90	11.68	12.16
120	10.86	11.48

Tabela A.39 - Umidade do produto (%BU) durante o Teste 20, no primeiro estágio.

TEMPO (MIN)	PONTOS	
	1	2
0	17.47	17.47
15	14.49	15.36
45	13.18	13.53
75	12.03	12.29
105	11.09	11.28

Tabela A.40 - Umidade do produto (%BU) durante o Teste 20, no segundo estágio.

TEMPO (MIN)	PONTOS	
	5	6
30	12.77	14.34
60	11.32	12.32
90	10.74	11.17
120	9.70	10.54

Tabela A.41 - Umidade do produto (%BU) durante o Teste 21, no primeiro estágio.

TEMPO (MIN)	PONTOS	
	1	2
0	17.33	17.33
15	13.89	14.51
45	12.59	12.95
75	11.29	11.5
105	10.63	10.82

Tabela A.42 - Umidade do produto (%BU) durante o Teste 21, no segundo estágio.

TEMPO (MIN)	PONTOS	
	5	6
30	12.91	13.72
60	12.02	12.75
90	10.43	11.06
120	9.84	11.43

Tabela A.43 - Umidade do produto (%BU) durante o Teste 22, no primeiro estágio.

TEMPO (MIN)	PONTOS	
	1	2
0	18.47	18.47
15	15.23	14.99
45	14.26	14.42
75	13.31	13.23

Tabela A.44 - Umidade do produto (%BU) durante o Teste 22, no segundo estágio.

TEMPO (MIN)	PONTOS	
	5	6
30	13.82	14.93
60	12.65	13.68
90	11.54	12.97
120	11.11	12.59

APÊNDICE B - Tabelas de temperatura (°C) do ar de entrada e saída e da coluna de grãos.

Tabela B.1 - Temperatura (°C) através da coluna de grãos durante o Teste 1, no primeiro estágio.

TEMPO (MIN)	PONTOS					
	A1	1	2	3	4	A2
5	44.4	42.4	21.2	19.2	20.2	17.2
15	44.4	43.4	24.2	23.2	23.2	22.2
45	46.4	44.4	27.3	26.2	26.7	24.2
60	45.4	43.4	27.3	24.2	24.2	23.2
75	47.5	46.4	30.3	27.3	27.3	24.2
90	44.4	46.4	31.3	29.3	29.3	26.2
105	46.4	44.4	32.3	29.3	29.3	25.2
120	46.4	44.4	35.3	30.3	30.3	27.3
135	46.4	46.4	36.3	32.3	32.3	28.3
150	45.4	45.4	36.3	32.3	32.3	28.3
165	44.4	44.4	37.4	32.3	32.3	28.3
180	18.2	15.2	22.2	26.2	26.2	22.2
195	19.2	19.2	21.2	22.2	22.2	22.2

Tabela B.2 - Temperatura (°C) através da coluna de grãos durante o Teste 1, no segundo estágio.

TEMPO (MIN)	PONTOS					
	A3	5	6	7	8	A4
5	47.5	43.4	36.3	22.2	21.2	17.2
15	49.5	47.5	29.3	22.2	22.2	19.2
45	50.5	48.5	32.3	25.2	23.2	22.2
60	49.5	46.4	35.3	25.2	24.2	22.2
75	52.5	52.5	43.4	28.3	26.2	22.2
90	49.5	49.5	42.4	29.3	27.2	23.2
105	47.5	47.5	42.4	32.2	28.3	24.2
120	47.5	47.5	42.4	31.3	29.3	24.2
135	47.5	47.5	42.4	33.2	32.3	26.2
150	46.4	46.4	41.4	30.2	31.3	27.2
165	45.4	46.4	42.4	34.2	31.3	27.3
180	18.2	18.2	19.2	24.2	25.2	25.2
195	19.2	19.2	19.2	21.2	22.2	22.2

Tabela B.3 - Temperatura (°C) através da coluna de grãos durante o teste 2, no primeiro estágio.

TEMPO (MIN)	PONTOS				
	A1	1	2	3	A2
10	42.9	36.2	22.2	20.2	18.0
25	45.4	41.4	26.0	24.2	22.2
40	46.2	42.4	28.8	26.2	24.2
55	47.5	43.4	32.3	30.3	28.3
70	48.0	43.4	33.3	32.3	30.3
85	48.3	44.4	35.8	33.3	31.3
100	48.3	45.4	36.3	34.3	32.3
115	48.3	45.9	38.4	36.3	34.3
130	48.3	46.2	39.4	37.4	35.3
145	48.3	46.4	39.9	38.4	35.8
160	48.5	47.5	40.4	39.4	36.3
175	22.2	23.2	28.8	30.3	32.3
190	20.2	21.2	24.2	25.2	25.2

Tabela B.4 - Temperatura (°C) através da coluna de grãos durante o teste 2, no segundo estágio.

