

LUIZ ALBERTO RAMOS USTRA

Engenheiro Industrial Mecânico

SECAGEM DE GRÃOS DE ARROZ EM LEITO FLUIDIZADO

DISSERTAÇÃO apresentada ao Programa de Mestrado em Ciência e Tecnologia Agroindustrial da Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciência e Tecnologia Agroindustrial.

Orientador : Prof. Dr. Moacir Cardoso Elias
Co-orientador : Prof. Dr. Wolmer Brod Peres

Pelotas/RS – Brasil
2005

LUIZ ALBERTO RAMOS USTRA
Engenheiro Industrial Mecânico

SECAGEM DE GRÃOS DE ARROZ EM LEITO FLUIDIZADO

APROVAÇÃO: 2005

COMISSÃO EXAMINADORA:

Prof. Dr. Moacir Cardoso Elias – FAEM/UFPEL – Orientador

Prof. Dr. Wolmer Brod Peres – FEA/ UFPEL – Co-Orientador

Prof. Dr. Manoel Luiz Brenner de Moraes - FAEM/ UFPEL

Prof. Dr. Francisco Amaral Villela - FAEM/ UFPEL

Dados de catalogação na fonte:

(Marlene Cravo Castillo – CRB-10/744)

U88s Ustra, Luiz Alberto Ramos

Secagem de grãos de arroz em leito fluidizado / Luiz Alberto Ramos Ustra; orientador Moacir Cardoso Elias; co-orientador Wolmer Brod Peres - Pelotas,2005.-95f. ; il. - Dissertação(Mestrado) –Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Agroindustrial. Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel. Universidade Federal de Pelotas. Pelotas, 2005.

1. Arroz 2. Secagem de grãos 3. Leito fluidizado
4. Eficiência na secagem I. Elias, Moacir Cardoso
(orientador) II .Título.

A Graça, Juliana e Guilherme. Minha família. Minha fortaleza.

Reconhecimento

Para mim é um prazer reconhecer e agradecer a contribuição de tantas pessoas na elaboração desta dissertação, através do apoio, motivação, palavras de incentivo, orientação, críticas, contribuições e correções.

Os créditos deste trabalho pertencem ao Departamento de Ciência e Tecnologia Agroindustrial (DCTA), Faculdade de Agronomia (FAEM) e Faculdade de Engenharia Agrícola (FEA) que através de suas instalações, laboratórios, professores, servidores técnicos e administrativos, estudantes de graduação e pós-graduação nele participaram direta ou indiretamente.

A colaboração das empresas JOSAPAR e Cooperativa Arrozeira Extremo Sul, fornecendo matéria prima, foi imprescindível.

Foi fundamental a amizade e a competência de meus orientadores Drs. Moacir Cardoso Elias e Wolmer Brod Peres.

O apoio de minha família e amigos foi inesquecível e suavizou os momentos difíceis e de desânimo.

A todos, o meu reconhecimento e agradecimento. Sempre serão lembrados.

SUMARIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1	PRODUÇÃO E CONSUMO DE ARROZ	4
2.2	O ARROZ EM CASCA	6
2.2.1	Composição	6
2.2.2	Umidade de colheita	8
2.2.3	O arroz como partícula	8
2.3	A SECAGEM	9
2.3.1	Fundamentos da secagem	9
2.3.2	Métodos de secagem	14
2.3.2.1	Secagem estacionária	16
2.3.2.2	Secagem intermitente	17
2.3.2.3	Secagem continua	17
2.3.2.4	Secagem em leito fluidizado	18
2.3.2.4.1	Aspectos fundamentais do leito fluidizado	18
2.3.2.4.2	Operação de secagem	21
2.3.2.4.3	Eficiência da secagem	23
2.4	O ARROZ EM CASCA COMO PARTÍCULA FLUIDIZAVEL	25
2.4.1	Classes	25
2.4.2	Dimensões e forma	25
2.4.3	Porosidade	27
2.4.4	Peso específico aparente ou peso volumétrico	28
2.4.5	Densidade do grão	29
2.4.6	Calor específico	29
2.4.7	Velocidade terminal.....	30
2.4.8	Velocidade mínima de fluidização.....	30
2.4.9	Permeabilidade do arroz em casca	31
2.4.10	O arroz como partícula fluidizável	31
2.4.11	Temperatura vítrea	32
3	MATERIAL E MÉTODOS	34
3.1	Material experimental	34
3.2	Métodos	35
3.2.1	Recepção e condicionamento prévio	36
3.2.2	Caracterização tecnológica do arroz em casca	36
3.2.2.1	Dimensões e unidades derivadas	36
3.2.2.2	Propriedades gravimétricas	37
3.2.2.3	Porosidade	38
3.2.2.4	Velocidade terminal	38

3.2.2.5	Calor específico	38
3.2.3	Estabilização das amostras	39
3.2.4	Secagem	39
3.2.4.1	Secagem estacionária (SE)	40
3.2.4.2	Secagem com fluidização incipiente (SI)	41
3.2.4.3	Secagem fluidizada (SF3 e SF5)	42
3.2.5	Determinação de umidade	43
3.2.6	Variáveis fluidodinâmicas e psicrométricas	44
3.2.6.1	Velocidades	44
3.2.6.2	Alturas e expansão do leito	44
3.2.6.3	Perda de carga no leito	44
3.2.6.4	Fluxo de ar	44
3.2.6.5	Variáveis psicrométricas do ar	45
3.2.7	Condição de fluidização do arroz em casca	45
3.2.8	Eficiência térmica da secagem	45
3.3	Modelo estatístico	46
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	47
4.1	Caracterização do arroz como partícula fluidizável	47
4.2	Secagem	49
4.2.1	Estudo 1 – Secagem estacionaria	50
4.2.2	Estudo 2 – Secagem em fluidização incipiente	54
4.2.3	Estudo 3 – Secagem fluidizada 1:3 (SF3)	60
4.2.4	Estudo 4 – Secagem fluidizada 1:5 (SF5)	65
4.2.5	Comparação entre os regimes de secagem	70
5	CONCLUSÕES	74
6	REFERÊNCIAS	75
	APÊNDICE	82
	ANEXOS	83

INDICE DE TABELAS

		Pagina
Tabela 1	Oferta e demanda mundial de arroz beneficiado	4
Tabela 2	Produção mundial e brasileira de arroz em casca	5
Tabela 3	Produção brasileira de arroz em casca	5
Tabela 4	Participação do Rio Grande do Sul na produção nacional de arroz em casca	6
Tabela 5	Valores nutricionais do arroz	7
Tabela 6	Classificação do arroz em casca (IRRI)	25
Tabela 7	Propriedades de partículas não esféricas	26
Tabela 8	Etapas realizadas no experimento	35
Tabela 9	Dimensões básicas e derivadas do arroz em casca IRGA 418	47
Tabela 10	Propriedades gravimétricas e porosidade do arroz em casca IRGA 418	47
Tabela 11	Sistemas utilizados na secagem de arroz em casca no experimento	49
Tabela 12	Condições psicrométricas do ar	50
Tabela 13	Variação da umidade e eficiência na secagem estacionária	52
Tabela 14	Variação da umidade e eficiência na secagem incipiente 1:3	55
Tabela 15	Variação da umidade relativa do ar de saída por ciclo na secagem SI	57
Tabela 16	Perda de carga e altura do leito	59
Tabela 17	Variação da umidade relativa do ar de saída por ciclo na secagem com fluidização incipiente 1:3	61
Tabela 18	Variação da umidade relativa do ar de saída por ciclo na secagem fluidizada 1:3	62
Tabela 19	Perda de carga e altura do leito	64
Tabela 20	Variação de umidade e eficiência na secagem fluidizada 1:5 (SF5)	66
Tabela 21	Variação da umidade relativa do ar de saída, por ciclo na secagem fluidizada 1:5	67
Tabela 22	Perda de carga e altura do leito	69
Tabela 23	Parâmetros operacionais nos tratamentos de secagem	70
Tabela 24	Variação da umidade por regime de secagem	71
Tabela 25	Consumo de calor e ar seco nas secagens estacionaria e fluidizada. ...	73
Quadro 1	Parâmetros operacionais na secagem estacionária	51
Quadro 2	Parâmetros operacionais na secagem com fluidização incipiente 1:3	54
Quadro 3	Parâmetros operacionais na secagem com fluidização plena 1:3	60
Quadro 4	Parâmetros operacionais na secagem com fluidização plena 1:5	65

INDICE DE FIGURAS

	Pagina
Figura 1	Isotermas de sorção ou de equilíbrio 11
Figura 2	Curvas de variação de umidade 13
Figura 3	Relação entre perda de carga e velocidades nos leitos fluidizados 19
Figura 4	Ciclo inicial na secagem do arroz em casca, em leito fluidizado com ar aquecido. 23
Figura 5	Classificação de Geldart para fluidização de partículas 32
Figura 6	Esquema da instalação do secador experimental 35
Figura 7	Parâmetros operacionais da secagem estacionária 52
Figura 8	Variação da umidade na secagem estacionária 53
Figura 9	Variação da umidade na secagem com fluidização incipiente 56
Figura 10	Variação da umidade relativa do ar de saída, por ciclo 57
Figura 11	Comparação entre as velocidades mínimas determinadas e calculadas 58
Figura 12	Variação da umidade na secagem com fluidização plena 1:3 (SF3) 61
Figura 13	Variação da umidade relativa do ar de saída, por ciclo 63
Figura 14	Variação da umidade na secagem com fluidização plena 1:5 (SF5) 67
Figura 15	Variação da umidade relativa do ar de saída 68
Figura 16	Variação das umidades normalizadas por regime de secagem 72

RESUMO

LUIZ ALBERTO RAMOS USTRA, Universidade Federal de Pelotas, 2005. Secagem de grãos de arroz em leito fluidizado. Professor Orientador: Moacir Cardoso Elias. Professor Co-orientador: Wolmer Brod Peres.

Para verificar a condição de fluidização e a avaliação quantitativa de parâmetros operacionais de secagem em leito fluidizado, grãos de arroz IRGA 418 com umidade de colheita acima de 21% foram submetidos, em secador experimental, a três condições de secagem em leito fluidizado e a uma secagem estacionária. As secagens em leito fluidizado constituídas de quatro ciclos de fluidização de sete minutos, intercalados com períodos de temperagem, removeram a umidade dos grãos em percentuais variáveis entre 21 e 26% e ocorreram nas seguintes condições: I) secagem em fluidização incipiente, com relação de intermitência 1:3; II) secagem em fluidização plena com relação de intermitência 1:3 e 1:5. Todas as secagens foram operadas com ar forçado, aquecido a $42\pm 3^{\circ}\text{C}$ e com velocidades variáveis. Foram avaliados e comparados as condições de fluidização dos grãos de arroz e os desempenhos operacionais e energéticos nas secagens estática e fluidizada. Da análise dos resultados concluiu-se que: 1) o arroz com umidade de colheita é fluidizável assumindo a classe D na classificação GELDART; 2) O arroz pode ser seco de forma fluidizada, sendo mais eficaz a secagem com fluidização incipiente, observando-se melhores taxa de remoção de umidade e eficiência térmica, quando comparada com a secagem estacionária e com a fluidização plena; 3) A secagem é mais eficiente nos primeiros ciclos de fluidização quando os grãos têm maior grau de umidade.

Palavras-chave: *Oryza sativa* L, secagem fluidizada, leito fluidizado, intermitência, desempenho operacional, eficiência térmica

ABSTRACT

LUIZ ALBERTO RAMOS USTRA, Universidade Federal de Pelotas, 2005. Drying in fluidized bed of rice grains. Adviser: Moacir Cardoso Elias. Co-adviser: Wolmer Brod Peres.

To verify the fluidization conditions and evaluate the operational standards of drying in fluidized bed, rice beans IRGA 418 with harvest moisture were tested in an experimental dryer on three conditions of fluidized bed and one on fixed bed drying. The fluidized bed drying were composed of four cycles of fluidization with seven minutes each, with intervals of tempering, removing from the rice beans the moisture between 21 to 26% and happening on the following situations: I) incipient fluidized drying with intermittent ratio of 1:3; II) drying in fast fluidized bed with intermittent ratio of 1:3 and 1:5, all operating with forced air heated at $42 \pm 3^{\circ}\text{C}$ and variables velocitys. Were evaluate and compared the conditions of fluidized of the rice beans and the operational and energetical performance on both static and fluidized dryings. The results of this project are: 1) the rice bean with the harvest moisture is fluidized at standart D on the GELDART classification; 2) The rice can be dried at fluidized form being more effective the incipient fluidization drying due to the removal of moisture and the thermal efficiency, when compared with the static and fast fluidizations drying; 3) The drying is more effective on the first stages of fluidization when the moisture content is higher at the beans.

Keywords: Oryza sativa L, fluidized drying, fluidized bed, intermitence, operational performance, thermal efficiency,

1. INTRODUÇÃO

O arroz é um dos suportes econômicos do Estado do Rio Grande do Sul. Com uma área cultivada de aproximadamente um milhão de hectares e produtividade próxima a 6,0 toneladas por hectare, a lavoura arrozeira gaúcha produziu 6,31 milhões de toneladas na safra 2003/2004, o que representa 49,20% da produção brasileira de arroz em casca (CONAB,2004; IRGA, 2004). Estes valores expressivos, salvo incidentes climáticos, vêm se mantendo nos últimos anos.

O Estado tem uma infra-estrutura preparada para processar esta safra, destacando-se a região Sul, que segundo o IRGA (2003), tem a capacidade instalada para secar a terça parte do arroz colhido no Rio Grande do Sul. Há também na região uma forte concentração de indústrias de beneficiamento.

A perecibilidade intrínseca dos grãos recém colhidos requer que sejam imediatamente pré-beneficiados e armazenados de forma segura, constituindo matéria prima para comercialização e abastecimento da indústria.

As variações de colheita, nem sempre previsíveis e o curto tempo entre a colheita e a secagem têm estimulado a investigação de métodos para aumentar a produtividade das instalações de pré-processamento, a maior eficiência dos secadores e novas tecnologias de secagem sem prejuízo na qualidade final dos grãos.

Tecnologicamente estas pesquisas orientam-se para a redução do tempo de secagem, a eficiência energética, a otimização dos processos e da matéria prima, a redução de desperdícios, além do condicionamento das operações em relação ao meio ambiente.

A consciência de que o estoque energético é finito e que o seu emprego atinge o meio ambiente tem orientado a ciência e a indústria para investigações que minimizem seus efeitos permanentes na natureza. Os paradigmas aceitos a partir do final do século passado reorientaram o pensamento da sociedade da visão técnico-econômica para um foco técnico-ambiental e muitos esforços têm sido dispendidos na busca do equilíbrio no binômio energia e meio ambiente.

A secagem é uma operação vital neste cenário. Destinada a evaporar de forma controlada a água contida nos grãos, emprega diretamente a energia térmica em expressivas quantidades, além de liberar efluentes gasosos típicos. No curto período do tempo de colheita, a agroindústria gaúcha consome em torno de 458 Gwh de energia térmica na evaporação das 606 mil toneladas de água necessárias para reduzir a umidade de colheita estimada em 22% para o nível seguro de 13 % (base úmida).

Uma alternativa tecnológica que vem sendo objeto de investigações científicas é a secagem grãos em leito fluidizado. Suas reconhecidas vantagens como a uniformidade de temperaturas e umidade nos produtos secos, a alta capacidade de secagem pela eficiente transferência de massa e energia, principalmente em umidades elevadas, tempo reduzido de secagem pela rapidez na remoção da umidade e a facilidade de controles abrem aos secadores em leito fluidizado um grande espectro de oportunidades. Além disso, os equipamentos são menores que os convencionais, reduzindo investimentos nas instalações. Por suas características funcionais, a secagem em leito fluidizado opera com elevados fluxos de ar quente e provoca uma intensa movimentação dos grãos, parâmetros cujos efeitos sobre a qualidade, principalmente o índice de grãos quebrados, sempre preocuparam a indústria.

O seu uso para secagem de arroz recém colhido já é corrente nos países asiáticos, responsáveis por 90% da produção mundial de arroz e diversos trabalhos já sinalizam a possibilidade de empregar os leitos fluidizados na fase inicial de secagem com os grãos na umidade de colheita. Os grãos de arroz em casca, recém colhidos, têm características adequadas para a secagem em leito fluidizado. São de dimensões pequenas, escoam e movimentam-se com facilidade nas condições adequadas. Apesar do formato não esférico (elipsóide alongado) que torna singular o seu comportamento em fluidização e da sensibilidade à temperatura, o controle operacional dos leitos fluidizados permite a sua secagem.

Em algumas indústrias de parboilização de arroz, após a autoclavagem e com a superfície saturada de umidade, o arroz, com os grãos gelatinizados, passa por uma secagem em leito fluidizado, recebendo altas temperaturas num curto espaço de tempo. Estas condições dificilmente podem ser aplicadas ao arroz recém colhido com umidades mais baixas e também mais sensível à temperatura, requerendo relações tempo-temperatura adequadas.

Este trabalho integra a linha de pesquisa em pós-colheita e industrialização de grãos, e busca subsídios para a secagem de arroz em casca recém colhido na técnica do leito fluidizado a baixas temperaturas, através dos seguintes objetivos:

- 1) Caracterizar o arroz em casca como partícula fluidizável.
- 2) Determinar os parâmetros operacionais de secagem e da fluidização em secador experimental.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 - PRODUÇÃO E CONSUMO DE ARROZ.

O arroz (*Oryza sativa L*), originário do Sudeste Asiático, destaca-se por suas qualidades nutricionais como suporte alimentar para mais de 50% da população mundial, em cuja dieta alimentar provê 20% das calorias, superando o trigo e o milho que participam com 19% e 5% respectivamente (FAO, 2004;). Após o trigo, é o cereal mais produzido no Mundo sendo cultivado em todos os continentes.

A demanda mundial do arroz beneficiado está na ordem de 410 milhões de toneladas e mostra um crescimento constante (Tabela 1). Os estoques mundiais que já atingiram 150 milhões de toneladas situam-se atualmente na faixa de 80 milhões de toneladas e vem sendo reduzidos progressivamente pois o consumo está pelo menos 20 milhões de toneladas acima do que se produz, o que tem provocado ações internacionais para elevar a sua produção.

Tabela 1 - Oferta e Demanda Mundial de Arroz Beneficiado (Milhões de Toneladas)

Safra	1999/2000	2000/01	2001/02	2002/03	2003/04*
Estoque Inicial	135,5	145,6	147,9	135,8	105,4
Produção	408,7	397,4	398,6	380,0	389,3
Importações	22,9	24,4	27,9	26,9	25,7
Consumo	398,5	395,7	410,7	410,4	412,3
Exportações	22,9	24,4	27,9	26,9	25,7
Estoques finais	145,6	147,9	135,8	105,4	82,4

Fonte: USDA, Brandalitze Consulting (*) Nota: estimativas.

A produção mundial de arroz em casca atingiu 600 milhões de toneladas em 2002 (FAO, 2004) marca a qual tem se mantido desde 1996 (Tabela 2). Deste total, 90% é produzido na Ásia, sendo a China o maior produtor.

A FAO em suas frentes de apoio humanitário busca a redução da fome no mundo e tem como um dos principais apoios a produção de arroz, já que o mesmo faz parte do cardápio diário naqueles países onde a fome está presente. Dentro desta perspectiva, o ano de 2004 foi denominado pela ONU como o “Ano Internacional do Arroz” como forma

de incentivar sua produção e estimular o crescimento tecnológico desta cultura, ajustando a curva produção demanda.

Neste cenário, o Brasil com uma participação não maior que 1,55 % da produção mundial, é o maior produtor de arroz da América Latina com um volume de produção ainda insuficiente para atender sua demanda interna, prevendo importar 700 mil toneladas no ano de 2005, como se verifica nas Tabelas 2 e 3.

Tabela 2. Produção mundial e brasileira de arroz em casca (em 1000 t)

Ano	Produção mundial	Países dos países asiáticos	Produção brasileira.
1996	568827	521696	8644
1997	576840	527824	8352
1998	579587	535346	7716
1999	611283	555259	11710
2000	602605	549271	11090
2001	597787	544677	10195
2002	676280	523030	10489

Fonte : FAO, 2004

Tabela 3 - Produção brasileira de arroz em casca (em 1000t)

Safra	Estoque inicial	Produção	Importação	Suprimento	Consumo	Exportação	Estoque final	Fontes:
1997/98	1575	8463	2009	12047	11750	9,9	287	CON
1998/99	287	11582	1338	13207	11700	37,7	1470	AB -
1999/00	1470	11423	936	13829	11850	21,1	1958	2004 ;
2000/01	1958	10386	951	13296	11950	24,4	1321	IRG
2001/02	1321	10626	737	12685	12000	21,9	663	A
2002/03	663	10367	1601	12631	12250	23,5	358	2004
2003/04	358	12808	1100	14266	12660	40	1566	Obs.
2004/05*	1566	12632	700	14899	12830	100	1969	* - esti

mativa realizada pela CONAB em dezembro de 2004

O Rio Grande do Sul é responsável por aproximadamente 50 % da produção brasileira (Tabela 4) graças a uma elevada produtividade de lavoura (6110 kg.ha⁻¹ na safra 2003/2004) em uma área plantada de quase um milhão de hectares distribuída em

123 municípios, através de 12000 produtores (IRGA,2004). A área plantada no Brasil na safra 2003/2004 passou de 3.183 para 3.575 mil hectares, ou seja, um incremento de 12,3% atingindo 12.477 toneladas (CONAB, 2004).

Tabela 4 - Participação do RS na produção nacional de arroz em casca (em 1000 t)

Safra	Brasil	RS	Participação (%)
1999/2000	11423	5087	44,50
2000/2001	10386	5190	50,00
2001/2002	10626	5464	51,40
2002/2003	10616	5064	47,70
2003/2004	12808	6301	49,19
2004/2005	12632*	5854*	46,35*

Fontes: CONAB -2004 ; IRGA 2004

Obs. * - estimativa realizada pela CONAB em dezembro de 2004.

Para o Rio Grande do Sul e especificamente a região Sul do Estado, o arroz é um de seus suportes econômicos. Nesta região foram plantados 172232 hectares na safra 2003/2004, 17% do Estado, com produtividade de 5750 quilogramas por hectare. A região também conta com dezesseis indústrias beneficiadoras, concentradas em Pelotas e municípios vizinhos, que beneficiam 22% do arroz produzido no Estado.

Para chegar ao cardápio da população, o arroz passa, desde a semeadura até o beneficiamento, por uma seqüência de operações unitárias e com a concorrência de dois elementos fundamentais para a humanidade: a água e a energia. O arroz devolve à natureza parte destes dois componentes, pois a água de sua umidade retorna à atmosfera. Este cereal também produz sua própria energia, suficiente para atender pelo menos as demandas do processamento e beneficiamento (CIENTEC, 1986; Weber,1995).

2.2 O ARROZ EM CASCA.

2.2.1 Composição

A cariopse do arroz tem como principal componente o endosperma, constituinte principal do arroz branco polido. É formada por grânulos de amido, proteínas e outros

constituintes (Ramos,1984). Industrialmente, o grão de arroz é constituído de endosperma, farelo e casca.

O farelo é o subproduto obtido no polimento do grão descascado, sendo constituído de pericarpo, tegumento, aleurona, germe e porções superficiais e/ou pequenas partículas de endosperma amiláceo (Loeb et al, 1979; Ramos, 1984) . É constituído de 13 a 14,5% de lipídeos, de 6,1 a 8,5% de cinzas e 48,3 a 55,4% de carboidratos (Salunkhe et al.,1985).

A casca do arroz representa cerca de 23% do seu peso e constitui resíduo de bom valor energético, aproveitável na geração de calor para a secagem e/ou produção de vapor para processos ou geração de energia elétrica (CIENTEC,1986; Weber,1995; Santos,2004).

O arroz é constituído de proteínas (6,7 a 8,3 %), lipídeos (2,1 a 2,7%), cinzas (3,4 a 6,0%) e 70,5 a 84,2% de carboidratos. Após o beneficiamento, já descascado e polido, o grão, sem a casca e o farelo, passa a ter nova proporção quanto a composição: carboidratos 90,5 a 90,8 %, proteínas 7,3 a 9,3 %, lipídeos 0,4 a 0,6% e cinzas 0,4 a 0,9% (Rombaldi,1988).

Tabela 5 – Valores nutricionais do arroz - Porção de 50 g (¼ de xícara)

Arroz	parboilizado		integral		polido (branco)	
	Quantidade	(%VD)	Quantidade	(%VD)	Quantidade	(%VD)
Valor calórico (kcal)	180	7	180	7	180	7
Carboidratos (g)	40	10	38	10	40	10
Proteínas (g)	4	8	4	8	4	8
Gorduras totais (g)	0	0	0	0	0	0
Gorduras saturadas (g)	0	0	0	0	0	0
Colesterol (mg)	0	0	0	0	0	0
Fibra alimentar (g)	<1	0	<1	2	< 1	1
Cálcio (mg)	30	4	1	2	12	1
Ferro (mg)	1.45	10	1	7	0.4	3
Sódio (mg)	0	0	0	0	0	0

VD - Valores Diários de referência com base em uma dieta de 2500 calorias.