TEMPO (MIN)	PONTOS					
	B3	A3	1	2	A4	B4
10	24.2	40.4	35.3	26.2	17.2	14.2
25	26.2	44.4	37.4	24.2	22.2	17.2
40	26.2	44.4	39.4	26.2	25.0	18.0
55	28.3	46.4	41.4	32.3	29.3	19.7
70	29.3	47.5	39.4	31.3	31.3	20.7
85	29.3	47.5	42.4	33.3	32.3	21.2
100	30.2	47.5	44.4	36.3	34.3	22.2
115	30.3	48.0	45.4	37.4	35.3	22.7
130	30.3	47.5	45.9	37.4	36.3	23.2
145	31.3	47.5	45.4	38.4	37.4	23.2
160	31.3	47.5	45.4	39.4	38.4	23.2
175	15.5	22.2	24.2	29.3	31.3	22.7
190	15.5	20.2	22.2	24.2	25.2	17.2

Tabela B.5 - Temperatura (°C) através da coluna de grãos durante o Teste 3, no primeiro estágio.

TEMPO (MIN)	PONTOS				
	A1	1	2	3	A2
5	44.9	36.3	20.2	17.7	14.1
20	45.9	36.3	24.2	21.2	19.7
35	48.0	38.4	25.2	23.2	22.7
50	49.5	39.9	28.3	27.3	25.7
65	49.5	39.4	31.3	29.3	28.3
80	47.5	42.4	32.8	31.3	30.3
95	45.9	42.4	34.3	32.3	31.3
110	44.4	41.4	34.3	32.8	32.3
125	43.4	40.9	34.3	32.8	32.3
140	42.9	40.4	34.3	32.8	31.8
155	22.2	24.2	28.8	30.3	30.3
170	21.2	22.2	23.2	24.2	24.2

Tabela B.6 - Temperatura (°C) através da coluna de grãos durante o Teste 3, no segundo estágio.

TEMPO (MIN)	PONTOS						
	B3	A3	5	6	7	A4	B4
5	16.1	28.3	16.1	17.7	29.3	42.9	23.2
20	21.2	36.3	23.2	20.7	29.3	44.4	24.2
35	20.7	37.9	27.8	24.2	33.3	45.9	24.7
50	22.7	40.4	31.3	27.3	32.8	48.0	25.7
65	33.3	41.4	32.3	29.3	33.3	48.5	26.0
80	24.2	40.9	33.3	31.8	36.3	47.5	25.7
95	24.2	40.4	35.3	32.8	38.4	45.4	25.2
110	24.7	39.9	35.8	33.3	41.4	43.4	25.2
125	23.2	38.9	34.8	33.3	38.9	42.9	24.2
140	23.2	38.4	35.3	33.3	36.3	42.4	24.2
155	21.2	25.7	31.3	29.8	27.8	23.2	14.1
170	17.2	21.7	23.2	23.7	23.2	22.2	13.1

Tabela B.7 - Temperatura (°C) através da coluna de grãos durante o Teste 4, no primeiro estágio.

TEMPO (MIN)	PONTOS				
	A1	1	2	3	A2
5	48.5	40.4	24.2	19.2	16.1
20	50.5	41.4	27.8	24.2	22.2
35	48.0	42.4	29.3	26.2	25.2
50	49.0	42.9	32.3	29.3	27.8
65	46.4	42.9	32.8	31.3	29.3
80	47.5	44.4	35.3	32.8	31.3
95	46.9	44.4	36.8	34.3	32.3
110	44.9	43.4	36.3	34.3	32.3
125	45.4	44.4	37.9	35.8	32.8
140	45.4	39.3	37.9	36.3	33.3
155	24.2	26.2	30.3	32.3	32.8
170	21.2	22.7	25.2	26.2	26.7

Tabela B.8 - Temperatura (°C) através da coluna de grãos durante o Teste 4, no segundo estágio.

TEMPO (MIN)	PONTOS						
	B3	A3	5	6	7	A4	B4
5	27.8	43.4	36.3	22.2	18.2	17.2	16.1
20	29.8	45.9	38.9	25.7	22.7	22.2	19.2
35	30.3	44.4	39.4	27.8	25.7	25.2	20.7
50	30.8	45.9	41.4	30.8	28.3	27.3	22.2
65	30.3	44.4	40.4	32.3	30.3	28.3	22.7
80	30.8	45.4	42.4	33.3	32.3	30.8	23.2
95	30.3	44.4	41.9	34.3	33.3	31.8	23.2
110	29.3	42.9	41.9	35.8	34.3	32.3	22.7
125	29.8	43.4	42.4	36.3	34.3	32.8	23.2
140	29.8	43.4	42.4	36.3	35.3	32.8	23.2
155	18.7	24.2	27.8	31.8	33.3	32.3	22.2
170	16.6	21.2	22.7	24.7	27.3	27.3	16.2

Tabela B.9 - Temperatura ($^{\circ}\text{C}$) através da coluna de grãos durante o Teste 5, no primeiro estágio.

TEMPO (MIN)	PONTOS				
	A1	1	2	3	A2
5	48.0	43.4	27.8	20.7	15.6
20	48.5	43.9	29.3	24.2	21.7
35	45.9	41.9	28.3	25.7	23.2
50	45.9	42.9	30.3	27.8	25.7
65	46.4	42.9	31.8	29.3	28.3
80	44.9	41.9	33.3	31.3	28.8
95	44.9	42.9	34.3	32.3	29.3
110	45.9	43.9	36.3	33.3	30.3
125	45.9	44.4	37.4	34.3	31.3
140	45.9	44.4	38.9	35.3	32.3
155	22.7	25.7	29.3	32.3	31.3
170	20.2	21.2	22.2	24.2	25.2

Tabela B.10 - Temperatura ($^{\circ}\text{C}$) através da coluna de grãos durante o Teste 5, no segundo estágio.

TEMPO (MIN)	PONTOS						
	B3	A3	5	6	7	A4	B4
5	28.3	42.9	34.6	20.7	18.2	17.7	15.6
20	31.3	44.4	39.4	25.7	22.2	19.2	18.2
35	32.3	42.4	37.9	28.3	25.2	23.2	19.2
50	33.3	42.9	38.4	29.8	27.3	25.2	20.2
65	34.3	42.9	38.4	30.3	28.8	26.7	20.7
80	34.3	41.9	39.4	32.3	30.8	28.3	20.7
95	34.3	41.9	40.4	34.3	31.8	28.3	21.2
110	35.8	42.9	42.4	36.8	33.3	29.3	21.2
125	35.8	42.9	42.9	36.8	33.3	30.3	21.7
140	36.3	42.9	42.9	36.8	34.3	31.3	21.7
155	19.7	24.2	33.3	37.9	35.3	32.3	21.2
170	15.6	19.7	21.2	22.7	25.7	26.2	17.2

Tabela B.11 - Temperatura ($^{\circ}\text{C}$) através da coluna de grãos durante o Teste 6, no primeiro estágio.

TEMPO (MIN)	PONTOS				
	A1	1	2	3	A2
5	34.3	27.8	18.2	15.6	13.6
20	42.9	33.3	24.2	22.2	21.2
35	45.4	37.9	28.3	26.2	25.2
50	42.4	35.8	26.7	25.7	24.2
65	42.4	37.9	28.3	26.2	25.7
80	42.9	38.4	29.8	28.3	27.8
95	42.4	39.4	31.3	30.3	28.8
110	43.4	41.4	32.3	31.3	30.3
125	41.4	39.4	32.3	31.8	31.3
140	42.4	38.9	33.3	32.3	31.3
155	26.7	29.3	31.3	31.8	31.8
170	24.2	25.2	26.2	26.7	26.2

Tabela B.12 - Temperatura ($^{\circ}\text{C}$) através da coluna de grãos durante o Teste 6, no segundo estágio.

TEMPO (MIN)	PONTOS						
	B3	A3	5	6	7	A4	B4
5	26.7	40.9	31.8	16.1	14.1	12.6	12.1
20	27.8	47.5	35.8	23.2	20.2	19.2	17.2
35	28.3	50.5	37.9	26.2	25.7	24.2	21.2
50	30.3	45.9	37.9	25.7	24.2	23.2	19.2
65	30.3	45.9	37.9	25.7	25.2	24.2	19.7
80	31.3	46.4	41.4	28.3	27.8	26.2	21.2
95	30.3	45.4	41.4	30.3	29.3	28.3	21.2
110	32.3	48.0	42.4	32.3	30.3	29.3	22.2
125	32.3	44.4	40.4	32.3	31.3	30.3	22.2
140	32.3	44.4	40.4	32.8	31.8	31.3	22.2
155	20.2	26.2	28.8	30.3	31.3	31.3	18.2
170	18.2	24.7	25.2	25.7	26.2	26.2	18.2

Tabela B.13 - Temperatura (°C) através da coluna de grãos durante o Teste 7, no primeiro estágio.