Fonte: USDA e Parboiling in Rice-Postharvest Technology Ottawa International - Research Center

Os triglicerídeos contribuem com 85% dos lipídeos no farelo e 60% no endosperma, sendo os principais ácidos graxos no óleo de arroz oléico, linoleico e palmítico, com 43, 36 e 14% do total, respectivamente (Salunkhe et al, 1985).

Todas essas características benéficas podem ser comprometidas pelas inadequações técnicas ou operacionais ao longo da cadeia produtiva, nas etapas de secagem e armazenamento e industrialização.

2.2.2 Umidade de colheita

O arroz fisiologicamente maduro, quando da colheita, deve ter uma umidade entre 18 e 23%, base úmida, dependendo da variedade, do sistema de colheita e de secagem (Elias et al., 2003). A colheita deve ser imediata para evitar perdas na lavoura, pois havendo clima úmido e/ou quente, perde-se produto. Em clima seco, a permanência dos grãos na lavoura expõe o grão a variações diárias de condições climáticas e das oscilações das temperaturas e umidades relativas do ar que se alteram ao longo do dia e da noite, provocando estresses nos grãos o que induz fissuramentos, resultando em quebras na secagem e no beneficiamento.

Assim, a secagem deve ser imediata após a colheita, pois quanto maior o tempo na lavoura e/ou entre a colheita e a secagem, maiores serão as perdas na qualidade como a incidência de quebrados, trincamentos e defeitos de origem biológica como os manchados, picados e ardidos (Elias et al., 2004). Grãos colhidos com umidades acima de 23% ainda contam com unidades verdes e aqueles colhidos com umidades abaixo de 18% tendem a produzir trincamentos que resultarão em grãos quebrados no beneficiamento.

2.2.3 O arroz como partícula.

Depois de colhido o arroz passa por uma série de operações unitárias até atingir a condição alimentar. Uma fase inicial denominada pré-processamento, com as etapas de recepção, pré-limpeza e secagem, condiciona os grãos para a armazenagem que busca preservar a sua qualidade (Elias et al,2001). Dos silos de armazenagem o arroz é a seguir industrializado, transformando-se em produto comestível nas suas formas tradicionais: branco, integral ou parboilizado. Neste percurso gera sub-produtos como farelo de arroz, grãos quebrados e quirera que são matérias primas para a indústria de óleo, rações ou farinhas. A eficiência neste processamento depende do desempenho de equipamentos

cujos projetos e desenvolvimentos são elaborados a partir das especificidades dos grãos, tornando fundamental o conhecimento das características físicas, químicas, biológicas, e suas influências no desempenho dos processos no efeito final da apresentação nutricional e no controle de perdas quantitativas e qualitativas.

Equipamentos de secagem, transporte e armazenagem são dependentes das propriedades físicas e termofísicas dos grãos de cada cultivar a cada grau de umidade (Deshpande et al.,1993; Gupta,1997; Syuhral et al., 2003) e o seu conhecimento é fundamental no projeto de equipamentos.

Na secagem de arroz em casca em leito fluidizado, escopo deste trabalho, foi dada ênfase às propriedades físicas que alteram a fluidodinâmica e as transferências de massa e energia. Diretamente relacionado com esta técnica, o arroz natural deve ser caracterizado em relação às suas propriedades físicas e termofísicas como dimensões, forma e parâmetros derivados, densidades, porosidade, velocidade terminal e calor específico, que além de permitir sua classificação como partícula fluidizável esclarece a sua interação com o fluido de secagem, ar quente, cuja psicrometria também deve ser conhecida. Para grãos com umidades de colheita é fundamental o domínio seguro destes parâmetros fluidodinâmicos visto que a velocidade de evaporação na sua superfície é superior à difusão da água, ocasionando gradientes térmicos e de umidade com conseqüente fissuramento dos grãos e quebras no beneficiamento.

Neste método, a ação mecânica na fluidização é vigorosa, submetendo os grãos a choques e movimentos intensos podendo concorrer no aumento do percentual de quebrados, cujo índice é referência para operações comerciais (Elias, 2002).

2.3 A SECAGEM

2.3.1 Fundamentos da secagem

A secagem é operação vital no processamento pós-colheita de produtos agrícolas. Tem a finalidade de reduzir a umidade dos grãos a níveis seguros que permitam a conservação da sua qualidade, dificultando o desenvolvimento de pragas e microrganismos (Elias et al., 2001).

A água participa ativamente na formação dos grãos transportando a partir da raiz e folhas, as substâncias nutritivas que por processos bioquímicos se polimerizam formando

amido, proteínas e lipídeos durante a fase de maturação. Atingida esta, os grãos se tornam independentes da planta e de acordo com as condições psicrométricas do ar perdem umidade até a colheita (Pereira, 1991; Peres, 2001). Além disso, a água é veículo para o desenvolvimento microbiano e atividade química e sua disponibilidade é determinada não só pela quantidade como pela natureza de sua união aos alimentos. A compreensão desta fixação esclarece o papel que a água desempenha durante a secagem e na conservabilidade durante a armazenagem.

Segundo Lasseran (1978) e Peres (2001) ocorrem quatro tipos de água que correspondem aos diversos níveis de hidratação do produto. Dependem da natureza das ligações físico-químicas existentes entre a matéria seca e as moléculas de água. O primeiro tipo de água é constituído de camada monomolecular, ligada a agrupamentos moleculares fortemente polarizados de origem biológica. O segundo tipo é representado por uma camada polimolecular, fixada à camada precedente (1º. Tipo). Essas diferentes camadas, monomoleculares, que constituem a polimolecular são ligadas à matéria seca por ligações eletromagnéticas, denominadas forças de Van der Waals. É água não solvente, sem papel biológico e fortemente adsorvida. Estes dois primeiros tipos de água correspondem a níveis de hidratação relativamente baixos e não são removidos na secagem, não trazendo nenhum prejuízo por serem inertes sob o ponto de vista biológico.

Um terceiro tipo de água é constituído de água ligada sob tensão osmótica, fracamente adsorvida. É solvente, retendo substâncias. Além disso, permite reações enzimáticas e o desenvolvimento de fungos. Sua presença corresponde a níveis de hidratação acima de 13%, base úmida, e é facilmente evaporada, sendo removida em grande parte na secagem.

Finalmente a água de impregnação constitui o quarto tipo de água presente nos grãos. Também denominada de água livre mantém-se entre os poros da matéria seca sem afetar as substâncias adsorventes, que funcionam somente como suporte. É água facilmente removida na secagem e sua presença é inadmissível no armazenamento, pois é veículo para o desenvolvimento de fungos e bactérias.

Assim, a água está adsorvida ou fortemente ligada à substância adsorvente. A interação água-substância adsorvente é representada pelos termos sorção (adsorção e absorção) que significam receber água, enquanto dessorção significa perder.

Os grãos têm um comportamento higroscópico, recebendo ou perdendo água. O umedecimento ocorre de fora para dentro e a secagem de dentro para fora. A perda de

água é feita na forma de vapor para o ar ambiente, de acordo com as características higrométricas da atmosfera que os envolve (Peres, 2001).

Para cada condição psicrométrica corresponde um grau de umidade no grão, caracterizado pelo processo dinâmico da água. É o denominado equilíbrio higroscópico e ocorre quando o ar ambiente e a massa de grãos estiverem a igual temperatura e a água do grão com a mesma pressão de vapor que a umidade do ar. Nesta condição identifica-se a umidade de equilíbrio que é característica de cada tipo de grão. Para o arroz em casca depende, além da temperatura e umidade relativa do ar, também da variedade, do grau de maturação e das condições a que o grão foi submetido desde a colheita.

O registro destas umidades relacionadas com a umidade relativa do ar e temperaturas deu origem as isotermas, conjunto de curvas que caracterizam o estado psicrométrico do ar e o equilíbrio higroscópico do grão. A forma mais adequada de estudar as propriedades da água é o estudo das isotermas de sorção e dessorção, que são curvas que relacionam a pressão parcial de vapor da água nos alimentos com o conteúdo de água. A cada ponto da curva corresponde um índice denominado atividade de água (a_w).

As isotermas típicas dos alimentos têm a forma sigmoideal (Figura 1).

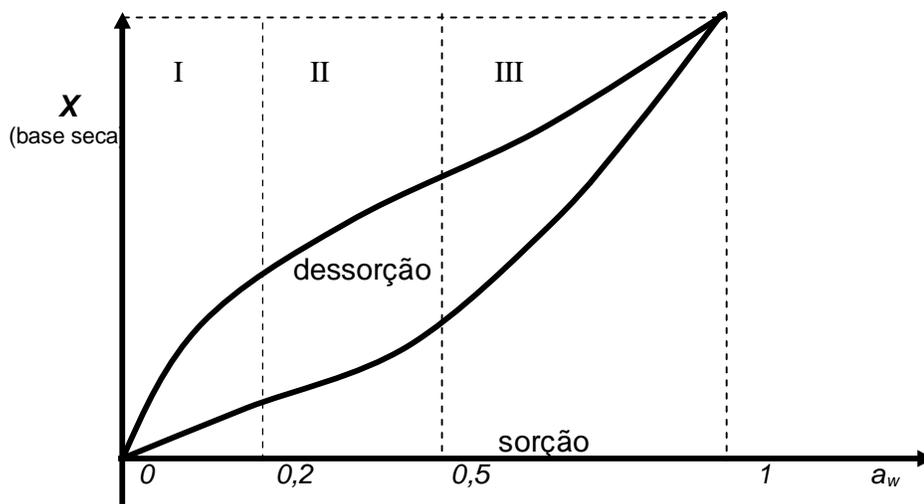


Figura 1. Isotermas de sorção ou de equilíbrio

de acordo com diversos autores. Dependem ainda se os grãos estão na fase de sorção ou dessorção.

Diversos modelos teóricos ou empíricos foram propostos para expressar a umidade de equilíbrio dos grãos. Segundo Pereira (1991), nenhum deles até o momento foi capaz de prever exatamente o conteúdo de umidade de equilíbrio de grãos para todas as faixas de temperaturas e umidades relativas. As equações propostas por Kelvin, BET, Harkins-Jura e Rounsleu oferecem resultados aceitáveis para determinadas faixas de umidade relativa. As equações de Henderson (1954) e Chung-Pfost (1967) são as que melhor expressam o conteúdo de umidade de equilíbrio de grãos em faixas mais amplas de temperatura e umidade relativa de 5 a 95%.

A energia necessária para remover a água monomolecular é até 20 vezes maior que a necessária para a água livre. Além do calor latente de vaporização de água é necessário agregar o denominado calor de ligação adsorvida (Peres, 2001).

Para $a_w > 0,2$, o nível de energia necessário para remover a água é basicamente o calor latente de vaporização da água expresso pela relação da termodinâmica: $Q_{evap} = 2495 - 2,42T$ (kJ.kg⁻¹), sendo T a temperatura.

Na secagem há um fenômeno de transferência simultânea de massa e energia cujo objetivo é remover a água contida em produtos úmidos. Nos grãos e outros produtos agrícolas higroscópicos, o ar, aquecido ou a temperatura ambiente, é o agente de secagem que passando pelos espaços vazios na massa de grãos, fornece o calor necessário à evaporação da umidade. A temperatura acima da ambiente associada a uma boa capacidade evaporativa (baixa UR) remove a umidade superficial das partículas na forma de vapor, por convecção. Simultaneamente os grãos assumem a temperatura do ar num percurso da superfície para o interior, por condução, e a água no interior da fase sólida percorre o caminho inverso na forma líquida ou vapor, do núcleo para a superfície, onde por convecção é liberada para o meio (Syuhral et al., 2003). Isto origina uma diferença de concentrações entre o interior, que permanece úmido e a superfície que secou parcialmente por evaporação. A evaporação ocorre na superfície do grão e as trocas de calor e de água são decorrentes das leis de equilíbrio entre o ar e o grão (Lasseran, 1981; Amato, 2002). A perda de umidade por evaporação inicia na superfície saturada do grão, cuja área superficial está revestida de água. Posteriormente esta superfície vai se reduzindo até ocorrer a evaporação da água do interior do grão (Lim et al., 2001).

Na secagem de sólidos é usual relacionar o grau de umidade com o tempo (Perry & Chilton, 1986), gerando uma curva umidade (X) x tempo (t), cuja derivada dX/dt ilustra

melhor a variação temporal da umidade, denominada de velocidade de secagem, como se pode observar na Figura n.2. onde X é o grau de umidade base seca.

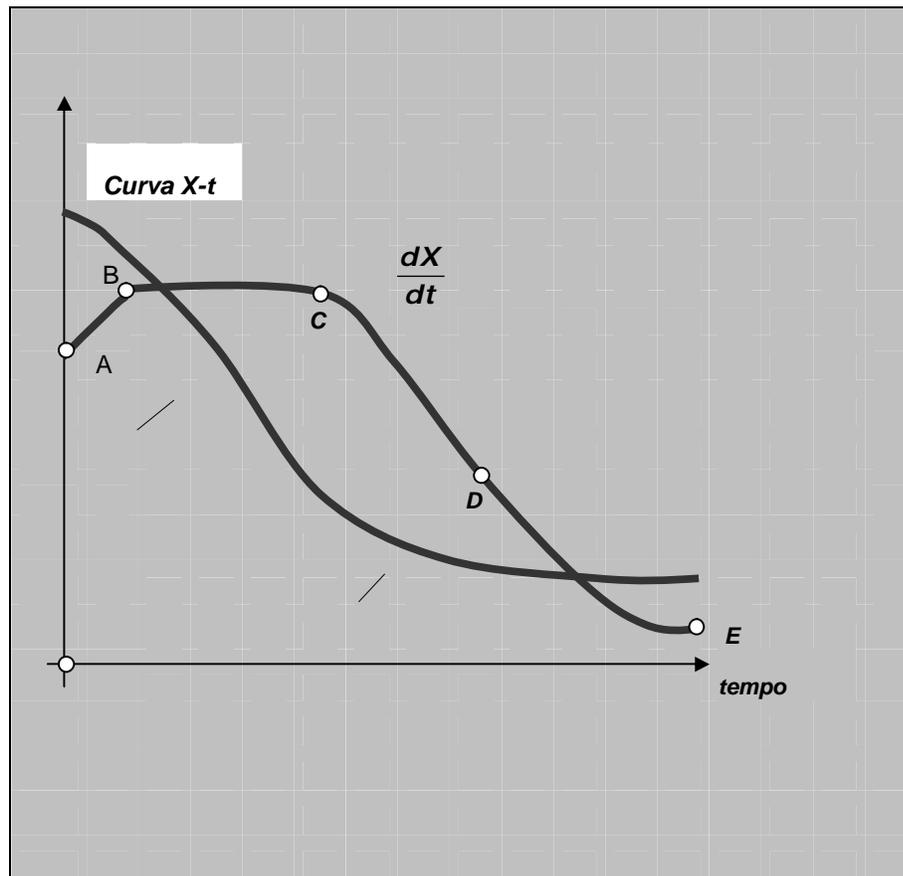


Figura 2. Curvas de variação de umidade.

O trecho inicial AB da curva $\frac{dX}{dt}$ representa o aquecimento do produto. A partir do ponto B até C, a velocidade de secagem é constante, isto é, a água evaporada é repostada imediatamente pela água interior, através do processo de difusão. No início o produto tem uma temperatura inferior a do ar e sua pressão parcial de vapor na sua superfície é bastante pequena. Por conseguinte as transferências de massa e a velocidade de secagem também são pequenas. A energia térmica que chega em excesso incrementa a temperatura do produto, elevando a pressão parcial de vapor de água e com isso a velocidade de secagem aumenta. Este fenômeno persiste até que a transferência de energia compense a da massa.

Os cereais não apresentam de forma definida este trecho de velocidade constante entrando imediatamente no trecho decrescente da curva após o aquecimento inicial (DiMattia et. al.,1996). A partir do ponto C, momento em que o fenômeno da difusão comanda o processo de secagem, a velocidade de secagem é decrescente.

2.3.2 Métodos e regimes de secagem

Tecnologicamente o arroz recém colhido pode ser seco através de diversos métodos e regimes, adotando-se inclusive combinações entre eles. Naturalmente a primeira forma é a secagem na lavoura, descartada por produzir baixa qualidade (Elias et al., 2002). Os métodos de secagem podem ser divididos em secagem natural e a secagem artificial.

A secagem natural, em terreiros, à temperatura ambiente e/ou ao sol é um método natural que traz inúmeros inconvenientes devido ao tempo e pelo espaço requeridos além da exposição dos grãos à ação de agentes biológicos e condições climáticas adversas. É empregado em pequenas produções, sendo inadequado aos grandes volumes colhidos em um curto espaço de tempo (Fuentes & Chandia, 1989).

A secagem artificial ou forçada é a mais segura. Emprega secadores de diversos tipos onde o calor de uma fonte externa é aplicado direta ou indiretamente no ar que é forçado através da massa de grãos.

Termodinamicamente são secadores adiabáticos de comportamento isoentálpico, onde o ar de secagem ao passar pelos grãos alterada a umidade e a temperatura. Já que é impossível eliminar as perdas térmicas são também identificados como semi-adiabáticos.

Os secadores podem ser divididos em dois grandes grupos. O primeiro grupo reúne os secadores denominados estacionários, caracterizados pela não movimentação dos grãos durante a secagem. Usualmente não há interrupções na injeção de ar.

O segundo grupo é caracterizado pelas movimentações simultâneas do ar e dos grãos durante a secagem, em regimes contínuos ou intermitentes.

Um caso particular deste grupo é representado pelos secadores de leito fluidizado, que operando em forma contínua ou intermitente produzem uma movimentação vigorosa dos grãos.

A operação de secagem é uma etapa complexa no beneficiamento do arroz. Envolve inúmeras variáveis que deverão ser ajustadas ao longo da operação e outras pré-definidas na regulagem inicial do secador e de acordo com a experiência da indústria ou de recomendações da tecnologia como a temperatura vítrea, temperatura do grão (Amato et al, 2002). Há fatores dos quais a secagem é dependente: velocidade do ar, umidade do ar ou mais precisamente sua capacidade evaporativa, o volume de ar e sua temperatura, a temperatura e a umidade iniciais do grão, a geometria do grão, a permeabilidade da massa de grãos e a capacidade de absorção do grão.

A melhor performance de secagem é obtida quando as condições operacionais são assumidas com o compromisso da qualidade. Assim os valores de velocidades e temperaturas do ar, temperaturas do grão, volume de alimentação, tempos de residências são controles que devem ser associados às especificidades dos grãos: umidade e temperatura iniciais, variedade, tempo após a colheita e outros.

Um destaque na secagem do arroz em casca é a difusão da água no grão. A velocidade de movimentação da água do interior para a superfície do grão em determinadas situações é menor do que a velocidade de remoção da água superficial por evaporação. No arroz, o desequilíbrio entre estas velocidades cria gradientes hídricos que leva a fissuramentos nos grãos com conseqüente quebra durante o beneficiamento. O mecanismo de movimento da água no interior dos grãos, no período de secagem decrescente ocorre por difusão de água e/ou vapor (Nuh et al.,1997).

É usual uma interrupção no aquecimento e/ou ventilação para equilibrar a dinâmica difusão/evaporação. Esta fase operacional denomina-se temperagem ou descanso. Pode ser usada também entre duas secagens em seqüência (Amato et al., 2002; Elias et al., 2003).

Significativos volumes de energia são empregados para a remoção da umidade e a otimização da secagem é um objetivo de interesse universal. Além de representar uma parcela importante nos custos de processamento, tem uma influência significativa no aspecto ambiental. O consumo de combustíveis significa alterações ambientais, devendo ser avaliadas suas eficiências térmica e energética.

Modernamente os processos térmicos, como a secagem, são analisados em modelos termodinâmicos que envolvem simultaneamente os primeiro e segundo princípios da termodinâmica. Pelo primeiro, é avaliada a eficiência energética com um enfoque técnico-econômico (a energia se conserva). Os balanços de massa e energia

informarão a relação entre as energias utilizadas e aportadas num volume de controle (secador) considerando os estoques energéticos ilimitados.

Sob uma visão técnico-ambiental a análise exergética, baseada no segundo princípio da termodinâmica (a energia se degrada), informará a qualidade das energias envolvidas no processo e o seu aproveitamento eficiente. Assim, o uso de baixas temperaturas com pequeno diferencial com o ambiente atendem a eficiência do segundo princípio.

2.3.2.1 Secagem estacionária

A secagem estacionária é efetuada em silos ou secadores estáticos onde uma coluna de grãos recebe um fluxo controlado de ar, na direção radial ou na axial. Os grãos permanecem estáticos caracterizando os chamados leitos fixos. São secos até atingir a umidade desejada, resfriados se for o caso e armazenados (Fuentes & Chandia, 1989). O ar pode ser aquecido ou não. A secagem com ar a temperatura ambiente depende das condições psicrométricas e sendo muito lenta, tem como agravante o risco de desenvolvimento microbiano nos grãos (Rombaldi, 1988; Milman, 2001; Fagundes, 2003; Elias, 2004).

As condições psicrométricas acima dizem respeito a maior ou menor capacidade evaporativa que é dependente da umidade relativa e temperatura do ar ambiente. O volume de ar por unidade de massa ou de área, denominado fluxo de ar, irá determinar o tempo de secagem para uma umidade final nos grãos. A frente de secagem, massa mais úmida que se desloca conforme a progressão da secagem, tem uma velocidade proporcional ao fluxo de ar (Lasseran, 1981).

Na secagem estacionária a temperatura do ar admissível é de 45 a 60°C em camadas não superiores a 1,50 metros. No arroz em casca são recomendadas camadas de até 1,00 metro com fluxo de ar de 4 a 18 m³.(t.min)⁻¹ (Elias et al., 2004). Devido ao longo período de contato dos grãos com o ar, não são empregadas altas temperaturas porque há uma forte tendência a isoterma ar-grão (Rombaldi, 1988; Elias et al., 2000).

2.3.2.2 Secagem intermitente

Os secadores intermitentes são os preferidos para o arroz em casca. São constituídos de uma coluna de grãos em movimento atravessada por um fluxo de ar quente em um espaço denominado câmara de secagem onde ocorrem as trocas de massa e energia. Por gravidade o arroz move-se até a base da coluna onde é coletado e elevado mecanicamente para o topo do secador, onde passa para outra câmara denominada de equalização. O volume desta câmara determina o tempo do repouso ou de equalização necessário para que os grãos sejam liberados para a câmara de secagem novamente. Este ciclo (secagem e equalização) é repetido até a massa de grãos atingir a umidade desejada, entre 12 e 14%(b.u). A relação entre os tempos de secagem e equalização é denominada de relação de intermitência e o período total de secagem é o somatório dos ciclos.

2.3.2.3 Secagem contínua

O sistema contínuo de secagem é desenvolvido em secadores específicos, denominados contínuos, onde, em uma coluna os grãos úmidos constantemente carregados no topo movem-se por gravidade até a base no tempo suficiente para atingirem a umidade desejada, saindo secos e resfriados.

Os secadores são constituídos, no mínimo, por duas câmaras alternadas, uma de aquecimento ou secagem e uma de resfriamento ou arrefecimento. Alguns modelos são dotados de uma câmara intermediária entre estas. Os grãos ingressam úmidos, são aquecidos e secam na primeira câmara onde é insuflado ar quente. Passam imediatamente a segunda câmara onde são atravessados pelo ar à temperatura ambiente e são resfriados. O processo se dá de forma ininterrupta.

Este tipo de secagem não é recomendado para o arroz em casca devido à sensibilidade deste grão a gradientes térmicos, porém admite-se o seu uso desde que se procedam alterações tais como o aumento do número de passagens e da velocidade de fluxo da massa de grãos através da câmara de secagem (Aguirre & Peske, 1992).

2.3.2.4 A Secagem em leito fluidizado

2.3.2.4.1 Aspectos fundamentais do leito fluidizado

Desde as primeiras aplicações na década de 40 do século XX, o leito fluidizado demonstrou ser uma técnica versátil no processamento de produtos particulados com

destaque para a secagem (Wong, 2002). A fluidização como técnica de processamento surgiu no século XVI, registrando-se a primeira patente em 1910 na indústria petroquímica como método de craqueamento do petróleo.

O uso típico dos leitos fluidizados inclui reatores no craqueamento, gaseificação, carbonização e calcinação, equipamentos de adsorção e dessorção, granulação e revestimento de partículas. Adaptam-se para a secagem e resfriamento de minerais, polímeros, produtos farmacêuticos, fertilizantes, produtos cristalinos e produtos agrícolas (Rhodes, 2001).

A fluidização é um processo onde um leito de material particulado, contido em uma câmara, assume um comportamento fluídico ao ser atravessado por um fluxo gasoso ou líquido com movimento vertical e ascendente injetado sob o distribuidor (Park et. al, 2000). O distribuidor é uma superfície perfurada que permite a passagem do fluido enquanto suporta o leito de particulados.