TEMPO (MIN)	PONTOS				
	A1	1	2	3	A2
5	41.4	37.9	24.2	15.6	13.1
20	48.5	44.4	29.8	22.7	21.7
35	46.4	43.4	31.3	26.2	25.2
50	47.5	44.4	32.3	29.3	27.8
65	48.0	45.4	35.3	31.3	30.3
80	46.9	45.4	35.8	32.8	31.3
95	47.5	45.4	37.9	34.3	32.8
110	44.9	43.4	37.9	34.3	33.3
125	44.9	43.9	37.9	35.3	33.3
140	44.4	43.9	37.9	35.3	33.3
155	24.2	26.2	32.3	33.3	32.8
170	21.2	22.2	23.2	24.2	24.2

Tabela B.14 - Temperatura (°C) através da coluna de grãos durante o Teste 7, no segundo estágio.

TEMPO (MIN)	PONTOS						
	B3	A3	5	6	7	A4	B4
5	25.2	39.4	31.8	18.2	16.1	15.1	11.6
20	30.3	45.9	38.9	25.2	22.2	20.2	17.2
35	31.3	45.9	42.4	29.3	25.7	24.2	19.2
50	30.8	45.9	42.9	32.3	28.3	26.2	20.2
65	30.8	45.9	41.4	32.3	30.3	29.3	21.7
80	32.8	45.9	43.4	35.8	32.8	30.3	22.2
95	32.3	45.4	41.4	33.8	33.3	32.3	22.2
110	31.3	43.4	43.4	37.9	34.3	32.3	22.2
125	30.3	42.9	42.9	36.8	35.3	32.3	22.2
140	30.3	42.9	42.4	35.8	35.3	32.8	22.2
155	18.2	25.2	32.8	35.8	35.3	32.8	22.2
170	15.6	21.2	22.2	23.2	24.2	24.2	15.6

Tabela B.15 - Temperatura ($^{\circ}\text{C}$) através da coluna de grãos durante o Teste 8, no primeiro estágio.

TEMPO (MIN)	PONTOS				
	A1	1	2	3	A2
5	46.4	41.4	22.7	17.7	15.1
20	47.5	42.9	28.3	22.2	21.2
35	46.4	40.4	30.3	26.2	25.2
50	46.4	42.4	32.3	30.3	28.3
65	42.9	37.9	28.8	25.7	24.2
80	45.4	43.4	32.3	27.8	25.7
95	45.4	43.4	34.3	31.3	29.3
110	45.9	45.4	36.3	33.3	31.3
125	20.2	22.7	29.3	32.3	31.3
140	17.2	18.2	22.2	24.2	24.2

Tabela B.16 - Temperatura ($^{\circ}\text{C}$) através da coluna de grãos durante o Teste 8, no segundo estágio.

TEMPO (MIN)	PONTOS						
	B3	A3	5	6	7	A4	B4
5	29.3	44.4	36.3	21.2	17.7	16.1	14.1
20	30.3	45.9	38.4	24.2	22.2	20.7	17.7
35	30.3	45.4	38.4	28.3	25.2	24.2	19.2
50	30.8	45.4	40.4	31.3	28.3	27.8	20.7
65	27.8	41.4	41.4	25.2	25.2	24.2	18.2
80	29.8	43.4	42.4	30.3	26.2	25.2	18.2
95	29.8	44.4	42.4	32.8	31.3	28.3	20.2
110	30.3	44.4	42.9	35.3	32.3	30.3	21.2
125	15.1	20.7	26.7	33.3	32.8	31.3	20.2
140	13.1	16.6	18.2	21.7	24.2	25.2	16.1

Tabela B.17 - Temperatura ($^{\circ}\text{C}$) através da coluna de grãos durante o TESTE 9, no primeiro estágio.

TEMPO (MIN)	PONTOS				
	A1	1	2	A2	B2
5	36.8	32.8	21.2	14.1	13.1
20	45.4	37.9	29.3	24.2	18.2
35	43.4	40.4	32.8	29.3	19.2
50	45.4	43.4	36.3	31.3	21.2
65	45.9	43.4	37.9	34.3	22.2
80	41.9	41.4	38.9	35.3	22.2
95	45.4	45.4	40.4	35.3	22.2
110	45.4	45.4	41.4	36.3	22.7
125	18.2	20.7	28.3	34.3	19.7
140	16.1	17.7	19.2	21.2	15.6

Tabela B.18 - Temperatura ($^{\circ}\text{C}$) através da coluna de grãos durante o Teste 9, no segundo estágio.