Segundo Parikh (1991), o fator de maior influência no leito fluidizado é o fluxo de fluido que ao atravessar o distribuidor é injetado de forma distribuída a elevadas velocidades, provocando a suspensão e o movimento das partículas, maximizando a exposição de suas superfícies. A velocidade é o principal parâmetro no comportamento do leito e o seu valor mínimo caracteriza o início da fluidização.

O fluido na velocidade mínima de fluidização (V_{mf}) exerce uma força de arraste que suspende e separa as partículas. As forças friccionais e a componente vertical de forças compressivas entre partículas são anuladas. O leito se expande e a queda de pressão através de qualquer seção do leito é aproximadamente igual ao peso do fluido e das partículas daquela seção. É chamada de fluidização mínima ou incipiente (Rhodes, 2001). Até atingir este ponto o leito é denominado fixo.

Novos incrementos da velocidade não alteram esta condição até as partículas atingirem a velocidade terminal (V_t) quando serão transportadas pelo fluido. Na prática, o leito fluidizado opera com velocidades situadas entre os valores mínimos e a velocidade terminal ou de transporte. Entre estes dois valores há uma ampla faixa de operação onde o grau de expansão do leito será crescente.

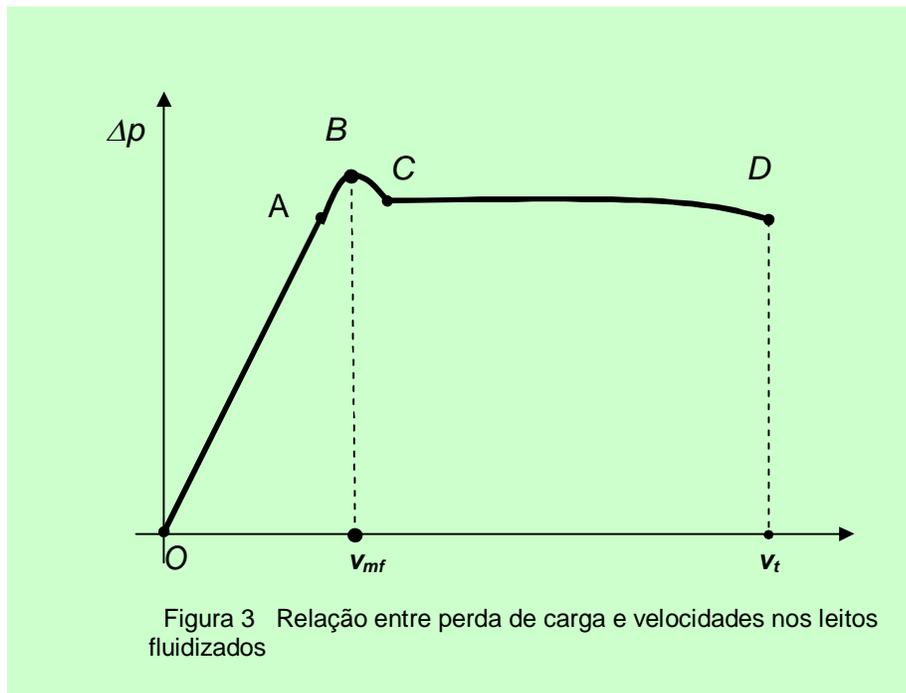
A queda de pressão através do leito pode ser vista na Figura 3, sendo proporcional à velocidade no trecho OA, região dos leitos fixos e depende da permeabilidade, da rugosidade das partículas, da densidade, da viscosidade e da velocidade superficial. O fluido percorre pequenos e tortuosos canais, perdendo energia e pressão. No trecho

inicial, até uma velocidade de $0,3 \text{ m.s}^{-1}$ o valor da perda de carga pode ser calculado pelas relações de Shedds e Baker-Aekema (ASAE, 2000). Com o aumento da velocidade ocorre a fluidização, que inicia pelo topo do leito, pois devido a forças adesivas, nem todas as partículas movimentam-se ao mesmo tempo. Atingida a fluidização com a separação das partículas e a expansão do leito, a perda de carga se reduz, sendo menor que a pressão exercida pelo peso do material, deixando de existir a proporcionalidade entre a velocidade superficial e a perda de carga (ponto B).

. Neste ponto estabelece-se a relação que determina a perda de carga

$$\Delta p = H_{mf} (1 - \epsilon_{mf}) \cdot (\gamma_g - \gamma_a) \text{ (equação 2)}$$

em que H_{mf} e ϵ_{mf} são a altura do leito e a porosidade na fluidização mínima.



O

aumento da velocidade permite ordenar as partículas na direção do fluxo de modo a oferecer menor resistência à passagem, reduzindo a perda de carga. As partículas desfazem o contato entre si e comportam-se como um fluido em ebulição (Moreira, 2001).

A partir do ponto C, os sólidos se misturam e ocorrem bolhas e erupções na superfície do leito. A perda de carga permanece constante até atingir a velocidade de transporte.

A hidrodinâmica da secagem em leito fluidizado é influenciada por variáveis bem definidas como a densidade e a porosidade da massa de grãos e a esfericidade e o diâmetro de cada grão. Estas variáveis são dependentes do grau de umidade dos grãos (Fontana, 1986; Benedetti, 1987). O estado psicrométrico do ar de secagem, sua densidade e viscosidade complementam os elementos necessários para estabelecer a relação binária sólido/gás.

A equação número 3 (Anexo A), desenvolvida por Ergun (1952) para partículas não esféricas e para escoamento através de leito fixo, combinada com a equação 2, expressa o comportamento fluidodinâmico do processo em função dos números adimensionais de Reynolds (Re_{mf}) e Archimedes (Ar) estabelecidos nas condições de fluidização mínima.

A previsão da velocidade de mínima fluidização pode ser obtida por adaptação daquela equação, ajustada para condições específicas. Para partículas com número de Reynolds variando entre 0,01 e 1000, Wen & Yu (1966) adaptaram a equação de Ergun para a forma

$$Re_{mf} = [(33,7)^2 + 0,0408Ar]^{0,5} - 33,7 \quad (\text{equação 6})$$

com precisão de $\pm 34\%$ (Canton, 1984). É válida para o arroz em casca ($Re \approx 300$ com ar a 45°C , velocidade de $1,5 \text{ m.s}^{-1}$ e diâmetro equivalente de $3,55 \text{ mm}$). Tannous et al., (1994) e McCabe (1985) apresentaram correlações para partículas grandes (equações 5 e 6 – Anexo A). A última é específica para o arroz segundo Prasad et. al. (1994). Segundo Tannous et al. (1994), as flutuações nos resultados atingem $\pm 25\%$.

As particularidades dos grãos, a relação binária sólido/fluido (gás ou líquido) e outros fatores como a geometria do leito, o tipo de distribuidor e a existência de elementos internos caracterizam as formas principais de fluidização classificadas em dois grandes grupos: agregativa e particulada.

No primeiro grupo aparecem os leitos em pistonamento que ocorrem quando uma bolha do fluido suficientemente grande ocupa toda a seção do leito separando-o em duas camadas. A superior é empurrada para cima como se pelo efeito de um pistão, até que se desintegra. As partículas caem e simultaneamente forma-se outra bolha repetindo um movimento oscilatório instável. São também chamados de leitos borbulhantes e são característicos dos sistemas gás/sólidos.

Na fluidização agregativa, o gás atravessa o leito na forma de bolhas ou canais quase isentos de sólidos. Somente uma pequena fração do gás flui entre as partículas que se movimentam de forma errática. Quando há a formação de canais preferenciais o leito é denominado “em canais” e se ocorrer a formação de um fluxo de partículas único e central é denominado de “jorro”. O jorro transporta um percentual das partículas que caem lateralmente, provocando uma circulação intensa.

Nos sistemas líquido/sólido, quando as bolhas são de tamanho próximo ao das partículas e se distribuem uniformemente no volume do leito, ocorre uma fluidização suave caracterizando os denominados leitos particulados, também denominados de leitos homogêneos, lentos, suaves ou líquidos.

2.3.2.4.2 Operação de secagem no leito fluidizado

A secagem de grãos através da técnica do leito fluidizado é corrente nos países asiáticos que empregam secadores contínuos ou de bateladas conforme citam os trabalhos de Taechapiroj (2002) e Soponronnarit (1999), Prasad et. al.(1994). No Brasil são comuns os secadores com leito fluidizado, sistema contínuo, na indústria de parboilização do arroz e na secagem de soja (Neitzel et al.,1985). Empregam ar quente e são aplicados na secagem primária quando os grãos estão com forte concentração de umidade, facilitando sua retirada (Amato et al., 2002). Soponronnalt (1999) relata o sucesso de secadores contínuos em leito fluidizados para arroz, com capacidades de 5 a 10 t/h desenvolvidos por indústria Tailandesa quando foram comercializadas 90 unidades a partir de protótipo experimental.

O ar aquecido ou vapor superaquecido injetado no leito provocam a fluidização e promovem simultaneamente as transferências de massa e calor necessárias à secagem. Taechapiroj et al.(2002) empregando vapor superaquecido a 150-170 °C para secagem de arroz de 45 % (bs) até 16-28% (bs) registraram que o rendimento de grãos inteiros é maior do que quando secados com ar quente.

São citadas vantagens no uso da secagem de grãos com fluidização: uma boa área entre o ar e os sólidos; o aumento e uniformidade dos coeficientes de troca de calor e massa devido ao incremento da condutância e uniformidade da temperatura (Moreira, 2001; Syuhral et al, 2003); excelente mistura dos sólidos e operação isotérmica (Lim et al., 2001). A transferência de calor é acelerada resultando numa evaporação eficiente e

com menor tempo de secagem. A uniformidade na transferência de massa e calor supera o inconveniente encontrado nos secadores convencionais que não garantem a uniformidade da umidade final quando considerados os grãos individualmente (Liu et al., 1997 e Lasseran, 1987).

Em suas investigações sobre o comportamento da fluidização de trigo, arroz e ervilhas, Dimattia et al. (1997), afirmam que não é necessário operar com grandes velocidades de fluidização, pois mesmo a baixas velocidades, desde que acima da velocidade mínima de fluidização (V_{mf}), o leito fluidizado mantém a alta eficiência devido ao curto tempo de secagem e ao baixo consumo energético. Em trabalho com trigo foi determinado que a razão de secagem independe da velocidade do ar e da altura do leito, sendo função direta da temperatura. Na prática, é comum operar um leito fluidizado com velocidades até três vezes a de mínima fluidização, permanecendo constante a queda de pressão em regimes de fluidização estáveis de boa qualidade (Almeida, 2002).

A abordagem das condições de secagem através de modelos matemáticos é corrente permitindo relacionar parâmetros como as propriedades físicas do ar e do vapor, a transferência de massa e energia entre os grãos e o ar de secagem, as taxas de transferência de calor e umidade para o grão.

Nos leitos fluidizados a transferência de calor pode ser assumida como a condução através da película de fluido envolvendo a partícula baseada na clássica equação de Newton

$$Q = h \cdot \Delta T. \text{ (equação 8)}$$

onde h é o coeficiente de troca térmica fluido-partícula

e ΔT é a variação de temperatura na partícula

O coeficiente de troca térmica em leitos fluidizados, salvo resultados experimentais, ainda é baseada em equações empíricas de investigações específicas e com muitas aproximações devido a complexidade dos fenômenos e nas dificuldades de determinação (Park et al, 2000) . Bhamidipati & Singh (1995) concluíram que o coeficiente de troca térmica entre partícula e fluido aumenta com o aumento da temperatura e da viscosidade do fluido.

A Figura 4 mostra o comportamento típico da secagem de arroz em casca com umidade de colheita (23% bu) em um ciclo de fluidização de dez minutos realizados por Ustra et al. (2003).

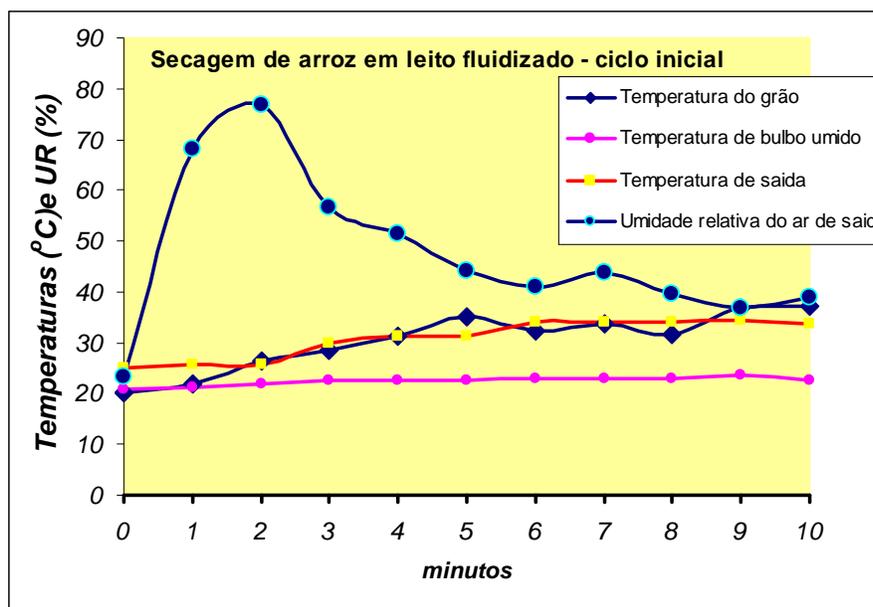


Figura 4 – Ciclo inicial na secagem do arroz em casca, em leito fluidizado com ar aquecido ($T = 41^{\circ}\text{C}$ e $UR = 23\%$).

2.3.2.4.3 Eficiência da secagem.

A eficiência térmica dos secadores representa o percentual de calor aportado que é utilizado para reduzir a umidade dos produtos, fundamentando-se na primeira lei da termodinâmica, que estabelece a relação entre a energia utilizada para evaporar a água do material úmido e a energia incorporada ao ar de secagem. A energia requerida é significativa devido ao calor latente da evaporação da água e da baixa eficiência dos secadores industriais (Syahrul et. al., 2002).

A eficiência térmica depende das temperaturas e velocidades do ar de secagem, da temperatura e umidade inicial dos grãos e do estado psicrométrico do ar de secagem. Os balanços de massa e energia calorífica fornecem a equação 8 (Anexo B).

A eficiência térmica é maior na fase inicial da secagem, quando a umidade inicial é elevada. Com a redução progressiva da umidade a eficiência decresce rapidamente e é menor no fim da operação de secagem em secadores com leito fluidizado (Syahrul et al., 2002).

Temperaturas elevadas do ar de secagem podem resultar em menor tempo de operação, o que nem sempre é recomendável em produtos agrícolas, pois os efeitos colaterais como os estresses de origem térmica alteram a sua qualidade final. O

incremento não traz aumentos de eficiência significativos, principalmente no período final da secagem, fase de velocidade decrescente.

Variações de temperatura em leitos fluidizados têm um efeito imediato na fluidodinâmica: maiores temperaturas elevam a porosidade mínima, aumentando o coeficiente de troca térmica (h_i), reduzem o diâmetro das bolhas formadas e a velocidade mínima decresce para partículas com diâmetros de $360 \mu m$ (Lim et al. 2001).

Como os secadores em leito fluidizado operam com maiores fluxos de ar do que os convencionais, há uma tendência à isoterma, os grãos assumindo a temperatura do ar de secagem. Nesta condição, a temperatura deve estar dentro das faixas reconhecidas pela tecnologia atual para que não alterem as condições fisiológicas e físicas do grão. Para o arroz, recomenda-se não ultrapassar o valor de $45^\circ C$. Para sementes são requeridos valores ainda mais baixos.

Secando milho em leito fluidizado, Syahrul et al. (2002) mostram que aumentos de velocidade melhoram a eficiência de secagem somente no estágio inicial, quando a umidade superficial é removida de forma mais rápida. Na parte final da secagem não há benefícios, o que foi confirmado no trabalho de Dimattia et al. (1996), na secagem de trigo. Hajidavallo (1998) reporta que a velocidade de secagem deve ser a menor possível, respeitando a velocidade mínima de fluidização para o grão em secagem.

A temperatura inicial dos grãos altera a eficiência da secagem. O primeiro estágio do processo é o aquecimento dos grãos e melhores aproveitamentos da energia ocorrem quando a temperatura é baixa.

2.4 O ARROZ EM CASCA COMO PARTICULA FLUIDIZAVEL.

2.4.1 Classes

O arroz em casca é o produto fisiologicamente desenvolvido, provido de casca, depois de colhido, trilhado, limpo e seco ao sol ou por processo tecnológico adequado (BRASIL,1988). Constitui o sub-grupo do arroz em casca e pode ser apresentado na forma natural, macerada ou parboilizada, dependendo do seu estágio de industrialização. Segundo o IRRI (International Rice Research Institute), não existe uma classificação

internacional para o arroz em casca. Este mesmo instituto emprega a escala apresentada na Tabela 6.

Tabela 6 - Classificação do arroz em casca (IRRI)

CLASSE	Comprimento (mm)	Comprimento/largura
Extra-longo	> 7.50	> 3.00
Longo	6.50 – 7.50	2.1 – 3.0
Médio	5.51 – 6.60	1.1 – 2.0
Curto	< 5.50	< 1.0

Fonte – IRRI (International Rice Research Institute - Phillipines)

A classificação brasileira estabelece cinco classes de arroz denominadas em função das dimensões finais do arroz após o polimento (BRASIL, 1988)

arroz longo fino – comprimento maior que 6,00 mm; máximo de 1,90mm na espessura e relação comprimento/largura superior a 2,75mm.

arroz longo – comprimento com 6,00mm ou mais.

arroz médio – comprimento entre 5,00 e 5,99 mm;

arroz curto – comprimento menor que 5,00 mm;

arroz misturado – produto que não se enquadra nas classes anteriores e constituído de duas ou mais classes.

2.4.2 Dimensões e forma

O grão de arroz tem a forma aproximada de um elipsóide alongado e suas dimensões características são o comprimento (l), a largura (b) e a espessura (d), das quais derivam dimensões importantes como a relação l/b , a esfericidade (ϕ), o diâmetro equivalente (d_g), a área superficial (a_g) e o volume do grão (v_g). São medidas que variam conforme o cultivar, a classe, a forma e o grau de umidade do grão. A literatura registra faixas de 5 a 10 mm para o comprimento, 2 a 3 mm para a largura e 1 a 3 mm para a espessura.

A relação l/b é um parâmetro importante na geometria de equipamentos como peneiras, separadores, distribuidores de leito fluidizado e outros. Esta relação também classifica o arroz beneficiado (BRASIL,1988).

O diâmetro equivalente (d_g) e a esfericidade ou fator de forma (ϕ), unidades derivadas das dimensões principais, variam com o genótipo e a umidade dos grãos e são

fundamentais no dimensionamento de leitos fluidizados. Quando não calculadas experimentalmente podem ser determinadas pelas expressões propostas por Mohsenin (1965) para partículas não esféricas como o arroz (Tabela 7).

Tabela 7 - Propriedades de partículas não esféricas

Unidade	Expressão
Diâmetro equivalente	$d_g = (l \cdot b \cdot d)^{1/3}$
Esfericidade ou fator de forma	$\phi = (l \cdot b \cdot d)^{1/3} \cdot l^{-1}$ ou $\phi = a_e \cdot a_g^{-1} = 6v_e \cdot d_g^{-1} \cdot a_g^{-1}$
Área superficial	$a_g = \pi \cdot d_g^2$
Volume do grão	$v_g = \pi \cdot d_g^3 / 6$

O diâmetro equivalente é uma relação entre as dimensões fundamentais e traduz o diâmetro de uma esfera com o mesmo volume do grão.

A esfericidade ou fator de forma estabelece o grau de aproximação da forma de um grão ou partícula à da esfera ($\phi_{max} = 1$). É definida como a razão entre a área da esfera que contém o mesmo volume do grão e a área do grão. Para arroz em casca são encontrados valores de esfericidade entre 0,34 e 0,37, dependendo da variedade.

A área superficial (a_g) e o volume individual do grão (v_g) são determinados por analogia com uma esfera de diâmetro igual ao diâmetro equivalente.

A área superficial do grão é o local de troca de calor e massa durante a secagem. Lasseran (1981) considera no dimensionamento de secadores a massa de grãos como um trocador de calor, onde a sua maior ou menor área específica (m^2/m^3) tem efeito direto na eficiência de secagem. A área específica é o produto da área de um grão pelo número de grãos por unidade de volume. Fontana (1986) determinou áreas específicas em 2437, 2361 e 2054 m^2/m^3 respectivamente para grãos de arroz em casca longos e médios. Em partículas não esféricas, como é o caso dos grãos de arroz com casca, a superfície específica ou área superficial pode ser determinada através da esfericidade.

Wratten et al. (1969), determinaram o volume individual de grãos de arroz em função do grau de umidade estabelecendo as relações para arroz em casca classes longo e media respectivamente

$$v_g = 14,40 + 0,229.(U) \text{ (equação 9)}$$

$$v_g = 9,73 + 0,508.(U) \text{ (equação 10)}$$

U é grau de umidade base úmida expresso em % e o volume resultante é dado em mm^3 .

2.4.3 Porosidade.

A porosidade estabelece quantitativamente os espaços vazios em uma massa de grãos, expressando o volume de vazios num volume de grãos através da relação adimensional entre o volume de vazios inter e intragranulares e o volume total da amostra. É expressa em percentagem ou fração decimal.

A porosidade depende do formato do grão, de suas dimensões, dos tegumentos, da integridade física e sanitária e da quantidade de impurezas e materiais estranhos (Elias et al., 2002). Varia com a compactação nas colunas de grãos em silos e diminui com o aumento da umidade. Wraten et al. (1969) apresentaram as seguintes equações para o arroz em casca grãos longos e médios respectivamente.

$$\varepsilon = 65,55 - 0,475.U \text{ (equação 11)}$$

$$\varepsilon = 69,05 - 0,885.U \text{ (equação 12)}$$

onde ε é a porosidade (%) e

U o grau de umidade (%bu).

A porosidade influencia diretamente o peso específico aparente, o ângulo de atrito, a permeabilidade a fluidos (Fontana, 1986) e a pressão estática (Elias et al., 2002).

Um parâmetro importante derivado da porosidade é o comportamento fluidodinâmico dos grãos nos secadores e equipamentos convencionais ou fluidizados onde a resistência à passagem de ar ou gases entre os grãos, durante a aeração ou secagem é proporcional ao espaço intergranular. A partir do conhecimento desta característica é possível determinar a pressão dos ventiladores.

A porosidade pode ser calculada a partir das densidades real e aparente pela relação de Mohsenin (1965)

$$\varepsilon = [1 - (\rho_{real} \cdot \rho_{aparente}^{-1})].100 \text{ (equação 13)}$$

Os valores típicos de porosidade para arroz em casca encontrados na literatura especializada estão na faixa de 0,40 a 0,55 dependendo da compactação do leito.

Um valor necessário nos leitos fluidizados é a porosidade na condição de fluidização mínima. Quando não determinada experimentalmente a ε_{fm} pode ser estimada pela expressão proposta por Wen & Yu (1966)

$$\varepsilon_{fm} = (0,071 \cdot \phi^{-1})^{1/3} \text{ (equação 14)}$$

onde ϕ é a esfericidade.

Com as dimensões determinadas por Ustra et al, (2003) para arroz em casca a porosidade na fluidização mínima atinge valores entre 0,57 e 0,59 para esfericidades variando entre 0,34 e 0,38.

2.4.4 Peso específico aparente ou peso volumétrico (γ_v)

É definido como a densidade efetiva de uma massa de partículas ou sólidos levando em conta os volumes ocupados pelos grãos e o ar dentro e entre os grãos . Considera o peso de uma quantidade de grãos contidos em um determinado volume (bulk density) e é importante na fase de projetos de equipamentos e instalações das diversas operações unitárias que envolvem os grãos, desde a colheita até o beneficiamento.

No arroz em casca o peso volumétrico varia conforme o grau de compactação, cultivar, percentual de impurezas, a umidade e a porosidade estando as duas últimas relacionadas pelas expressões

$$\gamma_v = (1 - \varepsilon) \cdot \gamma_g \text{ (equação 15)}$$

$$\gamma_v = \varepsilon \gamma_{ar} + (1 - \varepsilon) \gamma_g \text{ (equação 16)}$$

onde γ_{ar} e γ_g são as densidades do ar e do grão úmido respectivamente

2.4.5 Densidade do grão

A densidade real do grão considera a massa dos sólidos e do ar no seu interior. Duas relações de interesse são derivadas da densidade. O peso de uma amostra com 1000 grãos (P_{1000}) e o número de grãos em amostra de 100 gramas (n_{100}). O IRGA publica valores de 26,5 e 26,4 g para 1000 grãos do IRGA -418 e 419 respectivamente.

Ustra et al, (2003) trabalhando com os cultivares El Paso144 e IRGA 418 determinaram valores 28,10 e 26,80 respectivamente. O número de grãos por amostra de 100 gramas, que facilita determinar o numero de grãos em um determinado volume, fica entre 3618 e 3565 para os mesmos cultivares.