TEMPO (MIN)	PONTOS					
	B3	A3	5	6	A4	B4
5	24.2	36.3	22.7	17.7	15.1	14.1
20	28.3	44.4	30.3	26.2	22.2	18.2
35	27.3	42.9	33.8	30.8	27.8	20.2
50	28.3	44.9	36.3	33.3	31.3	22.2
65	28.3	45.4	37.9	35.3	33.3	24.2
80	27.8	43.4	39.9	37.4	34.3	25.2
95	28.8	44.9	39.9	37.4	34.8	25.7
110	28.3	44.4	41.9	39.4	35.8	26.2
125	14.1	18.7	27.3	31.3	35.8	26.2
140	13.1	16.1	19.7	20.7	22.2	16.6

Tabela B.19 - Temperatura (°C) através da coluna de grãos durante o TESTE 10, no primeiro estágio.

TEMPO (MIN)	PONTOS				
	A1	1	2	A2	B2
5	45.4	42.4	31.3	18.7	17.7
20	48.5	45.9	36.3	28.8	22.2
35	48.5	47.5	41.4	33.3	23.2
50	48.0	47.5	42.9	35.8	24.2
65	47.5	47.5	42.4	37.9	25.2
80	45.9	45.5	42.9	37.9	25.2
95	45.9	45.9	43.4	39.4	25.7
110	45.9	45.9	43.4	39.4	25.7
125	26.2	27.3	28.8	31.3	21.2
140	25.2	25.7	26.2	27.3	19.2

Tabela B.20 - Temperatura (°C) através da coluna de grãos durante o Teste 10, no segundo estágio.

TEMPO (MIN)	PONTOS					
	B3	A3	5	6	A4	B4
5	29.3	44.4	27.8	23.7	19.2	16.6
20	32.3	48.5	32.8	30.3	27.3	22.2
35	32.8	48.5	35.8	33.8	32.3	24.2
50	32.8	48.0	37.9	36.3	35.3	26.2
65	32.8	46.9	39.4	38.4	37.4	28.3
80	32.8	45.9	40.4	38.9	37.9	29.3
95	33.3	45.9	41.4	39.9	38.9	29.8
110	34.3	45.9	41.9	40.4	38.9	30.3
125	22.2	26.2	30.3	31.3	32.3	25.7
140	21.2	25.2	26.2	26.2	27.3	22.7

Tabela B.21 - Temperatura ($^{\circ}\text{C}$) através da coluna de grãos durante o TESTE 11, no primeiro estágio.

TEMPO (MIN)	PONTOS				
	A1	1	2	A2	B2
5	37.9	36.3	29.3	18.2	18.2
20	43.4	42.4	34.8	26.2	22.2
35	43.9	43.4	36.3	29.3	22.7
50	43.9	43.4	39.4	32.8	24.2
65	44.4	44.4	40.4	34.3	25.2
80	45.4	45.4	42.4	35.3	25.7
95	45.4	45.4	42.4	36.3	26.2
110	45.4	45.4	42.9	37.9	27.3
125	23.7	24.2	29.3	35.3	24.2
140	22.7	23.2	24.2	26.2	20.2

Tabela B.22 - Temperatura ($^{\circ}\text{C}$) através da coluna de grãos durante o Teste 11, no segundo estágio.

TEMPO (MIN)	PONTOS					
	B3	A3	5	6	A4	B4
5	40.9	39.4	23.2	21.7	19.2	18.7
20	45.9	43.4	27.6	26.2	25.2	22.2
35	42.4	43.4	32.3	30.3	28.3	24.2
50	35.3	43.9	34.3	32.8	32.3	28.3
65	34.8	43.4	36.3	35.3	34.3	32.3
80	35.3	44.4	37.4	36.3	35.3	34.3
95	35.8	44.4	39.4	38.4	36.3	35.8
110	35.3	44.9	39.9	38.4	37.4	25.7
125	21.7	24.2	33.3	34.3	36.3	24.2
140	20.2	22.7	25.7	26.2	27.3	21.2

Tabela B.23 - Temperatura (°C) através da coluna de grãos durante o TESTE 12, no primeiro estágio.

TEMPO (MIN)	PONTOS				
	A1	1	2	A2	B2
5	33.8	33.3	25.2	12.1	11.1
20	39.4	37.9	28.8	18.2	14.1
35	42.9	41.4	32.8	24.2	16.1
50	43.4	43.9	36.3	28.3	18.2
65	44.9	43.4	36.3	32.3	20.2
80	43.4	43.9	39.4	32.8	20.7
95	43.9	43.4	39.4	34.3	22.2
110	43.4	43.4	38.4	35.3	22.2
125	22.2	23.2	25.7	31.3	19.2
140	21.2	21.7	22.2	23.2	15.1

Tabela B.24 - Temperatura (°C) através da coluna de grãos durante o Teste 12, no segundo estágio.