2.4.6 Calor específico

O calor específico (C_p) é a quantidade de calor aportada durante o aquecimento ou removida no resfriamento de uma massa unitária de um produto para um diferencial de temperatura de 1°C. Segundo Haswell (1954), Wratten et al. (1969) e Morita & Singh (1977), citados por Fontana (1986) para o arroz em casca este valor pode ser calculado em função do grau de umidade, base úmida, já que independe da temperatura na faixa de 20 a 70°C. Pode ser expresso em $\text{kJ} \cdot (\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$ pela relação

$$C_p = 1,10953 + 0,0448 \cdot U \quad (\text{equação 17})$$

onde U é o percentual de umidade, base úmida..

2.4.7 Velocidade terminal (v_t)

Uma partícula rígida em queda livre no ar, sob a influência do peso próprio, assume uma velocidade constante quando o efeito gravitacional é equilibrado pela resistência friccional do meio. Esta é a velocidade terminal, valor máximo que um corpo assume em queda livre sob condições particulares (Perry & Chilton, 1986). Uma massa de ar com velocidade igual e em sentido contrário provocará um empuxo dinâmico que equilibrará as forças suspendendo a partícula no espaço (Hawk et al,1966). Valores menores que V_t reduzirão a velocidade de queda da partícula enquanto velocidades maiores transportarão a partícula de baixo para cima. Este é um fenômeno físico de interesse da engenharia que trata dos transportes pneumáticos

A expressão $F_D = C_D \cdot (\pi/8) \cdot \rho_a \cdot d_g^2 \cdot V^2$ permite calcular a força de sustentação da partícula, válida para todos os movimentos subsônicos, laminares ou turbulentos. A força é proporcional a área projetada de uma partícula esférica e C_D é o coeficiente de

sustentação (também denominado de arraste ou de resistência) e depende do número de Reynolds. V é a velocidade relativa entre o ar e o sólido.

Analiticamente, a velocidade terminal é expressa pela equação $V_t = [2 \cdot g \cdot m_g \cdot (\rho_g - \rho_a) / (\rho_g \cdot \rho_a \cdot A_p \cdot C_d)]^{1/2}$ onde A_p é a área projetada do grão (Canton, 1984).

A dificuldade de aplicar estas equações em produtos agrícolas de formas não esféricas pode ser contornada substituindo o grão por uma esfera com diâmetro igual ao diâmetro equivalente (Mohsenin, 1965).

Benedetti (1987) determinou a variação da velocidade terminal com o grau de umidade do arroz em casca e outros produtos agrícolas.

2.4.8 Velocidade mínima de fluidização (V_{mf})

A velocidade mínima de fluidização (ponto B na Figura 3) depende do grau de umidade das partículas. Maiores umidades requerem maiores velocidades mínimas de fluidização (Syuhral et al, 2003). Soponronnarlt (1999) registrou velocidades de 3,2 m/s para arroz parboilizado com 45% de umidade inicial, temperaturas de 100 a 120°C e alturas de leito de 100 mm. Trabalhando com arroz em casca, cultivares El Paso 144 e IRGA 418, com umidade de colheita (21 a 23%bu), Ustra et al. (2003) registraram valores de velocidades mínimas de fluidização entre 1,0 e 1,52 m.s⁻¹ (1,24 ±22%) para leitos com 200 mm de altura e temperatura de 45 °C. Lim (2001) empregando arroz em casca determinou valores entre 1,0 e 1,5 m.s⁻¹ para alturas de leito de 100, 150 e 200 mm a 100 °C e a temperatura ambiente. Prasad (1994) determinou velocidades de 1,27 m.s⁻¹ para arroz em casca.

2.4.9 Permeabilidade do arroz em casca

A resistência à passagem do ar em camadas de arroz, como ocorre em equipamentos de secagem e aeração, é função de sua permeabilidade, parâmetro dependente do grau de compactação, da presença de finos e materiais estranhos, das dimensões, da umidade e das velocidades com que o ar passa entre os grãos. Para vazões até 0,5 m/s, medidos na superfície da camada, a perda de carga obedece a lei de Darci, o que resultou na correlação proposta por Shedd. Nestes escoamentos lentos,

Carman (1937) deduziu uma expressão que é função da porosidade, dimensões e esfericidade dos grãos.

Para maiores velocidades e para partículas não esféricas, a perda de carga obedece a correlação de Ergun (equação 3), que é composta de duas perdas, as devidas a energia cinética e aquelas devidas a viscosidade.

2.4.10 O arroz como partícula fluidizável

Observando a natureza da fluidização de sólidos particulados Geldart (1973) verificou comportamentos bem definidos e estabeleceu quatro categorias de partículas (A,B,C e D) em função de seus diâmetros e da diferença entre as densidades do sólido e do fluido (Figura 5). Os sólidos da categoria A são soltos e facilmente aerados. O arroz em casca categoriza-se com partícula classe D com $d_g > 3500 \mu\text{m}$ com $\rho^* = \rho_g - \rho_a > 0,3 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot (\text{m}^3)^{-1}$.

Como partícula fluidizável, o arroz em casca preenche as características identificadas por Geldart: são partículas grandes e densas, formam bolhas com rápido crescimento e jorros na superfície do leito.

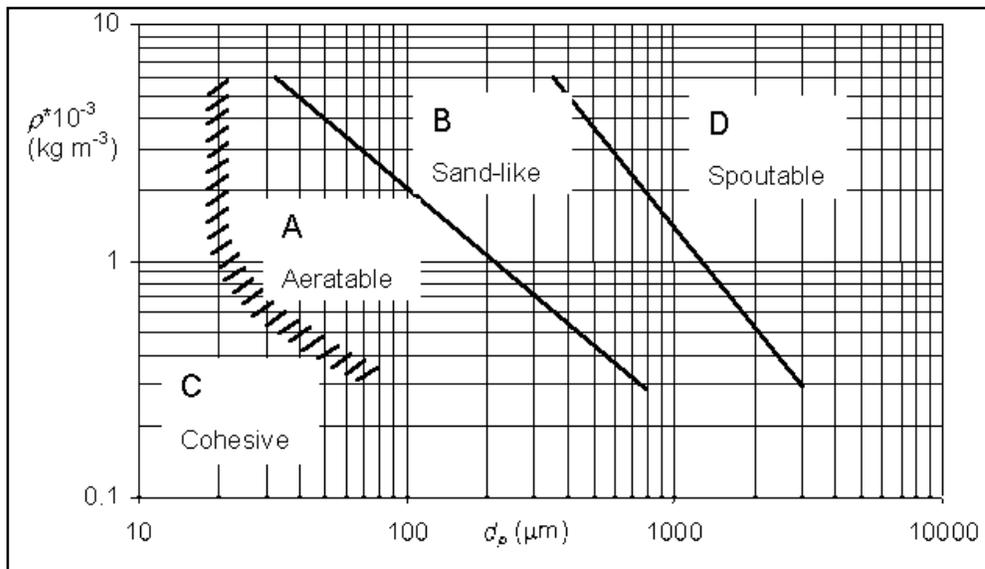


Figura 5. Classificação de Geldart para fluidização de partículas

Em leitos fluidizados com arroz em casca observam-se flutuações na pressão e um perfil oscilante na sua superfície, devido a alta frequência na formação de bolhas, principalmente junto às paredes, fato registrado por Dimattia et. al. (1997) em trabalho com partículas classe D que concluíram que o formato das partículas tem influência significativa no seu comportamento.

2.4.11 Temperatura vítrea

Para cada produto e umidade existe uma temperatura, denominada de transição vítrea (T_v) abaixo da qual o material tem características vítreas e acima o produto torna-se elástico (Groff, 2003). Esta característica é observada nos produtos ricos em amido. Abaixo da temperatura T_v , da condição vítrea, o amido do arroz tem o coeficiente de expansão, o volume específico e a difusividade menores do que na fase elástica. A passagem de um estado para outro, ou a existência simultânea das duas fases no mesmo grão (centro e superfície) seriam potenciais causadores de fissuras, dadas as pressões causadas pelas diferenças nas propriedades físicas mencionadas. Assim, durante a secagem é importante não ultrapassar a T_v para cada condição de umidade. Na dinâmica da secagem, como a umidade dos grãos decresce progressivamente, as temperaturas de operação deveriam acompanhar este gradiente na forma mais homogênea possível.

Os secadores intermitentes são os mais seguros para o arroz, produzindo os melhores rendimentos, por estarem os grãos sempre abaixo da linha de transição. Nos secadores contínuos a condição é mais crítica. As temperaturas levam o grão ao estado elástico e o resfriamento deve ser suficientemente lento para que a transição ao estado vítreo seja homogênea em todo o grão (Groff, 2003) .

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. MATERIAL EXPERIMENTAL

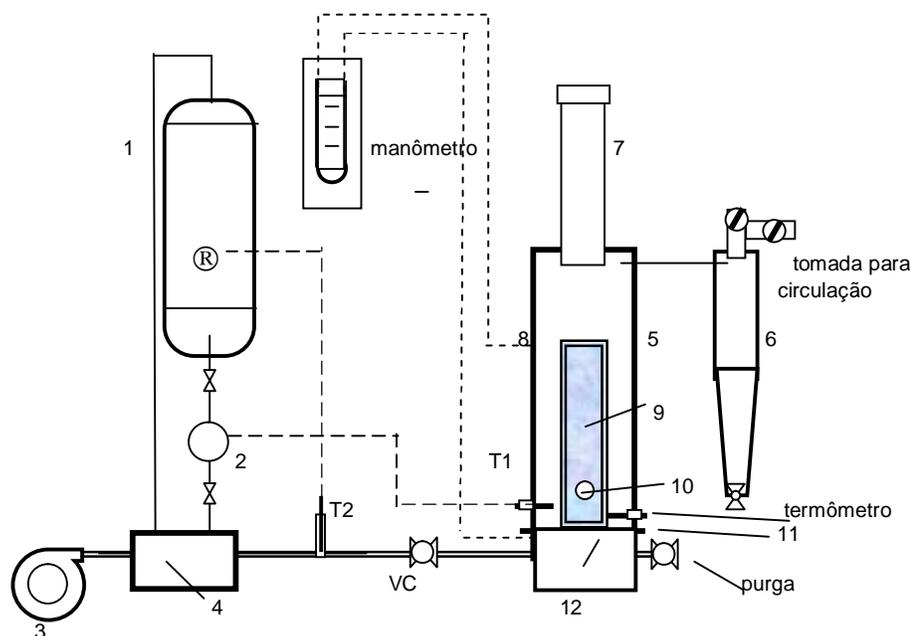
Na condução do experimento foram utilizados grãos de arroz em casca cultivar IRGA 418, safra 2003/2004, produzidos na região Sul do Rio Grande do Sul e cedidas para secagem e beneficiamento pela Cooperativa Arrozeira Extremo Sul, localizada em Pelotas, RS.

Foram coletados oitenta quilogramas de arroz em casca com umidade de colheita, após a operação de pré-limpeza realizada na própria indústria, em máquinas de ar e peneiras planas de fluxos paralelos.

O arroz foi transportado para o Laboratório de Pós Colheita e Industrialização de Grãos do Departamento de Ciência e Tecnologia Agroindustrial da Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel da Universidade Federal de Pelotas.

Na secagem foi empregado o secador experimental do Laboratório de Grãos (Figura 6), que permite operações com leito fixo e fluidizado e tem as seguintes características:

- Diâmetro da seção transversal: 250 mm;
- Altura da câmara de secagem: 800 mm.
- Capacidade máxima: 0.040m³ (aproximadamente 25 kg de arroz com casca.).
- Injeção de ar por ventilador centrífugo com vazão variável até 500 m³.h⁻¹.
- Distribuidor de 250mm de diâmetro, multifuro com furos de 2mm, passo 3.0mm e área de passagem de 0.0834 m² com perda de carga de 10mmH₂O.
- Aquecimento indireto por água quente através de trocador de calor ar/água com superfície de troca de 2,35 m² e duas resistências elétricas no total de 5 kW.
- Controle de temperatura através de termostatos de bulbo marca Thermowatt com faixa de controle de 30 a 60°C instalados no fluxo de ar de secagem e na massa de grãos.
- Controle de vazão e pressão através de válvulas borboleta instaladas no tubo de entrada de ar quente e na saída do ciclone e purga para aquecimento da caixa de ar.



- | | |
|-------------------------------|---------------------------|
| 1. Caldeira elétrica. | 7. Chaminé do secador |
| 2. Bomba de circulação | 8. Câmara de secagem |
| 3. Ventilador | 9. Visor |
| 4. Trocador de calor água/ar. | 10. Abertura para amostra |
| 5. Secador | 11. Distribuidor |
| 6. Ciclone | 12. Caixa de ar |

3.2. MÉTODOS

Operacionalmente o experimento foi conduzido nas etapas indicadas no esquema da Tabela 8.

Tabela 8 - Etapas realizadas no experimento

Etapa 1	Etapa 2	Etapa 3	Etapa 4
Recepção e Condicionamento	Caracterização Tecnológica	1. Secagem Estacionária (leito fixo) 2. Secagem fluidizada <ul style="list-style-type: none">• Fluidização incipiente 1:3• Fluidização plena 1:3• Fluidização plena 1:5	Armazenagem

3.2.1. Recepção e Condicionamento prévio

No Laboratório de Grãos, o arroz foi separado e embalado em sacos de polietileno em lotes de aproximadamente 5,5 quilogramas. Como as análises necessárias foram demoradas e deviam ser feitas antes das secagens, as amostras, após a pesagem e a identificação foram armazenadas em câmara fria, a 5°C, por se tratar de produto perecível cujo metabolismo na umidade de colheita não permite espera superior a 48 horas (Elias et al.,1998). As condições de armazenamento antes da secagem foram determinadas por testes preliminares.

3.2.2. Caracterização tecnológica do arroz em casca

Foram determinadas e/ou calculadas as dimensões, porosidade, velocidade terminal, diâmetro equivalente, área superficial, volume unitário de grão e pesos

específicos dos grãos de arroz em três níveis de umidade, base úmida, 13,5%, 17,5% e 23%. As umidades foram ajustadas em secagem estacionária no secador experimental, efetuando-se as medidas através do determinador de umidade DOLE, com controles e calibrações pelo método da estufa a $105\pm 3^{\circ}\text{C}$ (Brasil, 1992).

3.2.2.1. Dimensões e unidades derivadas

Para determinação das dimensões características dos grãos foram retiradas aleatoriamente dos volumes com as umidades já definidas, dez (10) amostras contendo 100 grãos cada uma. De cada amostra foram separados 20 grãos e com o emprego de paquímetro com precisão de 0,01 mm foram medidos o comprimento (l), a largura (b) e a espessura (d) de cada grão. Os valores médios foram tabulados e a relação l/b foi calculada.

O diâmetro equivalente (d_g) e a esfericidade (ϕ) para cada grau de umidade foram calculados através das expressões propostas por Mohsenin (1965), a partir das dimensões médias já determinadas.

Conhecido o diâmetro equivalente para cada umidade, foram calculados analiticamente a área superficial (a_g) e o volume unitário de cada grão (v_g).

3.2.2.2. Propriedades gravimétricas.

A densidade ou peso específico real (ρ_g) dos grãos foi determinada empregando-se o princípio de Arquimedes. Trinta (30) gramas de grãos na umidade selecionada foram imersos em 110 ml de óleo vegetal previamente vertidos em uma proveta graduada. Na escala da proveta foi medido o volume de óleo deslocado, correspondente aos espaços vazios da massa de grãos. O peso específico real foi determinado pela relação peso/volume. Foram realizadas cinco repetições para cada nível de umidade e determinadas as médias. As pesagens foram realizadas em balança eletrônica digital POLIMATE PL2000 com precisão de 0,01 gramas.

O peso volumétrico ou peso específico aparente (γ_g) foi determinado preenchendo com arroz um recipiente com volume calibrado de 500mL. Os grãos foram escoados de forma constante para dentro do recipiente, completando-o através de funil situado 76.5

mm (3") acima da borda superior do recipiente. A superfície superior dos grãos no recipiente foi nivelada com uma espátula. A massa de grãos foi então pesada e o peso volumétrico ou peso específico aparente determinado pela relação peso/volume. Foram realizadas três repetições para cada nível de umidade.

A massa de 1000 grãos (γ_{1000}) foi determinada na balança eletrônica digital POLIMATE PL2000 com precisão de 0,01 gramas empregando-se a seguinte metodologia: do arroz armazenado nas umidades correspondentes, foram extraídos aleatoriamente 40 amostras com 25 grãos cada uma, que foram pesados individualmente.

Após as amostras foram misturados par a par perfazendo 20 amostras com 50 grãos, 10 com 100 grãos e 5 com 200 grãos que também foram pesados individualmente. Novamente as amostras foram misturadas resultando em 2 de 500 grãos, cujos pesos foram determinados. Os valores médios de cada conjunto foram obtidos e destes resultados obteve-se a média geral em gramas por 1000 grãos.

3.2.2.5. Porosidade

A porosidade dos grãos (ϵ) em % foi determinada com os valores de pesos específicos reais e aparentes aplicados na relação proposta por Mohsenin (1965), equação 13, para cada grau de umidade.

3.2.2.4. Velocidade terminal

A velocidade terminal dos grãos a diferentes umidades foi determinada empregando-se uma adaptação do método descrito por Gukpa (1997) que emprega uma coluna cilíndrica transparente com 60mm de diâmetro e comprimento de 600mm, na qual é injetado pela base um fluxo controlável de ar. Na base da coluna foi instalada uma tela plástica com malha 1mm com a finalidade de uniformizar o fluxo e impedir a queda dos grãos para dentro da canalização de ar.

Cinco gramas de arroz para cada umidade investigada foram colocados na coluna, regulando-se o fluxo de ar até que os mesmos ficassem suspensos. O controle foi visual. A velocidade neste instante foi determinada com o uso de anemômetro de hélice MINIPA modelo MPA-10, com precisão de $0,1\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ previamente instalado no topo da coluna. Foram efetuadas dez repetições para cada umidade. Os valores obtidos experimentalmente foram comparados com as velocidades terminais calculados através do “**Calculator Process Designer**” empregando-se os valores de peso específico real e diâmetro equivalente dos grãos previamente determinados.

3.2.2.5. Calor específico

O calor específico dos grãos, a cada grau de umidade, foi determinado através da expressão $C_p = 1,10953 + 0,0448.U$, onde U é a umidade base úmida em percentagem. Os resultados foram expressos em $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$

3.2.3. Estabilização das amostras

Para evitar o stress provocado pelo processo, as amostras de arroz destinadas a cada tratamento e suas repetições tiveram suas temperaturas estabilizadas até a temperatura ambiente antes e depois da secagem.

O arroz quando retirado da câmara fria a 5°C passou por um período de repouso até sua temperatura equalizar com a ambiente. Para isto as embalagens foram abertas, os grãos colocados em bandejas e expostos à temperatura ambiente.

Após as secagens, o arroz permaneceu dentro do secador, em repouso, por um período mínimo de duas horas, para estabilizar a temperatura e a umidade dos grãos. A retirada de grãos secos foi feita quando a sua temperatura atingia 5°C acima da ambiente.

As temperaturas foram controladas através de termômetro de mercúrio imerso na massa de grãos dentro do secador ou das embalagens retiradas da câmara ou das bandejas .

3.2.4 Secagem

O arroz em casca, pré-limpo foi submetido à secagem em quatro tratamentos com três repetições cada um:

- **SE** – Secagem estacionária em leito fixo, com ar forçado aquecido a $40,5\pm 3$ °C, de forma contínua até atingir a umidade de 14% base úmida.
- **SI** – Secagem com fluidização incipiente, com ar forçado a $41,5\pm 3$ °C, em regime de intermitência 1:3, composto de quatro ciclos de secagem. Cada ciclo foi constituído de 7 minutos de fluidização incipiente e 21 minutos de temperagem. O tempo total de secagem considerado foi de 112 minutos.
- **SF3** - Secagem fluidizada, com ar forçado a $42,5\pm 3$ °C, em regime de intermitência 1:3, composto de quatro ciclos de secagem. Cada ciclo foi constituído de 7 minutos de fluidização plena e 21 minutos de temperagem. O tempo total de secagem considerado foi de 112 minutos.
- **SF5** - Secagem fluidizada, com ar forçado a 42 ± 3 °C, em regimes de intermitência 1:5, composto de quatro ciclos de secagem. Cada ciclo foi constituído de 7 minutos de fluidização incipiente e 35 minutos de temperagem. O tempo total de secagem considerado foi de 168 minutos.

Todos os tratamentos com fluidização necessitaram uma secagem complementar para atingir umidade de armazenamento.

3.2.4.1. Secagem estacionária (SE)

Uma massa de 8,5 kg de grãos foi dividida em três lotes (A1, A2 e A3) de 2,83 quilogramas, acondicionados em sacos de filó.

A secagem foi realizada no secador experimental que foi previamente preparado. A água da caldeira foi aquecida até 70°C. A bomba de circulação de água e o ventilador foram ligados para aquecimento do ar que foi injetado na câmara de secagem vazia, pré-aquecendo-a até a condição operacional (temperatura de $40,5\pm 2$ °C e umidade relativa do ar de 32 ± 3 %). Atingida esta condição, o ventilador foi desligado, a válvula de controle fechada e os grãos já pesados e com a temperatura estabilizada foram carregados na câmara de secagem pré-aquecida. A colocação foi feita de modo que os sacos

ocupassem toda a seção da câmara, uniformizando a distribuição do ar quente. O ventilador foi ligado e a válvula de controle ajustada para produzir uma velocidade de $0,77 \pm 0,2 \text{ m.s}^{-1}$. Periodicamente, a ordem dos lotes era trocada de modo a homogeneizar a secagem.

A temperatura do ar foi mantida em $40,5 \pm 2^\circ\text{C}$ durante toda a secagem. As seguintes variáveis foram registradas e/ou determinadas após 7, 28, 35, 42, 49, 56, 63, 84, 91, 112, 126, 133, 168, 210, 240 e 270 minutos:

- a) temperaturas e umidade relativa do ar ambiente.
- b) temperaturas e umidade relativas do ar de secagem e do ar de saída medidas no topo da câmara de secagem.
- c) temperatura dos grãos em cada lote.
- d) umidade dos grãos em cada lote.
- e) velocidade média do ar de saída, medida na chaminé da câmara de secagem.

3.2.4.2. Secagem com fluidização incipiente (SI)

Foram retirados da câmara fria três lotes com 5,5 quilogramas de arroz aproximadamente. Cada lote representou uma repetição do tratamento SI de secagem com fluidização incipiente (A4, A5 e A6).

A secagem foi realizada no secador experimental, previamente preparado. A condição psicrométrica do ar ambiente foi registrada. A água da caldeira foi aquecida até 70°C . A bomba de circulação de água e o ventilador foram ligados para aquecimento do ar. Este foi injetado na câmara de secagem vazia, aquecendo-a até a condição operacional. A condição do ar de entrada no período de secagem foi com a temperatura de $41,5 \pm 2^\circ\text{C}$ e umidade relativa entre 28 e 32%. Atingida esta condição, o ventilador foi desligado, a válvula de controle fechada e os grãos já pesados e com a temperatura estabilizada foram carregados na câmara de secagem do secador. A altura do leito foi registrada com escalímetro graduado em milímetros e o termostato imerso na massa de grãos foi regulado para operar numa temperatura máxima de 44°C .

O período de secagem iniciou quando o leito de arroz sobre o distribuidor expandiu sem fluidizar. Este momento foi identificado observando-se a superfície do leito

pelo visor e a perda de carga registrada no manômetro U ao mesmo tempo em que era injetado ar quente de forma gradativa pela regulagem da válvula de controle.

Foram aplicados quatro ciclos de fluidização incipiente, cada ciclo constituído de sete minutos de fluidização seguido de período de temperagem de 21 minutos, numa relação de intermitência de 1:3. O ciclo de 28 minutos (fluidização mais temperagem) se repetiu quatro vezes, perfazendo o tempo total de fluidização (TTF) de 28 minutos e um tempo total de secagem (TTS) de 112 minutos.

A cada minuto durante a fluidização foram anotados: a velocidade de saída na chaminé, a condição psicrométrica do ar de saída, a temperatura dos grãos, a altura do leito e a perda de carga no manômetro U.

Quando os grãos atingiam a temperatura de 44°C, o termostato imerso em sua massa desligava a bomba de circulação de água quente. O ar quente baixava a temperatura até os grãos atingirem a marca mínima de 39,5°C quando era religada a bomba.

No início e no fim do período de temperagem a temperatura da massa de grãos foi medida com o termômetro de mercúrio instalado na câmara de secagem.

No início e no fim de cada ciclo de fluidização e no fim da secagem foram recolhidas amostras com aproximadamente 50 gramas de arroz para a determinação de umidade. As amostras foram retiradas através de tomada instalada no corpo da câmara de secagem e acondicionadas em frascos pré-aquecidos, lacrados e armazenadas até a determinação.

A velocidade mínima de fluidização para cada repetição foi medida no próprio secador acima do leito com o anemômetro de hélice. Pela observação visual do leito e da leitura da sua perda de carga (Δp) no manômetro, foi determinada a velocidade superficial mínima. O momento em que a perda de carga crescente e proporcional a velocidade reduzia bruscamente (trecho OA da curva na Figura 3) caracterizava a velocidade mínima de fluidização (V_{mf}).

3.2.4.3 Secagem fluidizada (SFE e SF5)

Foram retirados da câmara fria seis lotes com 5,5 quilogramas de arroz aproximadamente. Cada lote representou uma repetição do tratamento de secagem

fluidizada com relações de intermitência 1:3 e 1:5: SF3 (A7, A8, A9) e SF5 (A10, A11 e A12), respectivamente.

A secagem foi realizada no secador experimental que foi previamente preparado, sendo a condição psicrométrica do ar ambiente registrada. A água da caldeira foi aquecida até 70°C. A bomba de circulação de água e o ventilador foram ligados para aquecimento do ar que foi injetado na câmara de secagem vazia, aquecendo-a até a condição de secagem (temperatura de 43±2°C e umidade relativa entre 26 e 30%). Atingida esta condição, o ventilador foi desligado, a válvula de controle fechada e os grãos já pesados e com a temperatura estabilizada foram carregados na câmara de secagem do secador. A altura do leito foi registrada com escalímetro graduado em milímetros e o termostato imerso na massa de grãos foi regulado para operar a 45°C.

Com o ventilador ligado e abrindo gradativamente a válvula de controle, foi observada, pelo visor, a superfície do leito até a sua fluidização. Este momento caracterizava o início de cada ciclo de fluidização plena com sete minutos de duração. A cada minuto eram anotados: a velocidade de saída na chaminé, a condição psicrométrica do ar de saída, a temperatura dos grãos, a altura do leito e a perda de carga no manômetro U.

Quando os grãos atingiam a temperatura de 45°C, o termostato imerso na massa de grãos desligava a bomba de circulação de água quente. O ar baixava a temperatura até os grãos atingirem o valor mínimo de 39°C, quando era religada a bomba.

No início e no fim do período de temperagem, a temperatura da massa de grãos foi medida com o termômetro de mercúrio instalado na câmara de secagem.

Foram aplicados quatro ciclos de fluidização plena em cada repetição, cada ciclo constituído de sete minutos de fluidização seguido de período de temperagem de 21 minutos, numa relação de intermitência de 1:3 e 35 minutos na relação de intermitência 1:5. Os tempos totais de fluidização (TTF) foram de 28 minutos (fluidização) nos dois tratamentos. Os tempos totais de secagem (TTS) foram 112 minutos e 168 minutos, respectivamente para SF3 e SF5.

No início e no fim de cada ciclo de fluidização e no fim da secagem foram recolhidas amostras com aproximadamente 50 gramas de arroz para a determinação de umidade. As amostras retiradas através de tomada instalada no corpo da câmara de secagem foram acondicionadas em frascos pré-aquecidos, lacrados e armazenadas até a determinação.

3.2.5. Determinação de umidade.

O grau de umidade das amostras durante o experimento foi determinado pelo método da estufa à temperatura de $105\pm 3^{\circ}\text{C}$, com circulação natural de ar, por 24 horas (Brasil,1992).

Devido a necessidade de determinar a umidade de forma expedita em um número elevado de amostras durante as secagens, períodos pós-secagem e armazenagem, foi empregado também o determinador dielétrico DOLE 500, sendo estabelecidos controles e calibrações através de curva (APENDICE A) para correção dos valores determinados para aquele do método.

3.2.6. Variáveis fluidodinâmicas psicrométricas

3.2.6.1. Velocidades

A velocidade do ar de secagem foi medida na chaminé da câmara com anemômetro digital de hélice marca MINIPA modelo MDA-10, com precisão de $0,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. As velocidades de fluidização ou de secagem no regime estacionário foram calculadas indiretamente pela relação entre as áreas da chaminé do secador e da seção do secador. A velocidade de injeção do ar no leito foi calculada pela área de passagem do distribuidor.

Foram determinados para cada tratamento os valores médios em cada ciclo de fluidização e nos períodos de secagem nos tratamentos SI, SF3 e SF5.

As velocidades mínimas registradas no tratamento SI foram comparadas com as calculadas pelas correlações de Wen, MacCabe e Tannous (equações 6,7 e 8).

3.2.6.2. Alturas e expansão do leito

A altura do leito foi medida verticalmente com escalímetro graduado (1mm), antes (H_0) e depois (H_7) do ciclo de fluidização (leito estático) e a cada dois (2) minutos durante o ciclo de fluidização (H_{1-7}). A expansão do leito durante a fluidização foi calculada tendo como referência a sua altura inicial na condição estática a partir do nível do distribuidor.

3.2.6.3. Perda de carga no leito.

A perda de carga no leito, em milímetros de coluna de água, foi lida no manômetro U no início, no final e durante o ciclo de fluidização a cada dois minutos.

Com as alturas do leito determinadas, foram comparados os valores de perda de carga obtidos pela da equação 2 com os medidos durante o experimento.

3.2.6.4. Fluxo de ar

A partir dos valores registrados da velocidade e do peso específico do ar de secagem foram determinadas analiticamente as vazões mássicas de ar em kg.h^{-1} de ar seco (m_{as}) para o tempo total de secagem (TTS) e para cada ciclo de fluidização. O fluxo de ar em quilogramas de ar seco por quilograma de massa seca do grão ($m_{as}/m_g.\text{min}$) também foi determinado para o período de secagem (TTS)

3.2.6.5. Variáveis psicrométricas do ar.

As temperaturas e umidades relativas do ar ambiente, de entrada e de saída foram determinadas com termo higrômetro digital RS 212-14 CE e com psicrômetro de bulbo seco e bulbo úmido. As condições do ar de saída do secador, saturado com a umidade dos grãos, como consequência dos fenômenos de transferência de calor e massa, foram registradas a cada minuto durante os ciclos de fluidização. Os parâmetros psicrométricos não determinados diretamente foram calculados pelo software "***Monachos Mechanical Engineering Calculator***".

3.2.7. Condição de fluidização do arroz em casca

Os valores das alturas de leito, porosidade e perda de carga verificados nos tratamentos SI, SF3 e SF5 foram comparados com os resultados analíticos obtidos pelas equações 2, 3,4 e 5

Na equação de Ergun foram utilizados os valores obtidos na secagem SI. Na fluidização plena, com relações de intermitência 1:3 e 1:5, os resultados foram comparados com a equação de equilíbrio em fluidização (equação 2). Os números de Reynolds e Archimedes foram calculados e tabulados em função da umidade. As densidades reais foram interpoladas e extrapoladas a partir dos já valores determinados, considerando-se uma variação linear entre as umidades de 23%bu e 17,5%bu

3.2.8 Eficiência térmica da secagem

A eficiência térmica da secagem nos quatro tratamentos fundamentou-se na primeira lei da termodinâmica, expressa pela razão entre a energia utilizada para evaporar a água do material úmido e a energia incorporada ao ar de secagem.

Conhecidas as condições psicrométricas do ar ambiente, do ar de secagem e do ar de saída, associadas à massa de ar seco adicionada ao processo e a variação do grau de umidade, foram calculadas as eficiências térmicas no período total de secagem (TTS) e em cada ciclo de fluidização nos tratamentos SI, SF3 e SF4. Para efeito de comparação, a eficiência térmica da secagem estacionária foi calculada nos mesmos períodos correspondentes a secagem fluidizada.

3.3. Modelo estatístico

As análises relativas aos experimentos foram feitas com base na análise temporal com regressão polinomial, com gráficos de dispersão, onde o R^2 da curva de tendência corresponde ao percentual de fidelidade de aproximação da curva. Foi empregado o software Microsoft Excel 7.0 operando no ambiente Windows Professional XP.

Os resultados das análises laboratoriais foram submetidos à análise da variância em parcelas subdivididas em um delineamento experimental inteiramente casualizado cuja comparação de médias foi feita através do teste de Tukey a 5% de significância.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 CARACTERIZAÇÃO DO ARROZ COMO PARTÍCULA FLUIDIZÁVEL.

Na Tabela 9 são apresentados os valores médios das dimensões básicas e derivadas determinadas nos grãos de arroz em casca para três valores de umidade.

Tabela 9 - Dimensões básicas e derivadas do arroz em casca IRGA 418

Propriedade	Símbolo	Unidade	Umidade (% bu)		
			23,00	17,50	13,50
Dimensões:					
Comprimento	l	mm	9,72a	9,81a	9,83a
Largura	b	mm	2,42a	2,38a	2,43a
Espessura	d	mm	1,96a	1,97a	1,91a
Relação dimensional	l/b	adm.	4,02a	4,12a	4,06a
Diâmetro equivalente	d_g	mm	3,55a	3,58a	3,56a
Esfericidade	ϕ	adm.	0,37a	0,37a	0,36a
Área superficial	a_g	mm ²	39,73a	40,3a	39,8a
Volume do grão	v_g	mm ³	23,62a	24,26a	23,71a

Obs. Letras minúsculas diferentes, na linha, para cada parâmetro, representam valores que diferem entre si a 5% de significância pelo teste de Tukey .

Na Tabela 10 aparecem os valores médios de propriedades gravimétricas e da porosidade dos grãos. As propriedades gravimétricas foram determinadas pelos métodos descritos no item 3 (materiais e métodos). Conhecidos os valores das densidades real e aparente, para as umidades consideradas, foi calculada a porosidade.

Tabela 10 Propriedades gravimétricas e porosidade do arroz em casca IRGA 418

Umidade (% bu)	Densidade aparente γ_g (kg/m ³)	Densidade real ρ_g (kg/m ³)	Porosidade ε (%)	Peso de 1000 grãos P_{1000} (g)
13,50	529,70b	1159b	54,20a	26,26b
17,50	533,80b	1125b	52,55a	25,61b
23,00	557,10a	1217a	54,22a	30,00a

Obs. Letras minúsculas diferentes, na coluna, para cada parâmetro, representam valores que diferem entre si a 5% de significância pelo teste de Tukey .

Observando-se os dados apresentados nas Tabela 9 é possível verificar que o grau de umidade dos grãos de arroz com casca não influenciam os valores de parâmetros como espessura, diâmetro equivalente, área superficial, volume. Os valores de densidade aparente, densidade real e peso de 1000 grãos foram afetados pelo grau de umidade (Tabela 10). Largura, comprimento, relação dimensional comprimento/largura, esfericidade e porosidade são parâmetros não influenciados pela umidade, pelo menos na faixa entre 23% (umidade de colheita) e 13,5% (umidade de armazenamento). O elevado conteúdo de carboidratos e proteínas (Elias et al, 2003) explica os comportamentos observados.

As dimensões obtidas situam-se entre aquelas registradas na literatura para grãos longos de arroz com casca. O valor do diâmetro equivalente, obtido através da expressão de Mosehin (1965) , Tabela 6, é um valor virtual a partir do qual é obtida a esfericidade. Desta forma, assume-se uma aproximação que será utilizada em outras equações, amplificando as imprecisões em avaliações analíticas.

A relação binária gás/sólido representada pelo ar quente a $43\pm 2^{\circ}\text{C}$ empregado como agente fluidizante (densidade média de $1,116 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$) e os grãos de arroz com densidades reais (Tabela 10) variando entre 1159 a $1217 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ permitiram classificar a condição de fluidização com o emprego do gráfico de Geldart. Para um diâmetro equivalente variando entre 3,55 a 3,58 mm (3550 a $3580 \mu\text{mm}$), o grão de arroz em casca IRGA 418 foi categorizado na classe D, no grau de umidade na abrangência do experimento. Os leitos fluidizados nesta categoria são de difícil fluidização, instáveis e formam canais de ar, o que foi constatado ao longo do experimento.

Os grãos do arroz apresentaram velocidades terminais de $8,69 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ para a umidade de 23%. Com 17,5% e 13,5% de umidade (bu), as velocidades atingiram $8,51 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ e $7,57 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, respectivamente. Estes valores condizem com os resultados obtidos por Benedetti (1987) que comparou resultados teóricos e experimentais para o arroz em casca e outros grãos.

As variações observadas mostraram a dependência da velocidade com a densidade real e com o grau de umidade. Quanto maiores forem as densidades, maiores serão os pesos e velocidades.

As medidas foram obtidas com temperaturas ambientes de 22°C e umidade relativa do ar em 85% e com viscosidade absoluta de $18 \times 10^{-6} \text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$

4.2 SECAGEM

Na Tabela 11 podem ser visualizadas as programações dos quatro estudos que compararam o desempenho e as eficiências térmicas das secagens do arroz IRGA 418. Foram realizadas no secador experimental no regime estacionário contínuo, no regime de fluidização incipiente com a relação de fluidização/ intermitência 1:3 e no regime de fluidização plena com relações de intermitência 1:3 e 1:5. As secagens nos regimes fluidizados foram efetuadas em quatro ciclos, constituídos de um período de fluidização de sete minutos e seguidos de períodos de temperagem de 21 e 35 minutos, respectivamente para as relações de intermitência 1:3 e 1:5.

Tabela 11 Sistemas utilizados na secagem de arroz em casca no experimento.

Tratamentos/Repetições	Sistema	Numero de ciclos	Relação de intermitência	TTF (minutos)	TTS (minutos)
SE (A1 – A2 –A3)	Estacionário	1		0	270
SI (A4 – A5 – A6)	Fluidização incipiente	4	1:3	28	112
SF3 (A7 – A8 – A9)	Fluidização plena	4	1:3	28	112
SF4 (A10–A11–A12)	Fluidização plena	4	1:5	28	168

Obs. 1) Ciclos de secagem com 7 minutos de fluidização e temperagem de 21 e 35 minutos para SI, SF3 e SF5.

2) TTF – tempo total de fluidização; TTS – tempo total de secagem.

Foram registradas ou determinadas, em cada tratamento, as temperaturas de bulbo seco e umidades relativas do ar ambiente e do ar de secagem no plenun do secador que estão expressas na Tabela 12. As entalpias foram determinadas no software “Monachos Mechanical Engineering Calculator”.

Tabela 12 Condições psicrométricas do ar*

Trat.	Repetições	data	Ar ambiente			Ar de secagem		
			T _{bs} (°C)	UR (%)	<i>i</i> kJ.kg ⁻¹ .°C	T _{bs} (°C)	UR (%)	<i>i</i> kJ.kg ⁻¹ .°C
SE	A1 A2 A3	15.04.04	26	73	65,94	40,5	35	83,77
	A4	17.03.04	29	52	60,27	40,5	32	79,27
SI	A5	18.03.04	25,5	70	60,08	42,5	28	78,44
	A6	26.03.04	25	70	59,74	41	28	80,30
SF3	A7	27.03.04	26	71,5	64,28	43	26	79,62
	A8	25.03.04	27	70	67,21	43	29	83,93
SF5	A9	31.03.04	27	70	67,21	42,5	29,5	86,19
	A10	02.04.04	27,5	70,5	69,26	45	26	85,91
	A11	07.04.04	26,5	63	61,70	43	26	79,62
	A12	20.04.04	24	70	57,49	43	26	79,62

Valores médios no período de secagem.

T_{bs} – temperatura de bulbo seco; UR – umidade relativa do ar; *i* - entalpia do ar

As condições ambientais variaram ao longo do tempo. As temperaturas de bulbo seco e as umidades relativas constantes na Tabela 12 representam as médias durante o período de secagem.

Nas secagens as temperaturas do ar de entrada no plenum do secador variaram de 40,5°C até 45°C. A capacidade evaporativa do ar, representada por sua umidade relativa, variou de 26 a 35%.

4.2.1 ESTUDO 1 – SECAGEM ESTACIONÁRIA

No estudo da secagem estacionária, em leito fixo, com regime ininterrupto, realizado no tratamento SE foram registrados os valores médios dos parâmetros operacionais constantes no Quadro 1 com as condições psicrométricas do ar no momento da secagem (Tabela 12).

Com aqueles dados é possível visualizar na Figura 7 as variações das temperaturas e umidades relativas no ar de saída do secador. A umidade relativa do ar de saída, indicativo da remoção da umidade superficial do grão, é elevada nos primeiros 30 minutos, decrescendo até aproximar-se da umidade do ar no plenum (35%). O comportamento da temperatura de bulbo úmido define a característica adiabática do secador.

Pode-se verificar também na Figura 7 que os grãos com temperatura inicial de 25°C, após o período inicial de aquecimento, acompanharam por isoterma, de forma aproximada, a temperatura do ar de secagem (media de 40,5°C).

Quadro 1 – Parâmetros operacionais na secagem estacionaria

CONTROLE DE TRATAMENTO						A1-A2-A3							
MATERIAL			Arroz em casca variedade IRGA 418			Data			15.04.03				
Data da colheita	15.3.04		Umidade de colheita (%) bu		24%								
Data da coleta	16.3.04		Armazenamento câmara fria		16.3.04								
SECAGEM			Secador Experimental DCTA										
Regime			Secagem estacionaria, leito fixo, regime continuo										
Massa úmida (kg)	8,5		Altura do leito inicial (mm)										
Massa seca (kg)	6,59		Altura do leito final (mm)										
Umid. inicial (%bu)	22,45		TTF (min)		0								
Umid. final (%bu)	13,67		TTS (min)		270								
Tempo		VARIABLEIS											
ciclo	min	T _q (e) °C	T _{bu} °C	T _{bs} (s) °C	U (bu) %	v m/s	γ _{ar} m ³ /kg _{AS}	F kg/kg.min	Δp mmH ₂ O	η %	E _g kJ	E _A kJ	
	0	25,00	25,34	29,00	22,45								
	7	38,00	25,34	30,00	21,61	0,77	0,911						
	27	38,67	26,21	31,00	21,12								
	28	40,00	26,21	31,00	20,64								
	35	40,00	26,21	32,00	20,32	0,77	0,911	0,31		66,68	755,20	1132,63	
	42	40,00	26,21	32,00	19,81								
	49	41,00	27,00	33,00	19,23								
	56	41,00	27,00	34,00	18,86								
	63	41,00	27,09	35,00	18,02	0,79	0,911	0,32		49,45	568,86	1152,24	
	83	41,00	26,67	33,00	17,72								
	84	41,00	26,67	32,00	17,72								
	91	41,00	26,67	35,00	17,66	0,79	0,911	0,32		7,34	85,05	1152,24	
	102	41,00	26,67	35,00	17,60								
	112	41,00	26,65	36,00	17,53			0,32		1,94	22,34	1155,20	
	119	41,00	26,65	36,00	17,43	0,79	0,911	0,32					
	147	41,00	26,88	38,00	16,47	0,79	0,911	0,32		20,18	233,56	1155,20	
	168	41,00	26,88	38,00	15,92	0,79	0,911	0,32		10,71	123,41	1155,20	
	210	41,00	26,66	39,00	14,75	0,79	0,911	0,32		22,26	257,02	1155,20	
	240	41,00	26,66	39,00	14,15	0,79	0,911	0,32		13,19	151,88	1155,20	
	270	41,00	25,88	38,00	13,67	0,79	0,911	0,32		6,89	80,23	1155,20	
						0,79 ^a	0,911 ^b	569 ^c		21,97 ^d	2277 ^e	10368 ^f	

Obs. 1) Valores médios de A1, A2 e A3

2) E_g e E_A – energia térmica incorporada aos grãos e ao ar de secagem.

3) η – Eficiência térmica (E_g/E_A).

4) F – fluxo de ar (kg de ar seco por kg de massa seca por minuto).

5) Notações : a) velocidade média na secagem; b) volume específico do ar de secagem; c) massa de ar seco consumida na secagem em kg.; d) eficiência global de secagem; e) energia aproveitada; f) energia do ar de secagem.

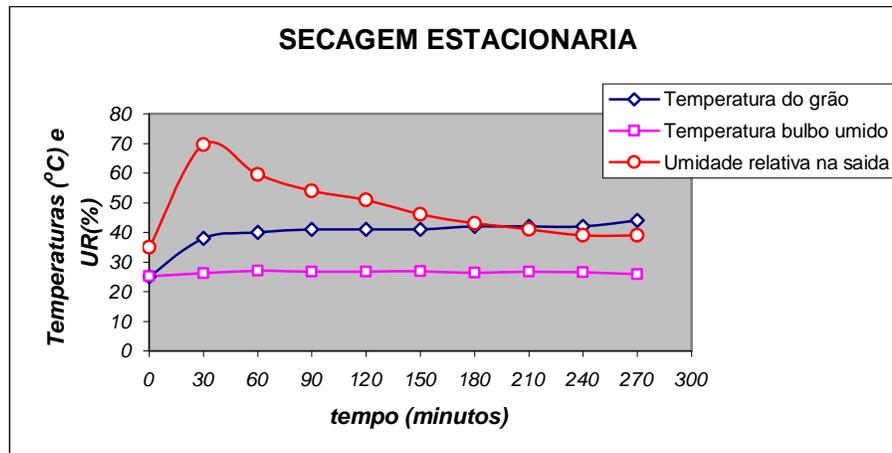


Figura 7 - Parâmetros operacionais da secagem estacionaria

A Tabela 13 e a Figura 8 mostram as variações de umidade dos grãos no tempo total de secagem, destacados os períodos considerados para o experimento. O tempo de secagem (TTS) até a umidade de 13,7% foi de duzentos e setenta minutos. No quadro 1 e tabela 13 observa-se uma eficiência elevada na primeira hora, decrescente a seguir, atingindo o valor de 21,97% para a evaporação de aproximadamente 40% da umidade inicial. Para a variação de umidade até 17,5%, abrangência do experimento, em 112 e 168 minutos, a eficiência térmica atingiu 37,70% e 25,90% respectivamente. A taxa de evaporação ou velocidade de secagem atingiu 4,21% de umidade em valores absolutos nos primeiros sessenta e três minutos decrescendo ao longo do tempo.

Tabela 13 - Variação da umidade e eficiência na secagem estacionaria

Tempo (minutos)	UR no ar de saída (%)	Umidade do grão (%bu)		Velocidade de secagem $dX.dt^{-1}$ $k_{gA} (kg_{ms} \cdot h)^{-1}$	Eficiência térmica η (%)
		media	ΔU (%)*		
0	35,00 _g	22,45	100,00	0	
35	69,50 _a	20,32	90,11	1,9400	66,68
63	59,50 _b	18,02	80,00	0,0490	
91	54,00 _c	17,66	78,22	0,0128	
112	51,00 _d	17,53	77,73	0,0028	37,70
147	46,00 _e	16,47	73,43	0,0252	
168	43,00 _{ef}	15,92	70,42	0,0026	25,90
210	41,00 _f	14,75	65,45	0,2285	
240	39,00 _f	14,15	63,19	0,0160	
270	39,00_f	13,67	59,82	0,0140	21,97

o * - variação de umidade em relação a umidade inicial

o (1) – taxa de secagem por ciclo em kg de água evaporada por kg de massa seca por hora.

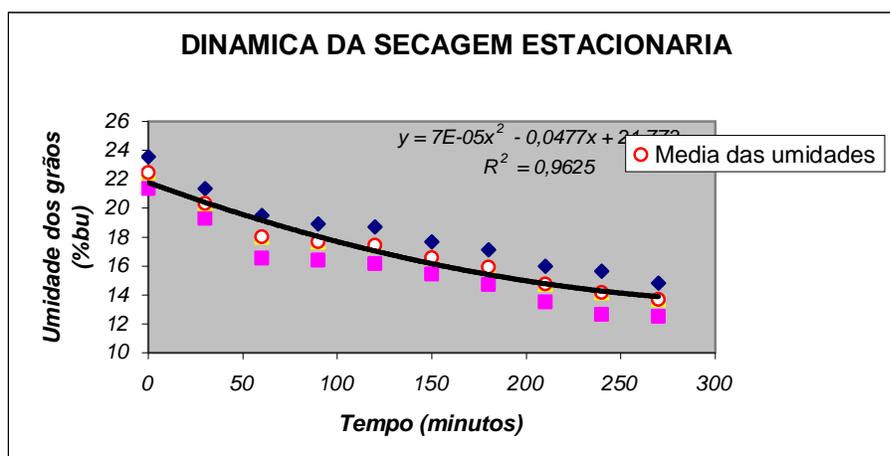


Figura 8 - Variação de umidade na secagem estacionaria.

Na escala do experimento foram consumidas 8831 kJ por quilograma de água evaporada (2112 kcal/kg) para atingir a umidade de 17,4% em 112 minutos, valor considerado elevado, que está além dos índices obtidos por Lasseran (1980) para diversos tipos de secadores. O efeito velocidade não trouxe benefícios em relação a eficiência térmica, que para esta variação atingiu 37,70%.

A massa de ar seco empregado atingiu a media de 569 quilogramas de ar seco para o processo completo. Para a variação de umidade até 17,5% em 112 minutos, o consumo de ar seco foi de 236 quilogramas (259 m³).

4.2.2 ESTUDO 2 – SECAGEM EM FLUIDIZAÇÃO INCIPIENTE

O estudo da secagem em fluidização incipiente é representado pelos valores médios dos parâmetros operacionais obtidos nas repetições A4, A5 e A6, e expressos no Quadro 2. A temperatura do ar de secagem situou-se entre 40,5 e 42,5°C com uma capacidade evaporativa na faixa de 28 a 32% e observa-se, pela pequena flutuação da temperatura de bulbo úmido, que a secagem teve características adiabáticas.