TEMPO (MIN)	PONTOS					
	B3	A3	5	6	A4	B4
5	13.1	21.7	22.7	33.3	35.3	16.1
20	18.2	29.8	30.3	38.9	41.4	18.2
35	22.2	35.8	32.3	38.9	44.4	20.2
50	24.7	37.9	36.3	42.4	46.4	21.2
65	26.2	40.4	38.4	44.4	46.4	21.2
80	26.2	39.9	38.9	44.4	45.4	21.2
95	26.2	40.4	40.4	44.4	45.4	21.7
110	27.2	40.4	40.9	44.4	45.4	21.2
125	20.2	25.2	26.1	23.2	22.2	12.6
140	17.7	21.7	22.7	21.7	21.7	12.1

Tabela B.25 - Temperatura (°C) através da coluna de grãos durante o Teste 13, no primeiro estágio.

TEMPO (MIN)	PONTOS				
	A1	1	2	A2	B2
5	44.4	42.4	32.8	22.2	18.2
20	44.4	41.4	33.3	24.2	18.2
35	45.4	43.4	36.8	29.3	21.2
50	44.9	44.4	38.4	32.3	22.2
65	43.4	43.4	38.4	33.3	22.7
80	42.9	42.9	39.4	35.3	23.2
95	42.9	42.9	39.4	35.3	24.2
110	41.9	42.4	38.9	35.3	23.2
125	24.2	25.2	28.3	32.3	21.7
140	22.7	23.2	24.2	25.2	17.7

Tabela B.26 - Temperatura (°C) através da coluna de grãos durante o Teste 13, no segundo estágio.

TEMPO (MIN)	PONTOS					
	B3	A3	5	6	A4	B4
5	21.7	31.8	32.3	44.4	46.4	22.2
20	23.2	34.3	34.8	45.4	46.4	22.2
35	25.7	37.9	38.4	45.9	46.9	22.7
50	26.7	38.9	38.4	44.4	46.4	22.7
65	27.8	39.4	39.4	44.4	45.4	22.7
80	28.3	39.4	40.9	43.9	45.4	22.7
95	28.3	38.9	39.4	42.9	43.4	22.2
110	28.3	38.9	39.4	42.9	43.4	22.2
125	22.2	27.8	28.3	24.2	24.2	15.1
140	19.2	23.2	24.2	23.2	23.2	14.1

Tabela B.27 - Temperatura ($^{\circ}\text{C}$) através da coluna de grãos durante o Teste 14, no primeiro estágio.

TEMPO (MIN)	PONTOS				
	A1	1	2	A2	B2
5	43.4	40.4	27.3	18.2	17.2
20	45.9	41.9	31.8	25.2	20.2
35	44.9	42.4	35.3	29.8	22.2
50	44.4	42.9	36.3	32.3	22.7
65	43.9	42.9	38.4	34.3	24.2
80	43.9	43.4	39.4	35.3	25.2
95	43.4	42.9	39.4	35.8	25.2
110	42.9	42.9	39.4	35.8	25.2
125	25.2	26.2	29.3	32.3	22.7
140	24.2	24.7	25.2	25.7	18.2

Tabela B.28 - Temperatura ($^{\circ}\text{C}$) através da coluna de grãos durante o Teste 14, no segundo estágio.

TEMPO (MIN)	PONTOS					
	B3	A3	5	6	A4	B4
5	19.2	28.3	27.3	37.4	45.9	22.7
20	24.7	34.3	32.8	44.4	48.0	23.2
35	27.3	36.8	36.3	44.4	46.4	23.2
50	29.3	38.4	38.4	44.4	45.9	23.2
65	31.3	39.4	39.9	44.4	45.9	23.2
80	32.3	40.4	40.9	44.4	45.9	24.2
95	32.3	40.4	41.4	44.4	45.4	24.2
110	32.3	40.4	41.4	43.9	44.4	23.7
125	24.7	28.3	29.3	26.2	25.7	17.7
140	21.7	24.2	25.2	24.2	24.2	16.1

Tabela B.29 - Temperatura ($^{\circ}\text{C}$) através da coluna de grãos durante o teste 15, no primeiro estágio.

TEMPO (MIN)	PONTOS				
	A1	1	2	A2	B2
5	45.4	40.4	28.8	19.2	19.2
20	48.5	43.4	34.8	27.8	23.2
35	46.9	45.4	37.4	32.3	24.2
50	45.9	43.4	37.9	33.8	25.7
65	45.4	45.4	39.4	35.3	25.7
80	44.9	45.4	40.9	35.8	26.2
95	44.4	44.9	40.9	36.3	25.7
110	44.4	44.4	40.4	36.3	25.7
125	29.3	29.8	32.8	34.3	24.2
140	26.2	27.3	27.8	28.3	21.2

Tabela B.30 - Temperatura ($^{\circ}\text{C}$) através da coluna de grãos durante o teste 15, no segundo estágio.

TEMPO (MIN)	PONTOS					
	E3	A3	5	6	A4	B4
5	33.8	44.9	26.7	22.7	21.2	18.7
20	38.4	48.5	31.8	29.8	27.8	22.2
35	38.4	47.5	34.8	32.8	31.8	22.7
50	37.9	45.9	37.9	35.8	34.3	23.2
65	37.9	45.4	38.4	36.3	35.3	23.2
80	37.9	45.4	39.4	37.4	35.8	23.2
95	37.7	44.4	39.9	37.9	36.3	23.2
110	36.8	44.4	40.4	38.4	36.3	23.2
125	25.2	29.3	32.8	34.3	35.3	22.2
140	24.2	26.2	27.3	27.3	28.3	19.2

Tabela B.31 - Temperatura ($^{\circ}\text{C}$) através da coluna de grãos durante o Teste 16, no primeiro estágio.

TEMPO (MIN)	PONTOS				
	A1	1	2	A2	B2
5	46.4	42.4	27.8	20.2	20.2
20	48.0	41.9	30.8	28.8	22.2
35	46.4	41.4	34.8	32.3	25.2
50	45.4	42.9	35.8	33.3	25.2
65	45.4	43.4	38.4	35.3	26.2
80	45.4	43.4	38.4	35.8	26.2
95	43.4	42.9	38.9	36.3	25.7
110	44.4	43.4	39.4	37.4	25.2
125	31.8	32.3	32.8	33.8	23.2
140	30.3	31.3	31.3	31.8	22.2

Tabela B.32 - Temperatura ($^{\circ}\text{C}$) através da coluna de grãos durante o Teste 16, no segundo estágio.

TEMPO (MIN)	PONTOS					
	B3	A3	5	c	A4	B4
5	35.3	45.9	28.3	22.7	21.7	19.7
20	39.9	48.0	32.8	29.8	28.3	23.2
35	39.4	46.4	35.8	32.8	31.3	22.7
50	40.4	45.9	36.3	34.3	32.8	23.2
65	38.9	45.9	39.4	36.3	35.3	23.2
80	38.4	45.4	39.4	36.3	35.8	23.2
95	36.8	43.4	39.4	37.4	35.8	23.2
110	37.4	44.4	40.4	38.4	37.4	23.2
125	27.8	32.3	33.3	33.8	34.3	22.2
140	26.2	30.3	31.3	31.3	31.8	21.2

Tabela B.33 - Temperatura ($^{\circ}\text{C}$) através da coluna de grãos durante o Teste 17, no primeiro estágio.

TEMPO (MIN)	PONTOS				
	A1	1	2	A2	B2
5	42.9	39.9	31.3	23.2	22.2
20	45.4	43.4	35.8	29.8	25.2
35	46.4	44.9	38.9	33.3	26.2
50	45.9	44.4	39.4	35.8	27.8
65	45.9	45.4	41.4	37.4	28.3
80	51.5	50.5	45.4	40.4	30.3
95	46.9	46.4	43.4	40.4	29.3
110	45.9	45.9	42.9	39.9	29.3
125	35.3	35.8	36.3	36.3	27.3
140	33.8	34.3	34.3	34.3	26.2

Tabela B.34 - Temperatura ($^{\circ}\text{C}$) através da coluna de grãos durante o Teste 17, no segundo estágio.

TEMPO (MIN)	PONTOS					
	B3	A3	3	e	A4	B4
5	35.3	42.9	26.2	24.2	23.2	20.2
20	38.4	45.9	31.8	29.3	29.3	23.2
35	40.4	46.4	35.3	33.3	32.8	25.2
50	39.4	47.5	36.8	35.8	35.3	25.2
65	39.9	45.9	38.4	37.4	36.8	25.7
80	44.4	51.5	43.4	41.4	40.4	27.3
95	41.4	47.5	42.4	41.9	40.4	26.2
110	40.4	46.9	42.4	40.4	39.4	25.7
125	32.3	35.8	36.3	36.3	36.3	24.2
140	30.8	34.3	34.3	34.3	34.3	23.2

Tabela B.35 - Temperatura ($^{\circ}\text{C}$) através da coluna de grãos durante o Teste 18, no primeiro estágio.