Quadro 2 – Parâmetros operacionais na secagem com fluidização incipiente 1:3.

CONTROLE DE TRATAMENTO										A4-A5-A6					
MATERIAL										Arroz em casca variedade IRGA 418					
Data da colheita	15.3.04			Umidade de colheita (%) bu			24%								
Data da coleta	16.3.04			Armazenamento camara fria			16.3.04								
SECAGEM										Secador Experimental DCTA			Data	16/17/26.03.04	
Regime										Fluidização incipiente 1:3					
Massa umida (kg)	5,4			Altura do leito inicial (mm)			203,33								
Massa seca (kg)	4,14			Altura do leito final (mm)			180,33								
Impurezas (kg)															
Umidade inicial (%bu)	23,39			TTF (min)			28								
Umidade final (% bu)	17,08			TTS (min)			112								
tempo		VARIAVEIS													
ciclo	min	T _q	T _{bu}	T _s	U (bu)	v	γ _{ar}	F	Δp	η	E _g	E _A			
		°C	°C	°C	%	m/s	m ³ /kg _{AS}	kg/kg.min	mmH ₂ O	%	kJ	kJ			
1	0	25,00	23,64	25,33	23,39										
	7	37,67	25,71	30,67	21,67	1,30	0,911	1,01	79,33	77,27	420,00	543,55			
	27	37,67			21,53										
2	28	37,67	25,94	30,67	21,53										
	35	42,33	25,12	35,00	20,08	1,30	0,912	1,02	79,58	49,13	282,28	574,53			
	42	41,67			20,08										
3	49	41,00			19,88										
	56	41,00	26,02	32,00	19,46										
	63	43,00	23,95	34,33	18,12	1,35	0,912	1,06	67,00	44,33	231,16	521,49			
4	84	41,67	26,80	32,00	17,94										
	91	42,67	24,92	36,67	17,18	1,05	0,913	0,82	65,14	33,15	133,25	401,98			
	102	42,00			17,13										
	112	42,00			17,08										
						1,25	0,912	113,12	72,76	52,25	1067	2042			

- Obs. 1) Valores médios de A4, A5 e A6
 2) E_g e E_A – energia térmica incorporada aos grãos e ao ar de secagem.
 3) η – Eficiência térmica (E_g/E_A).
 4) F – fluxo de ar (kg de ar seco por kg de massa seca por minuto).

- 5) Notações: a) velocidade média na secagem; b) volume específico do ar de secagem; c) massa de ar seco consumida na secagem; d) perda de carga média na secagem; e) eficiência global de secagem; f) energia aproveitada; g) energia do ar de secagem.

Os grãos com temperatura inicial de 25°C, após um rápido período de aquecimento no primeiro ciclo, acompanharam, por isoterma, de forma aproximada, a temperatura do ar de secagem. Registrou-se no período de temperagem que a temperatura dos grãos variou muito pouco, havendo um pequeno decréscimo entre um ciclo e outro.

A umidade inicial de 23,49% decresceu até 17,18% no fim do quarto ciclo de secagem, limite de tempo da secagem fluidizada. Depois de resfriados naturalmente dentro do secador, os grãos foram secados no regime estacionário até atingir condição de armazenagem. A variação de umidade pode ser observada na Tabela 14 e na Figura 9.

Tabela 14 – Variação da umidade e eficiência na secagem incipiente 1:3

Tempo (minutos)	Umidade do grão (%bu)		Velocidade de secagem $dX.dt^{-1}$	Eficiência Térmica
	media	ΔU (%) [*]	$k_{GA} (kg_{ms}.h)^{-1}$	η (%)
0	23,39	100,00	0	
7	22,00	94,05	0,1971	77,27
28	21,86	93,45		
35	20,08	85,84	0,2485	49,13
56	19,46	84,99		
63	18,59	79,47	0,1800	45,33
84	18,28	78,15		
91	17,18	74,94	0,1030	33,15
112	17,08	73,45		
270	13,88	59,34		

- o * - variação de umidade em relação a umidade inicial
- o (1) – taxa de secagem por ciclo em kg de água evaporada por kg de massa seca por hora.

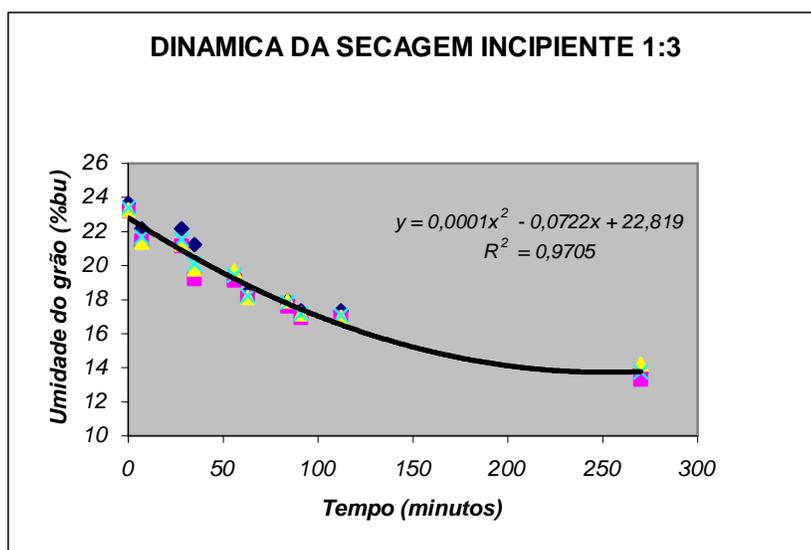


Figura 9 – Variação da umidade na secagem com fluidização incipiente.

Foram consumidas 4678 kJ por quilograma de água evaporada (1119 kcal/kg) com um consumo de ar de 113,12 quilogramas de ar seco no período de secagem.

Na secagem adiabática, a medida que o produto seca, a temperatura na saída tende ao valor da temperatura do ar de entrada, tendência que se pode observar no quadro 2.

Um importante parâmetro de secagem é a umidade relativa do ar de saída que vem carregado da umidade removida dos grãos. Os valores altos são um indicativo de que a secagem ainda não está completa, havendo água por evaporar na superfície do grão.

A variação da umidade relativa de saída pode ser observada nos ciclos de fluidização incipiente na Tabela 15 e Figura 10. No final do primeiro ciclo, a UR ainda é elevada (67,3%), indicando que o tempo de fluidização neste ciclo foi insuficiente, existindo ainda água por evaporar na superfície dos grãos.

Nos ciclos 2 a 4, com os grãos mais secos, as umidades relativas do ar de saída são mais baixas (44, 43 e 36%) com tendência para o valor da UR do ar de secagem (28 a 32%).

Tabela 15 - Variação da umidade relativa do ar de saída por ciclo na secagem com fluidização incipiente 1:3 (valores médios de A4, A5 e A6)

Tempo (min)	Ciclo 1	Ciclo 2	Ciclo 3	Ciclo 4
0	29,33	29,33	29,33	29,33
1	89,00	67,00	45,00	60,00
2	89,33	64,00	53,00	51,33
3	87,33	60,67	49,33	46,33
4	82,33	58,33	46,00	41,00
5	86,33	55,33	46,00	38,67
6	70,33	47,33	43,33	37,33
7	67,33	44,00	43,33	36,00

Obs. No tempo zero a UR média do ar de secagem e serve como referencia.

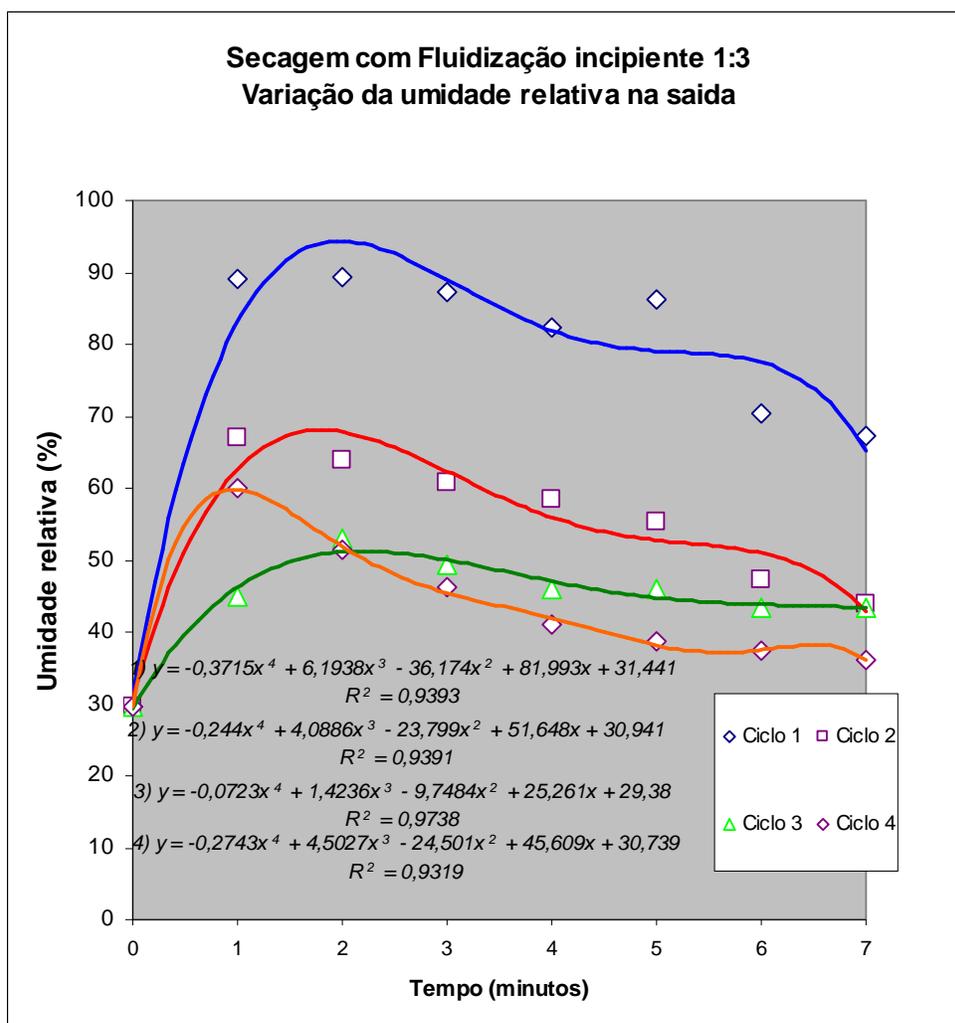


Figura 10 - Variação da umidade relativa do ar de saída

A velocidade mínima, característica da fluidização incipiente, no decorrer do presente tratamento atingiu em seus valores médios a faixa entre 1,05 a 1,39 m/s ($1,22 \pm 14\%$), variando conforme o ciclo. Aproximam-se daqueles calculados analiticamente através do software “**Calculator Process designer**” e dos obtidos pelas correlações de Ergun (1953), McCabe et al. (2002) e Tannous et al. (1994) considerando o grão de arroz como uma esfera de diâmetro igual a 3,55mm. As variações estão de acordo com os trabalhos de Wen (1981) que explica o comportamento de partículas com $Re < 1000$, onde predominam as forças cinéticas além do fato das partículas se agruparem comportando-se com partículas maiores. Estes autores admitem variações de 25 a 34 % a partir de um valor central. Ustra et al, (2003) determinaram para as

variedades de arroz em casca El Paso 144 e IRGA 418, valores que variaram entre 1,0 e 1,52 m/s.

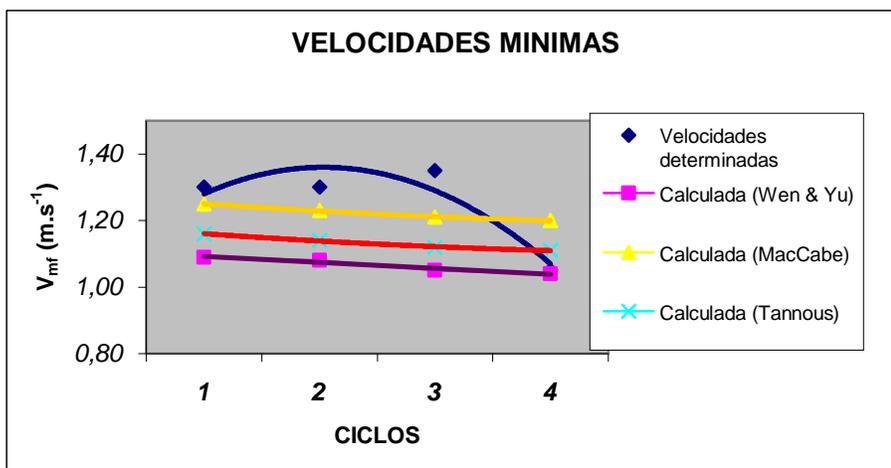


Figura 11 - Comparação entre as velocidades mínimas de fluidização determinadas e calculadas

A velocidade de injeção do ar quente no leito variou de 7,63 a 8,24 m.s⁻¹, valores médios nos tratamentos A4, A5 e A6.

Observa-se no Quadro 2 e Tabela 14 que a eficiência térmica é decrescente a partir do primeiro ciclo, quando atinge seu maior valor. Nesta fase inicial há um consumo maior de calor para o aquecimento inicial dos grãos de arroz e a evaporação é facilitada pela saturação da superfície decorrente das maiores umidades. A medida que a secagem progride, o fenômeno da difusão passa a comandar a secagem e libera com velocidades menores a água para a superfície. Mesmo com o período de descanso, a evaporação torna-se mais demorada e conseqüentemente menos eficiente, conforme se observa nos dois últimos ciclos.

A altura do leito decresceu de 203,33m para 180,3mm, progressivamente a medida que os grãos perdiam umidade e orientavam-se de acordo com o fluxo de ar, ocorrendo durante a fluidização uma expansão de 1,06 a 1,6%.

A Tabela 16 mostra a comparação entre a perda de carga no leito medida no experimento e a calculada pela equação 2, observando-se diferenças, cuja origem encontra-se no artifício de empregar na equação o diâmetro de uma esfera, enquanto o grão de arroz tem o formato de um elipsóide alongado. Além disto, ocorreram flutuações

na pressão e na altura do leito, conforme estudado por Canton (1984), o que dificultou o registro preciso dos valores de perda de carga.

Tabela 16 - Perda de carga e altura do leito

	Ciclo 1	Ciclo 2	Ciclo 3	Ciclo 4
Altura do leito (mm) – inicial	203	200	188	187
Altura do leito final	203	193	188	180
Grau de expansão (%)	1,57	1,50	1,06	1,60
Perda de carga				
Medida	79,33	79,58	67,00	65,14
Calculada	104,00	98,56	89,39	88,91
Variação (%)	23,72	19,25	24,98	26,73

Os números adimensionais de Reynolds e Archimedes foram calculados e variaram linearmente com as velocidades e densidades dos grãos, mantidos constantes a viscosidade do ar e diâmetro equivalente. Na condição de fluidização incipiente e com as velocidades e densidades registradas tiveram as seguintes variações:

Número de Reynolds: 214 a 283 e Número de Archimedes: $1,492 \times 10^6$ a $1,578 \times 10^6$.

4.2.3 ESTUDO 3 – SECAGEM FLUIDIZADA 1:3

O estudo da secagem com fluidização plena mostra os valores médios dos parâmetros operacionais obtidos nas repetições A7, A8 e A9 e expressos no Quadro n.3. A temperatura do ar de secagem situou-se entre 42,5 e 43°C com uma capacidade evaporativa na faixa de 26 a 29,5% e observa-se, pela pequena flutuação da temperatura de bulbo úmido, que a secagem teve características adiabáticas.

Quadro 3 – Parâmetros operacionais na secagem com fluidização plena 1:3.

CONTROLE DE TRATAMENTO				A7-A8-A9								
MATERIAL				Arroz em casca variedade IRGA 418								
Data da colheita	15.3.04	Umidade de colheita (%) bu	24%									
Data da coleta	16.3.04	Armazenamento câmara fria	16.3.04									
SECAGEM				Secador Experimental DCTA								
Regime				Fluidização plena 1:3								
Massa úmida (kg)	5,34	Altura do leito inicial (mm)	210,00									
Massa seca (kg)	4,08	Altura do leito final (mm)	171,67									
Umidade inicial (%bu)	23,70	TTF (min)	28									
Umidade final (% bu)	18,03	TTS (min)	112									
tempo		VARIAVEIS										
ciclo	min	T _g °C	T _{bu} °C	T _s °C	U (bu) %	v m/s	γ _{ar} m ³ /kg _{AS}	F kg/kg.min	Δp mmH ₂ O	η %	E _g kJ	E _A kJ
1	0	23,33	24,54	30,33	23,70							
	7	35,50	25,97	32,67	22,02	1,64	0,914	1,30	74,83	55,16	374,83	679,52
	27	34,67			22,02							
2	28	34,67	26,78	31,67	22,02							
	35	40,50	26,05	36,67	20,57	1,69	0,915	1,34	73,58	46,24	279,12	603,68
	42	39,67			20,57							
3	49	38,33			20,45							
	56	38,00	27,84	33,00	20,45							
	63	43,00	25,94	39,33	19,30	1,65	0,918	1,30	70,69	37,61	228,94	608,76
4	83	40,67			19,10							
	84	40,67	27,98	36,00	19,10							
	91	43,67	26,13	40,33	18,05	1,64	0,918	1,29	66,64	26,92	160,31	595,56
	102	42,33			18,05							
	112	41,50			18,03							
						1,66 ^a	0,916 ^b	149,16 ^c	71,44 ^d	41,94 ^e	1043 ^f	2488 ^g

Obs. 1) Valores médios de A7-A8 e A9

2) E_g e E_A – energia térmica incorporada aos grãos e ao ar de secagem.

3) η – Eficiência térmica (E_g/E_A).

4) F – fluxo de ar (kg de ar seco por kg de massa seca por minuto).

5) Notações: a) velocidade média na secagem; b) volume específico do ar de secagem; c) massa de ar seco consumida na secagem; d) perda de carga média na secagem; e) eficiência global de secagem; f) energia aproveitada; g) energia do ar de secagem.

Os grãos com temperatura inicial de 23,33°C, após um período inicial de aquecimento no primeiro ciclo, acompanharam, por isoterma, de forma aproximada, a temperatura do ar de secagem. Registrou-se um pequeno decréscimo de temperatura entre um ciclo e outro.

A umidade inicial de 23,7% decresceu até 18,0% no fim do quarto ciclo de secagem, limite de tempo da secagem fluidizada. Depois de resfriados naturalmente dentro do secador, os grãos foram secados no regime estacionário até atingir condição de armazenagem. A variação de umidade pode ser observada na Tabela 17 e na Figura 11.

Tabela 17 - Variação de umidade e eficiência na secagem fluidizada 1:3 (SF3)

Tempo (minutos)	Umidade do grão (%bu)		Velocidade de secagem $dX.dt^{-1}$ (1)	Eficiência Térmica
	media	ΔU (%)*	$k_{GA} (kg_{ms}.h)^{-1}$	η (%)
0	23,70	100,00	0	
7	22,02	92,91	0,2485	55,16
28	22,02	92,91		
35	20,57	86,79	0,1971	46,24
56	20,45	86,29		
63	19,30	81,43	0,1542	37,61
84	19,10	80,59		
91	18,05	76,16	0,1371	26,92
112	18,03	76,08		
270	15,33	64,68		

- o variação de umidade em relação a umidade inicial
- o (1) – taxa de secagem por ciclo em kg de água evaporada por kg de massa seca por hora.

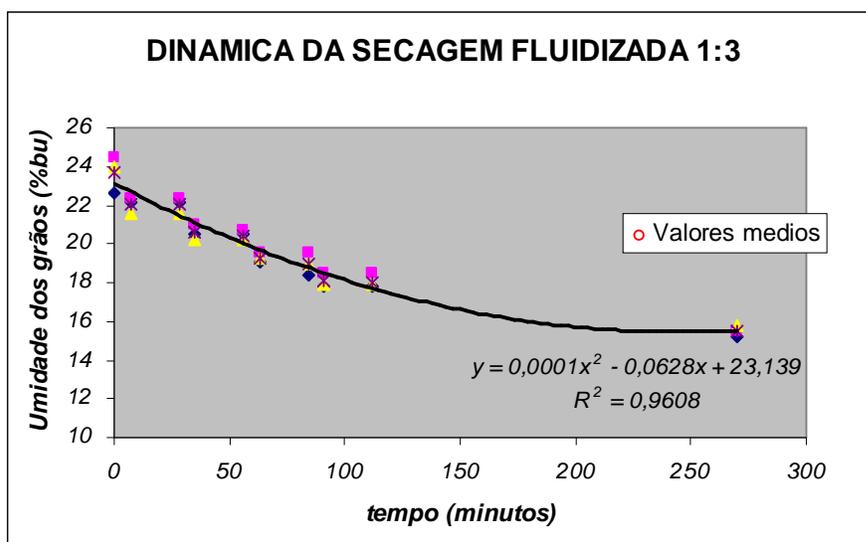


Figura 12 Variação da umidade na secagem com fluidização 1:3 (SF3)

Foram consumidas 6701 kJ por quilograma de água evaporada (1603 kcal/kg) com um consumo de ar de 149,16 quilogramas de ar seco para o período de secagem.

Na secagem adiabática, a medida que o produto seca, a temperatura na saída tende ao valor da temperatura do ar de entrada, tendência que se pode observar no quadro 3.

A variação da umidade relativa de saída pode ser observada nos ciclos de fluidização na Tabela 18 e Figura 13. No final do primeiro ciclo, a UR ainda é elevada

(59,7%), indicando que o tempo de fluidização neste ciclo foi insuficiente, havendo água por evaporar na superfície dos grãos.

Nos ciclos 2 a 4, com os grãos mais secos, as umidades relativas do ar de saída (45, 35 e 33%) aproximam-se da UR do ar de secagem (26 a 29,5%).

Tabela 18 - Variação da umidade relativa do ar de saída por ciclo SECAGEM FLUIDIZADA 1:3 (valores médios A7, A8 e A9)

tempo	Ciclo 1	Ciclo 2	Ciclo 3	Ciclo 4
0	28,16	28,16	28,16	28,16
1	64,67	69,00	69,33	55,33
2	67,67	62,00	54,00	44,00
3	68,67	57,00	45,67	39,33
4	66,00	53,00	42,00	38,00
5	63,67	52,00	39,67	36,33
6	62,67	49,00	37,33	36,00
7	59,67	45,00	35,33	33,33

Obs. No tempo zero a UR média do ar de secagem e serve como referência.

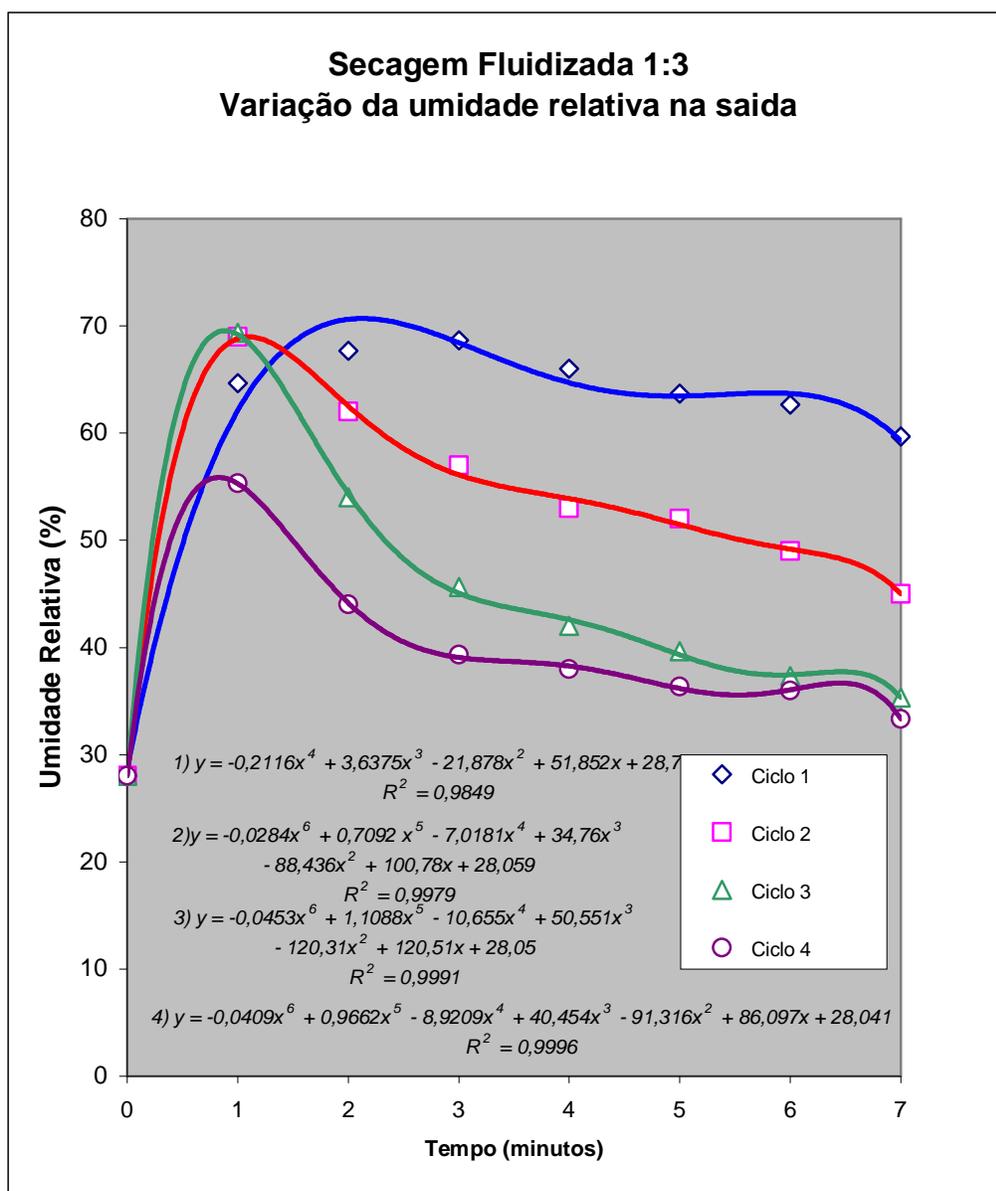


Figura 13 -Variação da umidade relativa do ar de saída

A velocidade de fluidização no decorrer do presente tratamento atingiu um valor médio de 1,66 m/s nos quatros ciclos, situando-se 38% acima da velocidade mínima de fluidização. A velocidade de injeção do ar quente no leito variou de 10,43 a 10,86 m.s⁻¹, valores médios nos tratamentos A7, A8 e A9.