TEMPO (MIN)	PONTOS				
	A1	1	2	A2	B2
5	41.4	36.3	29.3	22.2	20.2
20	43.4	40.9	34.3	28.3	23.2
35	45.4	43.4	37.9	32.3	25.2
50	46.4	45.9	40.4	36.3	26.7
65	46.4	44.4	40.4	36.3	28.3
80	45.4	44.4	40.9	36.8	29.3
95	45.9	44.4	41.4	38.4	32.3
110	44.4	43.4	40.4	38.4	30.3
125	35.3	35.8	35.8	35.8	26.2
140	34.3	34.3	34.3	34.3	25.2

Tabela B.36 - Temperatura ($^{\circ}\text{C}$) através da coluna de grãos durante o Teste 18, no segundo estágio.

TEMPO (MIN)	PONTOS					
	B3	A3	3	4	A4	B4
5	31.8	40.4	25.7	22.7	21.7	19.2
20	34.8	43.4	29.3	27.8	27.3	22.2
35	36.8	44.9	34.3	32.3	31.8	23.2
50	38.9	46.4	37.9	36.3	35.3	25.2
65	38.9	45.9	39.4	37.9	36.3	25.2
80	37.9	44.9	39.4	37.9	36.8	25.2
95	38.4	45.4	40.4	39.4	38.4	25.2
110	37.9	44.4	40.4	39.4	38.4	25.2
125	30.8	35.3	35.8	35.8	35.8	24.2
140	30.3	34.3	34.3	34.3	34.3	22.7

Tabela B.37 - Temperatura ($^{\circ}\text{C}$) através da coluna de grãos durante o Teste 19, no primeiro estágio.

TEMPO (MIN)	PONTOS				
	A1	1	2	A2	B2
5	45.4	45.4	35.3	24.2	23.2
20	46.9	46.4	38.4	31.3	25.7
35	46.4	45.9	39.9	33.3	26.2
50	45.4	44.9	40.4	35.3	27.3
65	45.9	45.9	41.4	36.3	27.8
80	43.9	43.9	40.9	37.4	28.3
95	43.4	43.9	41.4	37.9	28.3
110	42.4	43.4	43.4	37.9	28.3
125	31.8	32.3	32.8	38.4	28.3
140	28.3	29.3	29.3	30.3	33.3

Tabela B.38 - Temperatura ($^{\circ}\text{C}$) através da coluna de grãos durante o Teste 19, no segundo estágio.

TEMPO (MIN)	PONTOS					
	B3	AC	5	6	A4	B4
5	34.3	43.4	28.3	25.7	25.2	22.2
20	38.4	46.4	33.3	32.8	30.3	24.2
35	38.4	45.9	38.4	35.8	33.2	25.2
50	37.9	44.9	38.4	36.3	35.3	25.7
65	38.4	45.4	39.4	37.9	36.3	25.7
80	36.8	43.4	39.9	38.9	37.9	25.7
95	36.8	43.4	40.4	39.4	37.9	25.7
110	36.3	42.4	42.4	40.4	38.4	26.2
125	28.3	30.3	33.8	35.8	37.9	25.7
140	25.7	28.3	29.3	29.8	31.3	22.7

Tabela B.39 - Temperatura ($^{\circ}\text{C}$) através da coluna de grãos durante o Teste 20, no primeiro estágio.

TEMPO (MIN)	PONTOS				
	A1	1	2	A2	B2
5	31.8	35.3	27.8	15.6	15.1
20	42.9	44.9	32.3	24.2	21.2
35	45.4	48.0	38.4	29.3	22.2
50	44.4	46.4	39.4	30.3	23.2
65	45.9	47.5	42.4	35.3	25.2
80	43.9	46.4	42.9	35.8	25.2
95	43.4	45.9	42.4	36.3	25.2
110	25.7	25.7	29.3	33.8	22.2
125	22.7	23.2	24.2	25.7	18.2

Tabela B.40 - Temperatura ($^{\circ}\text{C}$) através da coluna de grãos durante o Teste 20, no segundo estágio.

TEMPO (MIN)	PONTOS					
	B3	A3	5	6	A4	B4
5	35.3	35.3	32.8	25.7	18.2	17.7
20	40.9	45.9	35.3	30.3	23.2	21.2
35	41.9	48.5	35.3	32.3	26.3	27.3
50	40.4	47.5	36.3	33.3	31.3	29.3
65	42.4	48.5	40.4	38.4	35.8	35.3
80	40.4	46.4	41.4	39.4	36.3	35.8
95	38.9	44.9	41.9	39.9	36.8	35.8
110	23.2	26.2	32.3	32.8	34.3	34.3
125	21.2	23.2	25.2	25.7	26.2	26.2