Observa-se no Quadro 3 e Tabela 17 que a eficiência térmica é decrescente a partir do primeiro ciclo, quando atinge seu maior valor. Nesta fase inicial há um consumo maior de calor para o aquecimento inicial dos grãos de arroz e a evaporação é facilitada

pela saturação da superfície decorrente das maiores umidades. A medida que a secagem progride, o fenômeno da difusão passa a comandar a secagem e libera com velocidades menores a água para a superfície. Mesmo com o período de descanso, a evaporação torna-se mais demorada e conseqüentemente menos eficiente, conforme se observa nos dois últimos ciclos.

A altura do leito decresceu de 210mm para 171,67mm, progressivamente a medida que os grãos perdiam umidade e orientavam-se de acordo com o fluxo de ar, ocorrendo durante a fluidização uma expansão de 2,25 a 3,87%.

A Tabela 19 mostra a comparação entre a perda de carga no leito medida no experimento e a calculada pela equação 2, observando-se diferenças, cuja origem encontra-se no artifício de empregar na equação o diâmetro de uma esfera, enquanto o grão de arroz tem o formato de um elipsóide alongado. Ressalte-se que o arroz em grão é de difícil fluidização, formando instabilidades e canais o que foi comprovado visualmente. Além disto ocorreram flutuações na pressão e na altura do leito, conforme estudado por Canton (1984) o que dificultou o registro preciso dos valores de perda de carga.

Tabela 19 - Perda de carga e altura do leito

	Ciclo 1	Ciclo 2	Ciclo 3	Ciclo 4
Altura do leito (mm) – inicial	210	195	183	176
Altura do leito final	196	185	178	171
Grau de expansão (%)	3,87	3,10	2,25	3,18
Perda de carga				
Medida	74,83	73,58	70,69	66,64
Calculada	100,33	101,44	89,48	83,68
Variação (%)	25,41	27,46	21,00	20,36

Na condição de fluidização plena com as velocidades e densidades registradas, os números adimensionais tiveram as seguintes variações :

Numero de Reynolds: 319 a 352 e Numero de Archimedes: $1,469 \times 10^6$ a $1,817 \times 10^6$.

ESTUDO 4 – SECAGEM FLUIDIZADA 1:5 (SF5)

A secagem com fluidização plena 1:5 está expressa pelas médias dos parâmetros operacionais obtidos nas repetições A10, A11 e A12 (Quadro n.4).

Quadro 4 – Parâmetros operacionais na secagem com fluidização plena 1:5.

CONTROLE DE TRATAMENTO						A10-A11-A12							
MATERIAL						Arroz em casca variedade IRGA 418							
Data da colheita	15.3.04		Umidade de colheita (%) bu		24%								
Data da coleta	16.3.04		Armazenamento camara fria		16.3.04								
SECAGEM						Secador Experimental DCTA		Data				02/07 e 20/04/03	
Regime						Fluidização plena 1:5							
Massa umida (kg)	5,3667		Altura do leito inicial (mm)		205,00								
Massa seca (kg)	4,14		Altura do leito final (mm)		174,33								
Umidade inicial (%bu)	22,84		TTF (min)		28								
Umidade final (% bu)	17,39		TTS (min)		168								
tempo		VARIAVEIS											
ciclo	min	T_a °C	T_{bu} °C	T_s °C	U (bu) %	v m/s	γ_{ar} m ³ /kg _{AS}	F kg/kg.min	Δp mmH ₂ O	η %	E_g kJ	E_A kJ	
1	0	23,33	22,52	28,33	22,84								
	7	36,00	24,08	31,33	21,52	1,54	0,91	1,21	73,75	69,43	408,01	587,65	
	28	35,00			21,31								
2	35	34,33			20,99								
	42	34,00	25,26	28,67	20,93					46,36	249,57	538,38	
	49	38,33	24,39	34,67	19,62	1,49	0,91	1,17	70,00				
3	56	37,67			19,53								
	63	36,33			19,46								
	84	36,33	25,11	32,00	19,41					32,40	193,43	596,98	
4	91	42,33	24,51	35,67	18,72	1,49	0,91	1,16	72,50				
	102	41,67			18,61								
	112	39,67			18,46								
	119	38,67			18,32								
	126	38,33	24,63	33,33	18,26								
	133	42,00	24,23	37,33	17,69	1,50	0,91	1,18	66,25	20,86	126,20	604,90	
140	40,00			17,59									
147	39,00			17,49									
168	38,00			17,39									
						1,51 ^a	0,909 ^b	136,52 ^c	70,63 ^d	41,98 ^e	977 ^f	2328 ^g	

Obs. 1) Valores médios de A10, A11 e A12

2) E_g e E_A – energia térmica incorporada aos grãos e ao ar de secagem.

3) η – Eficiência térmica (E_g/E_A).

4) F – fluxo de ar (kg de ar seco por kg de massa seca por minuto).

5) Notações: a) velocidade média na secagem; b) volume específico do ar de secagem; c) massa de ar seco consumida na secagem; d) perda de carga media na secagem; e) eficiência global de secagem; f) energia aproveitada; g) energia do ar de secagem.

Com uma temperatura do ar de secagem entre 43 e 45°C e capacidade evaporativa na faixa de 26% e observou-se, pela pequena flutuação da temperatura de bulbo úmido, o caráter adiabático da secagem.

Os grãos com temperatura inicial de 23,3°C, após um período inicial de aquecimento no primeiro ciclo, acompanharam, por isoterma, de forma aproximada, a temperatura do ar de secagem. Registrou-se um pequeno decréscimo de temperatura entre um ciclo e outro.

A umidade inicial de 22,8% decresceu até 17,4% no fim do quarto ciclo de secagem, limite de tempo da secagem fluidizada. Depois de resfriados naturalmente dentro do secador, os grãos foram secados no regime estacionário até atingir condição de armazenagem. A variação de umidade pode ser observada na Tabela 20 e na Figura 13.

Tabela 20 - Variação de umidade e eficiência na secagem fluidizada 1:5 (SF5)

Tempo (minutos)	Umidade do grão (%bu)		Velocidade de secagem $dX.dt^{-1}$ (1)	Eficiência Térmica
	media	ΔU (%)*	$k_{gA} (kg_{ms}.h)^{-1}$	η (%)
0	22,84	100,00	0	
7	21,52	94,24	0,1885	74,87
42	20,93	91,62		
49	19,62	85,89	0,1800	47,23
84	19,41	84,85		
91	18,72	81,98	0,0085	32,31
126	18,26	80,31		
133	17,69	77,44	0,0017	22,82
168	17,39	76,12		

* - variação de umidade em relação a umidade inicial

(1) – taxa de secagem por ciclo em kg de água evaporada por kg de massa seca por hora

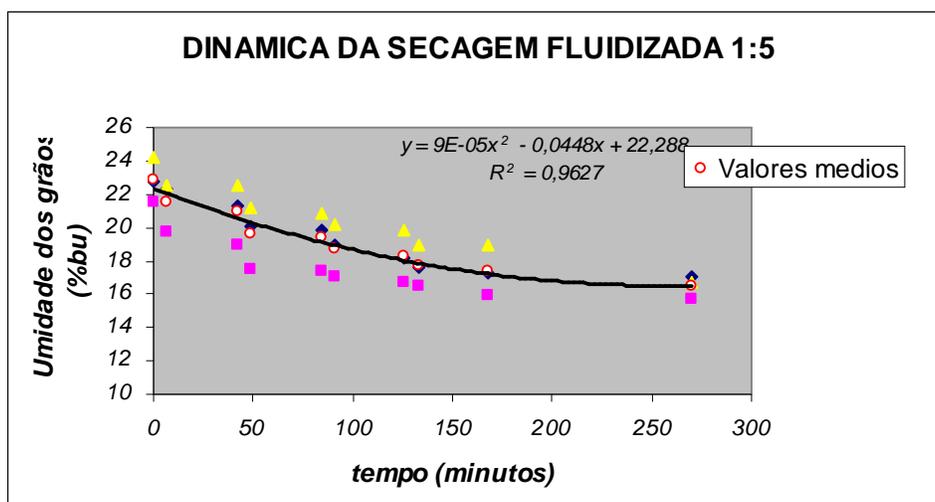


Figura 14 Variação de umidade na secagem SF5

Foram consumidos 6539 kJ por quilograma de água evaporada (1564 kcal/kg) e 136,52 quilogramas de ar seco no período considerado.

A temperatura do ar de saída tende ao valor da temperatura do ar de entrada, como se pode observar no quadro 4. Esta tendência é característica das secagens adiabáticas.

A variação da UR do ar de saída pode ser observada, por ciclos de fluidização na Tabela 21 e Figura 15. No final do primeiro ciclo a UR ainda é elevada (53,67%), indicando que o tempo de fluidização neste ciclo foi insuficiente, havendo ainda água por evaporar na superfície dos grãos.

Nos ciclos 2 a 4, com os grãos mais secos, as UR do ar de saída são menores, tendendo para a UR do ar de secagem (26%).

Tabela 21 - Variação da umidade relativa do ar de saída por ciclo SECAGEM FLUIDIZADA 1:5 (valores médios A10, A11 e A12)

tempo	Ciclo 1	Ciclo 2	Ciclo 3	Ciclo 4
0	26,67	26,67	26,67	26,67
1	61,00	76,67	57,67	49,67
2	64,00	62,33	51,67	44,67
3	62,67	54,00	46,67	41,00
4	60,67	51,00	44,33	37,67
5	58,33	48,00	41,33	35,67
6	56,00	44,33	39,33	35,33
7	53,67	41,67	37,67	34,33

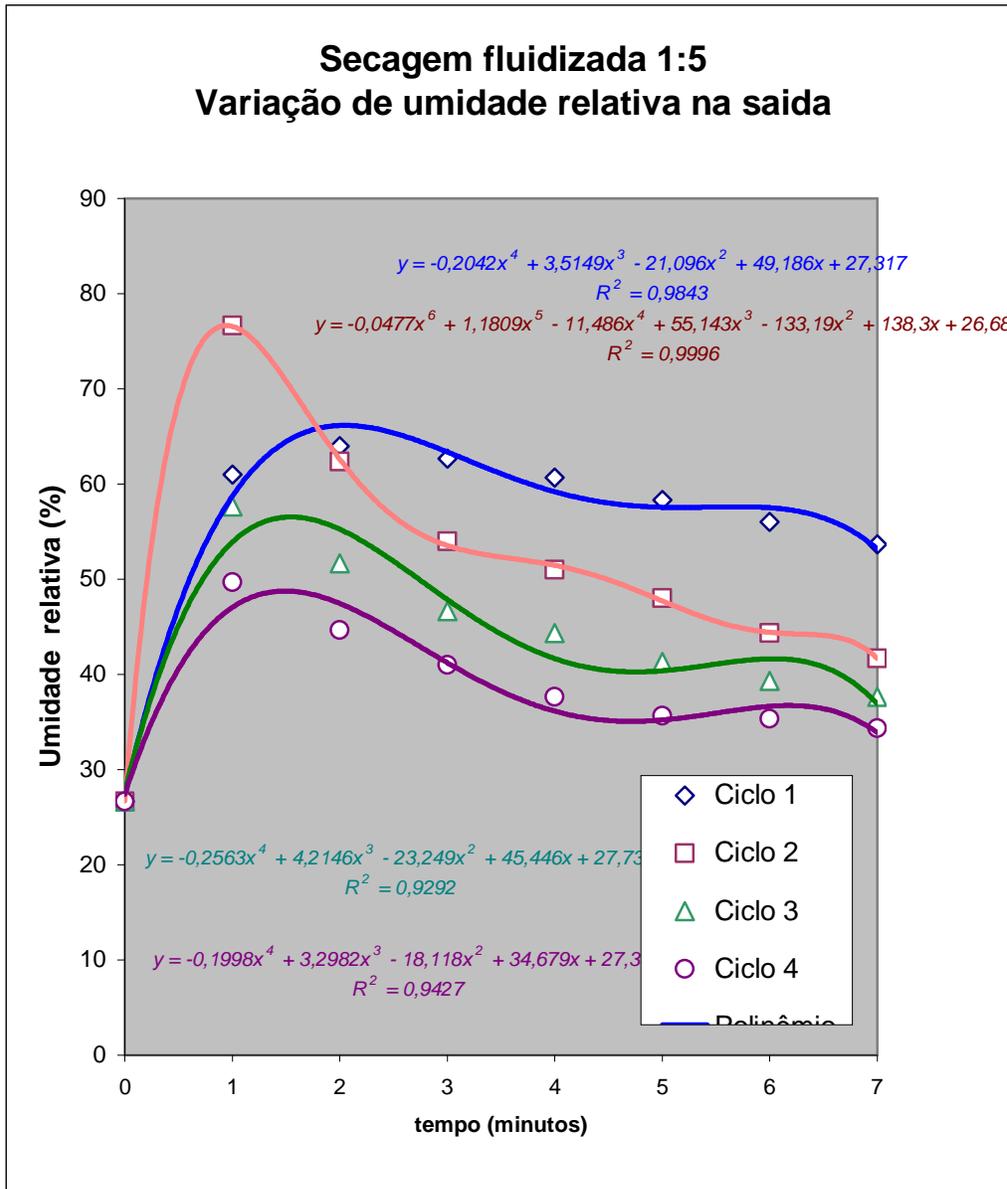


Figura 15 -Variação da umidade relativa do ar de saída

A velocidade de fluidização neste tratamento atingiu um valor médio de 1,49 m/s nos quatros ciclos, situando-se 24% acima da velocidade mínima de fluidização. A velocidade de injeção do ar quente no leito variou de 9,53 a 10,05 m.s⁻¹, valores médios nos tratamentos A10, A11 e A12.

Observa-se no Quadro 4 e Tabela 19 a eficiência térmica decrescente a partir do primeiro ciclo, quando atinge o valor maior. No início, o consumo de calor e a eficiência são maiores decorrentes do aquecimento inicial dos grãos e da evaporação que é

facilitada pela maior saturação da superfície. A medida que a secagem progride, a difusão da água passa a interferir na velocidade de secagem, liberando menores volumes de água para a superfície do grão. Mesmo com o período de temperagem, a evaporação torna-se mais demorada e conseqüentemente menos eficiente, conforme se vê pelos valores de eficiência térmica nos dois últimos ciclos.

A altura do leito decresceu de 205mm para 174,33mm, progressivamente a medida que os grãos perdiam umidade e orientavam-se de acordo com o fluxo de ar, ocorrendo durante a fluidização uma expansão de 3,25 a 3,73%.

A Tabela 22 compara a perda de carga no leito medida no experimento e a calculada pela equação 2, observando-se diferenças, cuja origem encontra-se no artifício de empregar na equação o diâmetro de uma esfera, enquanto o grão de arroz tem o formato de um elipsóide. Ressalte-se que o arroz em grão é de difícil fluidização, formando instabilidades e canais o que foi comprovado visualmente. Além disto ocorreram flutuações na pressão e na altura do leito, conforme estudado por Canton (1984) o que dificultou o registro preciso dos valores de perda de carga.

Tabela 22 Perda de carga e altura do leito

	Ciclo 1	Ciclo 2	Ciclo 3	Ciclo 4
Altura do leito (mm) – inicial	205	193	190	180
Altura do leito final	193	190	183	174
Grau de expansão (%)	3,73	3,25	3,23	3,50
Perda de carga				
Medida	73,75	70,00	72,50	66,25
Calculada	101,13	101,44	87,48	81,78
Variação (%)	27,38	31,00	17,12	15,53

Os números adimensionais de Reynolds e Archimedes foram calculados e variaram linearmente com as velocidades e densidades dos grãos, mantidos constantes a viscosidade do ar e diâmetro equivalente. Na condição de fluidização plena com as velocidades e densidades registradas tiveram as seguintes variações:

Numero de Reynolds: 295 a 321 e Numero de Archimedes: $1,447 \times 10^6$ a $1,817 \times 10^6$.

4.2.4 COMPARAÇÃO ENTRE OS REGIMES DE SECAGEM.

Os quadros 1 a 4 e os resultados obtidos nos tratamentos 1 a 12, já descritos, permitiram elaborar a Tabela 23 registrando os principais parâmetros operacionais obtidos na secagem do arroz em casca IRGA 418, dentro da faixa operacional do experimento

Tabela 23 - Parâmetros operacionais nos tratamentos de secagem

Trat.	m_g	U_i	U_f	ΔU	$T_g (i)$	TTS	TTF	m_a/m_{gs}	m_{as}	v (media)	v_i	η
n	(kg)	(% bu)	(% bu)	%	°C	min	min	kg _{AS} /kg _{ms}	kg	m.s ⁻¹	m.s ⁻¹	%
A1-A3	6,59	22,45	17,53	21,91	25	112	0	14,07	85,70	0,79		37,70
A4	4,12	23,67	17,35	26,70	25	112	28	26,88	110,76	1,23	7,63	53,99
A5	4,15	23,22	16,94	27,05	25	112	28	27,24	113,07	1,25	8,07	53,69
A6	4,14	23,27	16,95	27,20	25	112	28	27,90	115,53	1,28	8,24	50,43
A7	4,24	22,59	17,80	21,20	23	112	28	35,10	149,16	1,65	10,62	42,56
A8	4,08	24,48	18,44	24,67	24	112	28	37,31	152,23	1,70	10,86	42,65
A9	3,91	24,02	17,86	25,64	23	112	28	37,36	146,10	1,63	10,43	40,73
A10	4,09	22,78	17,30	24,06	24	168	28	32,63	133,48	1,49	9,53	42,25
A11	4,24	21,57	15,90	26,29	22	168	28	31,86	135,12	1,50	9,64	43,01
A12	4,09	24,17	18,96	21,56	22	168	28	34,43	140,82	1,53	10,05	36,12

Observa-se que a variação de umidade, nos tratamentos fluidizados esteve na faixa de 21,6 a 26,7%. No tratamento estacionário registrou-se a velocidade de ar mais baixa, porém acima do usual. Na secagem com fluidização incipiente, as velocidades de fluidização mínimas apresentaram variações admissíveis com aquelas calculadas analiticamente. Velocidades maiores que a de fluidização mínima ocorreram nos tratamentos com secagem fluidizada, sem trazer efeito imediato nas eficiências térmicas.

As velocidades de injeção no distribuidor nas secagens fluidizadas (SI, SF3 e SF5) foram de 7,63 a 8,52 m/s na primeira e maior na fluidização plena, atingindo a faixa de 9,53 a 10,86 m/s. Esta velocidade é a responsável pela movimentação ou fluidização plena do leito. Na fluidização incipiente o leito aumenta a sua porosidade pela separação dos grãos entre si, sem entretanto movimentá-los. As velocidades estiveram abaixo da velocidade terminal já determinada.

O fluxo de ar é crescente a partir da secagem com leito fixo. Os maiores valores ocorreram na secagem fluidizada SF3.

A variação de umidade em cada regime pode ser comparada na Tabela 24, observando-se que a variação mais eficaz entre os regimes fluidizados ocorre na fluidização incipiente que acompanha aproximadamente o gradiente de secagem do regime estacionário.

Tabela 24 - Variação de umidade por regime de secagem

tempo min.	Variação de umidade (%)			
	SE	SI	SF3	SF5
0	22,45	23,39	23,70	22,84
7	21,61	21,67	22,02	21,52
28	20,64	21,53	22,02	21,31
35	20,32	20,08	20,57	20,99
42	19,81	20,08	20,56	20,93
49	19,23	19,88	20,53	19,62
56	18,64	19,46	20,45	19,53
63	18,02	18,12	19,30	19,46
84	17,72	17,94	19,10	19,41
91	17,66	17,18	18,05	18,72
102	17,56	17,13	18,05	18,61
112	17,53	17,08	18,03	18,46
119	17,43			18,32
126	17,25			18,26
133	16,74			17,69
140	16,55			17,59
147	16,47			17,49
168	15,92			17,39
180	15,92			
210	14,75			
240	14,15			
270	13,67	13,67	15,51	16,46

A Figura 16 representa a variação das umidades normalizadas, em percentual relativo a umidade inicial. Para igual tempo de fluidização (TTF), a secagem incipiente (SI) foi mais eficaz que a secagem com fluidização plena (SF3). Nesta, a velocidade de ar e por consequência a massa de ar seco (Tabela 23) empregada foi maior. Aparentemente o maior período de descanso no tratamento SF5 não alterou a taxa de remoção de umidade (velocidade de secagem).

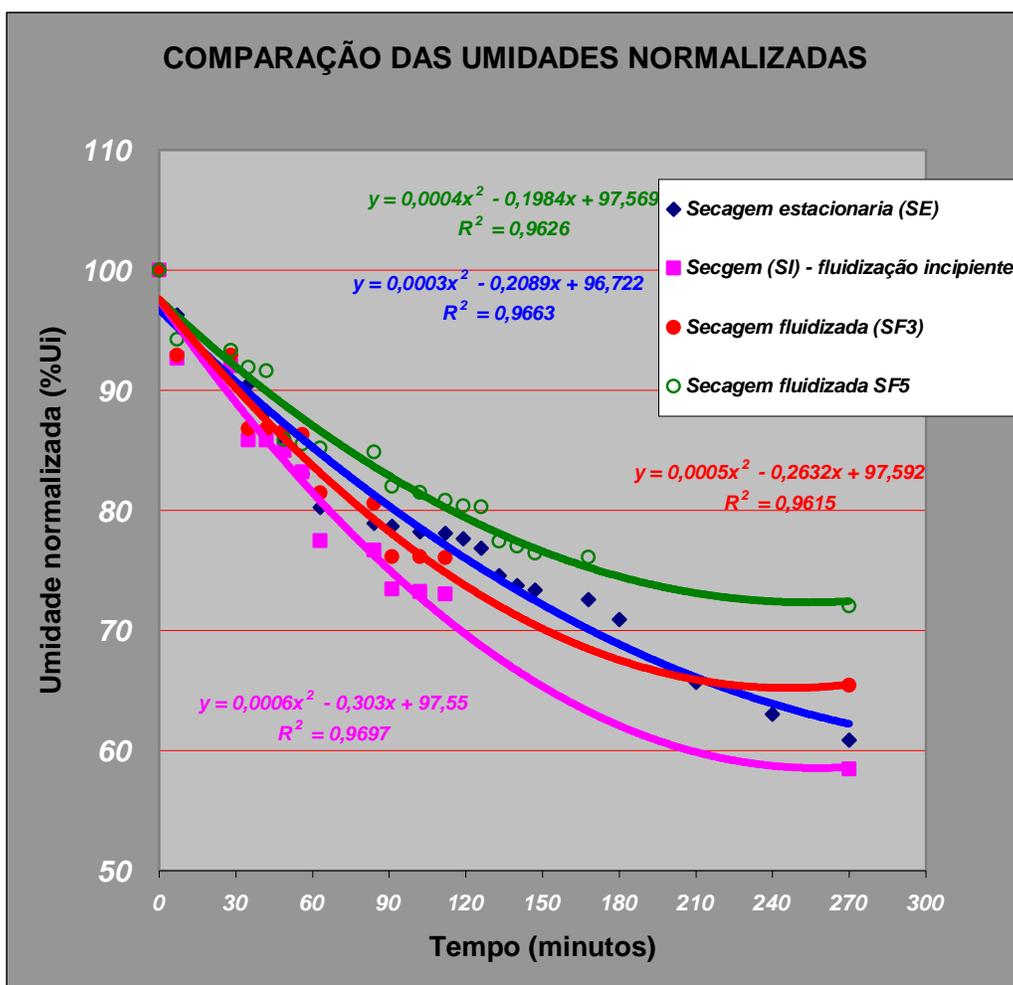


Figura 16 - Variação das umidades normalizadas

A Tabela 25 mostra o consumo de energia térmica e de ar seco para os períodos de secagem nos tratamentos SI, SF3 e SF5, mostrando uma nítida vantagem da condição incipiente sobre a fluidização plena, tanto no aporte de calor como na energia mecânica de impulsão de ar.

Tabela 25 – Consumo de calor e ar seco nas secagens estacionaria e fluidizadas.

Regime de secagem	Energia térmica consumida no período (kJ/kg _{AGUA})	Massa de ar seco consumido no período (kg)	Eficiência térmica % (valores médios)
SE	8831	236,00	37,70
SI	4607	113,12	52,70
SF3	6701	149,16	41,98
SF5	6539	136,52	40,46

Em todos os tratamentos registraram-se maiores eficiências térmicas nos primeiros ciclos, conforme se vê nos quadros 1 a 4, decorrentes da facilidade de remoção de água da superfície mais saturada dos grãos. O aumento da velocidade a partir da fluidização mínima não acelera a secagem nos regimes de fluidização plena.

5. CONCLUSÕES

Nas condições expostas neste trabalho:

1. É possível secar o arroz em leito fluidizado, ocorrendo o melhor desempenho de secagem e eficiência térmica no tratamento com fluidização incipiente. Nos dois primeiros ciclos de secagem ocorrem: a) as melhores eficiências térmicas; b) as maiores perdas de carga.

2. O arroz IRGA 418 é fluidizável assumindo a condição D na classificação GELDART com velocidade mínima de fluidização entre 1,05 e 1,39 m/s diferindo das correlações analíticas em 20 a 30%. As perdas de cargas diferem de 20 a 30% daquelas calculadas pela Equação de Ergun.

3. O arroz IRGA 418 tem fluidização plena com velocidades maiores que a velocidade mínima de fluidização e menores que a velocidade terminal, constatando-se a formação de canais e instabilidades no leito e na perda de carga.

4. A expansão do leito variou até 1,6% na fluidização incipiente e até 3,87% na fluidização plena.

6. REFERENCIAS

ABRASEM – Associação Brasileira de Sementes e Mudanças. Anuário 2003 p.24-25.

ALMEIDA,C.; SANTOS, S.C. **Fluidodinâmica de sementes de brócolis em leito fluidizado e leito de jorro**. Scientia Agrícola, vol.59. Piracicaba, out/dez. 2002.

AMATO,G.W.; CARVALHO,J.L.V.; SILVEIRA,F.S. **Arroz parboilizado: tecnologia limpa, produto nobre**. Ricardo Lenz Editor, Porto Alegre, 2002.

AMATO,G.W., **Parboilização do arroz: um processo para obtenção de colheita de plantio virtual**. In: I Simpósio sul-Brasileiro de qualidade de arroz, Pelotas, 20 a 22 de agosto de 2003 (p. 315 - 329).

ASAE – **Resistance to airflow of grains, seeds, other agricultural products and perforated metal sheets**. ASAE D272.3, mar96. ASAE STANDARDS 2000 (p. 539 – 546), 2000.

BENEDETTI, B.C. **Influência do teor de umidade sobre propriedades físicas de vários grãos**. Dissertação de mestrado. UNICAMP, FEA, Campinas, 1987.

BHAMIDIPATI,S.; SINGH,R.K. **Determination of fluid-particle convective transfer coefficient**. Transactions of the ASAE 2351/95 Vol 38 (3): 857-862.

BRASIL. Ministério da Agricultura e do Abastecimento. **Portaria 269 de 17/11/1988 referente a classificação, embalagem e marcação do arroz**. 1988

BRASIL. Ministério da Agricultura e do Abastecimento. **Portarias 157 de 4/11/91, 171 de 24/04/97 que altera a Portaria 269 referente a classificação do arroz**. 1991

BRASIL.Ministério da Agricultura e do abastecimento. **Portaria n. 1 de 9/01/1989 e Portaria n.10 de 12/04/1996 que aprova os roteiros e critérios para uniformização da classificação do arroz**.

BRASIL. Ministério da Agricultura e Reforma Agrária. **Regras para a análise de sementes**. Brasília:SNDA/DNDV/CLAV, 1992. 365 p.

BRASIL.Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. CONAB Companhia Nacional do Abastecimento, **2004 - Segundo levantamento da intenção de plantio safra 2004/2005**. www.conab.gov.br

BANASZEK, M.M.; SIEBENMORGEN, T.J. **Moisture adsorption rates of rough rice**. Transactions of the ASAE, 33(4), 1257-1262, 1990.

BHAMIDIPATI S. & SINGH,R.K. **Determination of fluid-particle convective heat transfer coefficient**. Transactions of ASAE, vol 38(3) p. 857-862, 1995.

- BONAZZI,I.C.; COURTOIS,F.; GENESTE,C.B.; PONS,M.C.; BIMBENET,J.J. **Experimental study on the quality of rough rice related to drying conditions.** Drying 94, V.Rudolph&R.B.KeyE. 1994, p. 1031-1036.
- CANTON,P.R. **Hidrodinamica da fluidização.** Revista Pesquisa e Tecnologia FEI, 1984, p. 16 – 20.
- CARMAN, P.C. Transactions Institute Chemical Engineering, vol.15, p.150, 1937. In: THOBER,C.W.A.; CHAZAN,D.T.; RECH,R.L.; MENDES,T.F. **Curso sobre Leito Fluidizado e suas aplicações Industriais. IGAPRO. Porto Alegre RS.**
- CHASE,G.G. **Solids notes 5 .Two phase flow – Particles.** The University of Akron.
- CHEN,C.; WU,P. **Thin layer drying model for rough rice with high moisture content.** Journal of agricultural engineering research, 2001 (80) 1 p. 45-52.
- CHAU,N.N.; KUNZA,O.R. **Moisture content variation among harvested rice grains.** Transactions of the ASAE, 25(4), 1037-1040. 1982.
- CHUNG,D.S. & PFOST,H.B. **Adsorption and desorption of water vapor by cereal grains and their products.** Transactions of the ASAE, St.Joseph, vol.10,n.4 p.545-555, 1967.
- CIENTEC. **Aproveitamento energético da casca de arroz.** Relatório de projeto de pesquisa. Fundação de Ciência e Tecnologia, Porto Alegre,1986.
- CNOSSSEN,A. G.; JIMENEZ,M.J.; SIEBENMORGEN,T.J. **Rice fissuring reponse to high drying and tempering temperatures.** Journal of food engineering (59), 2003 (p. 61- 69).
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Safras: consolidado 1990 a 2002.** Disponível em www.conab.gov.br .Acesso em fevereiro 2005.
- COURTOIS,F. **Dynamic Modelling of Drying to Improve Processing Quality of Corn.– 1997.**
- DE DIOS, C.A. **Secado de granos e secadoras.** Organizacion de Las Naciones Unidas para La Agricultura. FAO, Santiago , Chile. 1996.
- DESHPANDE, S.D.; BAL, S.; OJHA,T.P. **Physical properties of soybeans.** Journal of agricultural Engineering Research, vol.53 p.89-98, 1993
- DE LUCIA,M.; ASSENNATO,D. **La ingenieria em el desarrollo – manejo y tratamiento de granos pos-cosecha.** FAO
- DiMATTIA, D. G.; AMYOTE, P.R.; HAMDULLAHPUR, F. **Slugging characteristics of group D particles in fluidized beds.** Canadian Journal Chemical Engineering. 75 (1997) 452–459.
- DiMATTIA, D. G.; AMYOTE, P.R.; HAMDULLAHPUR, F. **Fluidized bed drying of large particles.** Transactions of ASAE 1996 vol 39 (4) 1745-1750.

- ELIAS, M.C., **Pos colheita e industrialização do arroz.** In: GOMES,A.S.G & MAGALHÃES JUNIOR, A.M. **Arroz irrigado no sul do Brasil.** Capítulo 22, p.745-798.EMBRAPA Informação tecnológica. Brasília,2004
- ELIAS,M.C. **Matéria-prima e controle da qualidade na industrialização do arroz.** In: I Simpósio sul-Brasileiro de qualidade do arroz. Abrapós, Anais, (p.331-351), 2003.
- ELIAS, M.C. **Secagem e armazenamento de grãos em media e pequena escalas.** 3ª edição. Pelotas: Editora e Gráfica Universitária,2002.
- ELIAS,M.C; LOECK,A.E.; MULLER,M.M. **Recomendações técnicas para colheita, secagem, armazenagem e industrialização do arroz para o Sul do Brasil – safra 2000/2001.** Pelotas: UFPel,2001.
- ELIAS, M.C., **Tecnologia em secagem e armazenamento de grãos; sistemas, processos e métodos.** Pelotas: Pólo de Modernização Tecnológica em Alimentos da Região Sul do Rio Grande do Sul (Convenio UFPel – Governo do Estado) e COREDESUL,2000.
- ELIAS,M.C.; LOECK,A.E.; BARBOSA,F.F.; GRUTZMACHER,D.D. **Recomendações técnicas para colheita, armazenamento e industrialização do arroz para o Sul do Brasil.** FAEM–DCTA,1999/2000, Pelotas.
- ELIAS,M.C.; ROMBALDI,C.V. **Secagem intermitente e industrialização de arroz, variedade BR-IRGA 409.** Lavoura arrozeira, nov/dez.1989, Porto Alegre.
- ERGUN,S. **Chemical Engineering Progresses,** p.48-89. 1953.
- FAGUNDES, C.A.A. **Secagem estacionaria de arroz em baixas temperaturas.** In: I Simpósio sul-brasileiro de qualidade do arroz. Abrapos. Anais (p 275-278), 2003.
- FAO. **Princípios de secado de granos: psicrometria e higroscopia.** Santiago, Chile,1991. Serie Tecnologia Poscosecha n.8, 72p
- FONTANA,C. **Propriedades físicas e térmicas do arroz.** Cadernos Didáticos. Vol. 5, Edições UFSM. 1986, Santa Maria.
- FONTANA,C. **Secagem do Arroz Parboilizado.** Cadernos Didáticos, vol. 4, Edições UFSM. 1986, Santa Maria.
- FEMENIA,A.; SIMAL,S.; ROSSELO,C.; BENEDITO,J. **Identificacion del coeficiente de transferencia de calor por conveccion.** Universidade de Iles Illes Balears. Balears, Espanha. 2000.
- FILHO,S.J.; FILHO,A.F.L. **Princípios de secagem de grãos.** Centreinar UFV. Viçosa.1980.
- FUENTES,J.A & CHANDIA,C.I. **Ensayo de um prototipo de secador granos tipo batch.** Revista Agrociencia, p.. 33 - 37, Chile. 1989
- GELDART,D. **Types of gás fluidization.** Powder Techonology, v.7 (285-292), 1973. In: RHODES, M.. **Fluidization of particles by fluids.** Educational Resourses for Particles Technology , ERPT. 2001.

GROFF, R. A **secagem convencional do arroz**. In: I simpósio sul-brasileiro de qualidade do arroz .Abrapos, Anais, 2003 (p. 263 – 273).

GUPTA,R.K.; Das S.K. **Physical properties of sunflower seeds**. Journal of agricultural engineering research. 1997,(vol.66), p.1-8.

HAJIDAVALLO,E. **Hydrodynamic and thermal analysis of a fluidized bed drying systems**. Ph.D thesis, Dalhousie University-Daltech, Halifax, Canada (1998). In: SYAHRUL, S.; DINCER,I.; HAMDULLAHPUR, F. **Thermal analysis in fluidized bed drying of moist particles**. Applied Thermal Engineering, (22) 2002, (p.1763-1775).

HAWK,A.L.; BROOKER,D.B.; CASSIDY,J.J. **Aerodynamics características of selected farm grains**. Transactions of ASAE, St.Joseph,MI, vol. 9(1): p. 48 -51,1966.

HONG,R.Y.; GUO,Q.J.; LUO,G.H.; ZHANG,J.; DING,J. **On the jet penetration height in fluidized beds with two vertical jets**. Powder Technology. 133(2003) 216-227.

KNEULE,F. **El secado**. Ediciones Urmo. Bilbao. Espanha.1966.

KOZANOGLU,B.U.; CHANES,J.W.; CUAUTLE,D.G.; JEAN, J.P.S. **Hydrodynamics of large particle fluidization in reduced pressure operations: an experimental study**. Powder technology, n.125 (2002) p.55-60.

KUNZE,O.R. **Simple R.H. systems that fissure rice and other grains**. ASAE Paper No. 88-5010, St Joseph , MI: ASAE 1988.

LASSERAN,J.C. **Aeração de grãos**. CENTREINAR, UFV. Viçosa, 1981

LASSERAN,J.C. **Utilização e desempenho de secadores. Possibilidades de aperfeiçoamento**. Revista Brasileira de Armazenagem. Viçosa vol3. p.50-60, 1980.

LASSERAN,J.C. **Princípios gerais de secagem**. Revista Brasileira de Armazenagem. Viçosa v.3, n.3, p. 17- 46, 1978.

LIM,L.C.; TASIRIN,S.M.; DAUD, W.R.W. **High temperature fluidization and fluidized bed drying**. In:NSF Workshop 2001. Kuala Lumpur.

LIU,Q.; CAO,C.; BAKKER-ARKEMA. **Modeling and analysis of mixed-flow grain dryers**. ASAE 40 (4) . (1099-1106) 1997.

LOEB,J.R.; MORRIS,N,J. & DOLEAR, F.G. **Rice bran oil. Storage of the bran as it affects hydrolysis of the oil**. Journal American Oil Chemistry Society, 26(12): 738-81, 1979.

MaCCABE,W.L.; SMITH,J.C.; HARRIOT.P. **Operaciones unitarias en ingeniería química**. 4. edição, Editorial Mc.Graw Hill. Singapura,1985.

MARQUES,M.L. Tese de doutorado. Modelizacion de la operacion de secado de malta por aire caliente em lecho fijo e em capa profunda. Universitat de Lleica – Salamanca - 1998

MASSARANI,G. **Alguns aspectos da separação sólido-fluido**. COOPE/UFRJ - RJ.

MERCOSUL – Resolução n 5/97 - Regulamento Técnico Mercosul de Identidade e de qualidade do arroz beneficiado -

MESQUITA, A. L. S.; GUIMARÃES, F.A.; NEFUSSI, N. **Engenharia de ventilação Industrial**. CETESB/ASCETESB. 1985 S. Paulo.

MEESO, N.; SOPONRONNARIT, S.; WETCHACAMAS. **Evaluation of drying System Performance in rice mills**. ACIAR - 2002 .

MELHOR eficiencia termica em secadores. Revista controle e instrumentação, 11 (1982) – (10-16).

MENDONZA, M.G; SPINOZA, J.A.R.; MARTINEZ, R.S. **Balance de energia para um secador continuo de Lecho fluidizado multietapas de fluxo cruzado**. Universidade Autônoma Metropolitana Iztapalapa . México, 2001.

MILMAN, M.J. **Manejo da relação de intermitência e da temperatura do ar na secagem industrial do arroz**. Dissertação de mestrado. UFPEL - Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, DCTA. UFPel, 2001.

MORA, M. **Glosario técnico sobre factores de calidad en granos básicos**. FAO. SAN JOSÉ, COSTA RICA 1997

MOREIRA, R. **Unit operations food processing**. Univ. Of Texas. 2001

MOHSENIN, N.N.. **Physical properties of agricultural products**. Transactions of ASAE, St. Joseph, MI, 8(1): 25-9, 1965.

MOTTA, W.A.; VILLELA, F.A.; ZIMMER, G.J., **Adaptação do método continuo de secagem para sementes de arroz**.

NEITZEL, I.I.; PEREIRA, N.G.; CANASSA, E.M.; GOMES, E.S.; DAMASCENO, J.W.; REBOLA, P. **Operação de uma unidade de cereais em leito de jorro com geração de ar quente por combustão fluidizada de carvão**. In: 4º Congresso de Utilidades, 20 a 25 de outubro de 1985. Rio de Janeiro.

NUH, D.N. & BRINKWORTH, B.J., **A novel thin layer model for crop drying**. Transactions of ASAE vol. 40 (3), p.659 – 669, 1997

OSELLA, C.A. **Soybean heat-treated using a fluidized bed**. LW technology (30) : (676-680). 1997

PARK, K.J.; BROD, F.P.R.; PECORA, A.A.B.; **Transferência de calor em leitos fluidizados borbulhantes e leitos vibro-fluidizados**. Revista da Sociedade Brasileira de Ciência e Tecnologia dos Alimentos, jul-dez 2000, p. 113 -127.

PARIKH, D.M. **Airflow in Batch Fluid-Bed Processing**. Reprinted from **PHARMACEUTICAL TECHNOLOGY**, Niro Incorporation MARCH 1991.

PATTIPATO, R.R.; WEN, C.Y. **Minimum fluidization velocity at high temperatures**. Industrial Engineering Chemical Process, (20) 1981, (705 -708).

PERES, W.B. **Manutenção da qualidade de grãos e sementes**. Editora e Gráfica da UFPEL, Pelotas. 2001.

- PEREIRA, J.A.M.; Queiroz, D.M. **Principio de secado de granos – Psicometria, higroscopia**. Oficina Regional de la FAO para América Latina y Caribe. Santiago, Chile, 1991.
- PERRY, H.R. & CHILTON, C.H. **Manual de Engenharia Química**. 5ª. Edição. Editora Guanabara Dois S.A. RJ. 1986.
- POTHERY, B. **ISO 9000**. Makron Books do Brasil Editora Ltda. São Paulo, 1993.
- PRASAD, B.V.; CHANDRA, P.K.; BAL, S. **Drying Parboiled Rough Rice in stationary, semi-fluidized and fluidized conditions**. ASAE (37-2) 589-594 – 1994.
- RAMOS, M. **Rendimento industrial de variedades de arroz no beneficiamento direto após a maceração**. In: REUNIÃO DA CULTURA DO ARROZ IRRIGADO, 08, Porto Alegre, 1978. Anais... Porto Alegre, IRGA, 1978, p. 260-6, 1984.
- ROMBALDI, C.V. **Condições de secagem e tempo de armazenamento na qualidade industrial do arroz (*Oryza sativa* L.)**. Pelotas 1988. 124 p Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia Agroindustrial). Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, UFPel, 1988.
- ROSA, O. S. **Temperaturas recomendadas para a secagem de sementes de trigo e arroz utilizando o método intermitente**. In: V Seminário Pan-americano de Sementes. Maracay, Venezuela. 1966.
- RHODES, M.. **Fluidization of particles by fluids**. Educational Resources for Particles Technology, ERPT .2001.
- SANTOS, G.L. **Manejo térmico no tempo de secagem, na eficiência energética e nas características industriais e de consumo do arroz**. Pelotas, Universidade Federal de Pelotas, Editora da UFPel, 2004 (dissertação de mestrado).
- SAXENA, S.C. **Hydrodynamic and heat transfer studies in fluidized beds of large particles at ambient and high pressures**. University of Illinois at Chicago. Department of Chemical Engineering
- SHARMA, A.D. & KUNZE, O.R. **Post drying fissure developments in rough rice**. Transactions of the ASAE, 21(2), 465-474. 1982,
- SIEMBENMORGEN, T.J. **Relating moisture transfer rate in rice to kernel quality**. 8th International Drying Symposium IDS'92, Part A, Montreal, pp.58-73. 1992.
- SOPONRONNALT, S. **Fluidised-bed paddy drying**. ScienceAsia, 25 (51-56). 1999.
- SUBRAMANIAN, M. Department of Chemical engineering, Sri Venkateswara College of Engineering, Sriperumbudur, India.
- STREETER, V.L. **Mecânica dos Fluidos**. McGraw-Hill do Brasil. São Paulo 1977.
- SYAHRUL, S.; DINCER, I.; HAMDULLAHPUR, F. **Thermodynamic modeling of fluidized bed drying of moist particles**. International Journal of Thermal Sciences. (42) 2003 :(691-701).

SYAHRUL, S.; DINCER, I.; HAMDULLAHPUR, F. **Thermal analysis in fluidized bed drying of moist particles**. Applied Thermal Engineering, (22) 2002 : (1763-1775).

TANNOUS, K.; HEMATI, M.; LAGUERIE, C. **Caracteristiques au minimum de fluidization et expansion des couches fluidisees de particules de la categorie D de Geldart**. Powder technology 80 (1994) : 55-72.

TAECHAPAIROJ, C. et al. **Superheated steam fluidized bed paddy drying**. Journal of food engineering, vol.58, p.67-73, 2002.

TEMPLE, S.J. & BOXTEL, A.J.B. **Modelling a fluidized-bed drying of black tea**. J.agric.Eng.Res. 1999.

THOBER, C.W.A.; CHAZAN, D.T.; RECH, R.L.; MENDES, T.F. **Curso sobre Leito Fluidizado e suas aplicações Industriais**. IGAPRO. Porto Alegre RS.

THOMPSON, J.F. **Principles of Rice Dryng** <http://agronomy.ucdavis.edu/uccerice/main.htm> . UCDavis. 1998.

USTRA, L.A.R.; ELIAS, C.M.; **Propriedades físicas de duas variedades de arroz em casca**. Congresso de Iniciação científica UFPEL. 2003.

USTRA, L.A.R.; ELIAS, M.C.; ZANATA, F.; MENEGHETTI, V.; FREDDO, E.; CORADI, P. **A fluidização do arroz em casca a baixas temperaturas**. Congresso de Iniciação Científica. UFPEL, 2003.

WANG, H.Z. & CHEN, G. **Heat and mass transfer in batch fluidized bed drying of porous particles**. Chemical Engineering Science 55 (2000) : (1857-1869).

WRATTEN et al. **Physical and thermal properties of rough rice**. Transactions of the ASAE, 12(6) p 801-803, (1969). In: FONTANA, C. **Propriedades físicas e térmicas do arroz**. Cadernos Didáticos, vol. 5. Edições UFSM, 1986, Santa Maria.

WEN, C.I. & YU, Y.H. **A generalized method for predicting minimum fluidization velocity**, AIChE J. Vol.12, 1966. In: RHODES, M.. **Fluidization of particles by fluids**. Educational Resources for Particles Technology, ERPT, 2001.

WEBER, E.A. **Armazenagem Agrícola**. Kepler Weber Industrial. Porto Alegre, 1995.

WONG, A.C. **Use of angle of repose and bulk densities for powder characterization and prediction of minimum fluidization and minimum bubbling velocities**. Chemical Engineering Science 57 (2002): 2635-2640.

ZIJERVELD, R.C.; JOHNSON, F.; MARZOCCHELLA, A.; SCHOUTEN, J.C. **Fluidization regimes and transitions from fixed bed to diulect transport flow** . Powder technology 95 (1998): 185-204.

ANEXO A – Equações para determinação da velocidade de fluidização mínima.

$$\frac{1.75}{\varepsilon_{mf}^3 \cdot \phi} \cdot \text{Re}_{mf}^2 + \frac{150(1 - \varepsilon_{mf})}{\varepsilon_{mf}^3 \cdot \phi^2} \cdot \text{Re}_{mf} = Ar \quad (\text{equação 3})$$

$$\text{Re}_{mf} = \frac{d_g \cdot v_{mf} \cdot \rho_A}{\mu_A} \quad (\text{equação 4})$$

$$Ar = \frac{d_g^3 \cdot \rho_A (\rho_g - \rho_A) \cdot g}{\mu_A^2} \quad (\text{equação 5})$$

onde:

V_{mf} é a velocidade mínima de fluidização expressa em m s^{-1} ,

μ_A - viscosidade do fluido em $\text{kg m}^{-1}\text{s}^{-1}$,

g a aceleração da gravidade;

ρ_s e ρ_A são as densidades dos sólidos e fluidos em kg.m^{-3} .

ϕ representa a esfericidade ou fator de forma das partículas (adimensional).

Correlação de MacCabe (1985)

$$V_{mf} = [d_g \cdot \phi \cdot (\rho_g - \rho_A) \cdot \varepsilon_{mf}^3 \cdot (1,75 \cdot \rho_A)^{-1}]^{1/2} \quad (\text{equação 7})$$

Correlação de Tannous (1994)

$$\text{Re}_{mf} = (25,83^2 + 0,043Ar)^{0,5} - 25,83 \quad (\text{equação 8})$$

ANEXO B – Equação para determinação das eficiências energéticas da secagem.

$$\eta = m_g \cdot m_{AS}^{-1} \cdot [c_v \cdot \Delta X + C_p \Delta T_g] \cdot [\Delta i_{AS}]^{-1} \cdot \Delta t^{-1} \quad (\text{equação 8})$$

m_g e m_{AS} são as massas de grãos e ar seco respectivamente.

$\Delta X = X_1 - X_2$ é a variação de umidade (base seca).

c_v é o calor de vaporização da água,

C_p é o calor específico dos grãos,

$\Delta T_g = T_{g2} - T_{g1}$ é a variação de temperaturas dos grãos

e $\Delta i = i_{ASe} - i_{ASs}$ a variação de entalpia do ar de secagem na entrada e na saída do secador.

Obs. Os índices 1 e 2 e referem-se ao início e fim do ciclo de secagem.

APENDICE A – Curva de Calibração do determinador de umidade dielétrico DOLLE

