

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ALIMENTOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE ALIMENTOS

Pauzer

*Este exemplar corresponde a redação
final da tese defendida por Celso
Costa Lopes e aprovada pela Comissão
Julgadora em 14/04/89.
Campinas, 14 de abril de 1989.*

In K

Presidente da Banca

ESTUDO DO MECANISMO DE QUEBRA
EM GRÃOS DE ARROZ

Celso Costa Lopes
Engenheiro de Alimentos

10/89

Prof. Dr. Theo Guenter Kieckbusch
Orientador

"Tese apresentada à Faculdade de Engenharia de Alimentos
da Universidade Estadual de Campinas, para a obtenção
do título de MESTRE em Engenharia de Alimentos"

Para Rosa e Antonio, meus pais.

"O resultado de qualquer pesquisa científica seria só pode ser o surgimento de duas novas questões, aonde antes só havia uma."

Thorstein Veblen

AGRADECIMENTOS

Ao professor Theo Guenter Kieckbusch, pela sua atenta orientação e incansável sede de conhecimento.

Ao Departamento de Engenharia de Alimentos e à Faculdade de Engenharia de Alimentos, pelas facilidades oferecidas e pelo apoio institucional.

Aos colegas de trabalho, em particular aos professores Enrique Ortega Rodriguez, Geraldo Formaggio e Wilson Abel de Oliveira Sobrinho, pelas contribuições e sugestões.

Aos irmãos e amigos, pelo companheirismo, incentivo e compreensão.

A meu filho Daniel, pela sua sabedoria e paciência.

A todos aqueles cujos caminhos sobrepueram-se ao meu próprio caminho pois, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

Ao Departamento de Pré-processamento da Faculdade de Engenharia Agrícola, pelo empréstimo de equipamentos.

A KODAK Brasileira Comércio e Indústria Ltda., pelo fornecimento do material fotográfico.

A ABIA pela impressão deste trabalho.

CONTEUDO

1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1. Constituição do Grão de Arroz	4
2.2. O fenômeno da fissura e quebra no grão de arroz ..	5
2.3. Natureza das fissuras no grão de arroz	7
2.3.1. Efeito do gradiente interno de temperatura ..	8
2.3.2. Efeito do gradiente interno de umidade.....	10
2.4. Fissuras no pré-processamento do arroz.....	16
2.4.1. Colheita.....	17
2.4.2. Secagem	20
2.4.3. Beneficiamento	27
2.5. Cinética de adsorção e desorção de umidade.....	29
2.5.1. O modelo difusional	30
2.5.2. Modelos semi-teóricos	34
2.5.3. Equações empíricas	35
3. MATERIAIS E MÉTODOS	37
3.1. Preparo da Matéria prima	37
3.2. Equipamento para os ensaios.....	39
3.2.1 - camara de ensaios.....	43
3.2.2 - condicionador de ar	45
3.2.3 - indicador de temperaturas	47
3.3. Procedimentos utilizados	47
3.3.1 - ajuste dos controles	47
3.3.2 - cinética de adsorção e desorção	49
3.3.3 - avaliação das fissuras no grão	51
3.3.4 - conteudo de umidade	53
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	54
4.1. Cinética de adsorção e desorção	54
4.2. Isotermas de sorção	91
4.3. Fissuras	115
4.3.1 - caracterização do processo de fissuramento ..	116
4.3.2 - resultados qualitativos	116
4.3.3 - resultados quantitativos	117
4.3.4 - influência do processo: adsorção e desorção ..	122
4.3.5 - influência da variação do conteúdo de umidade	126
4.3.6 - visão geral do processo de fissuramento	128
4.3.7 - uma análise final	131
5. CONCLUSÕES	136
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	138
7. APÊNDICE	146

R E S U M O

Analisou-se a formação de fissuras em grãos brunidos de arroz (variedades IAC-25 e IAC-165) utilizando-se de uma câmara de ensaios especialmente construída. Amostras eram submetidas a ambiente com 30, 40, 50, 70, 80 e 90% de umidade relativa a 30°C, sendo a extensão do fissuramento avaliada por métodos óticos.

Correlacionou-se a taxa de fissuramento e a porcentagem final de grãos inteiros com a variação do conteúdo de umidade do grão e com o tipo de processo (adsorção ou desorção). A taxa inicial de variação de umidade no grão demonstrou ser o principal parâmetro de controle do grau de fissuramento.

O processo de fissuramento praticamente se interrompe antes de completada 1 hora de exposição, dependendo do nível de umidade relativa ambiental.

A cinética de sorção de umidade do arroz brunido é comparada com a do arroz integral e em casca, assim como as respectivas isotermas de sorção.

A B S T R A C T

The onset of fissures in white rice (IAC-25, IAC-165 varieties) was analyzed using a specially designed test chamber. Samples were submitted to ambients at 30, 40, 50, 70, 80 and 90% relative humidity, at 30°C, and the degree of fissuring was evaluated by optical methods.

The rate of fissuring and the final percentage of whole grains were correlated with respect to moisture variation and type of process (adsorption or desorption). The initial rate of moisture migration was confirmed as the prominent parameter controlling the fissuring process.

Fissuring ceases before 1 hour of exposure, depending on the magnitude of the ambiente humidity variation.

Sorption kinetics and isotherms of white rice was compared with results for brown rice and rough rice.

NOMENCLATURA

- a_w - Atividade de água, decimal
- D_{ap} - Difusividade aparente, m^2/h
- r - Raio característico da esfera, m
- R - Constante universal dos gases
- t - Tempo, h
- X - Umidade do grão, decimal base seca
- X_s - Umidade superficial, decimal base seca
- X_o - Umidade inicial do grão, decimal base seca
- X_e - Umidade de equilíbrio, decimal base seca
- X^* - Adimensional de umidade = $(X - X_e) / (X_o - X_e)$
- ΔX - Diferença do conteúdo de umidade = $X_e - X_o$
- SQR - Soma dos quadrados dos resíduos

1. INTRODUÇÃO

O arroz é um dos cereais de maior destaque no mundo inteiro formando, juntamente com o trigo e o milho, a base da alimentação mundial. A produção nacional é significativamente alta, como pode ser observado na Tabela 1.1. No Brasil este cereal faz parte, junto com o feijão, do cardápio mais comum do brasileiro.

Destinada primordialmente ao consumo interno, a produção brasileira de arroz equipara-se a de outros produtos agrícolas (Tabela 1.1) . Se levarmos em conta que a soja e o milho são destinados também para ração animal além de representarem produtos típicos de exportação, enfatiza-se a importância do arroz no mercado alimentício interno.

TABELA 1.1 - Produção brasileira dos principais produtos agrícolas (em mil toneladas)

milho	20 541 227
soja	13 334 691
arroz	10 404 676
feijão	2 219 478

Fonte: IBGE - Anuário Estatístico do Brasil 1986

Até ser consumido, o arroz normalmente passa por uma série de etapas e tratamentos: a colheita, a secagem, o armazenamento e o beneficiamento.

Dependendo das condições de operação reinantes nessas etapas, o arroz pode quebrar-se trazendo prejuízos para o produtor e/ou beneficiador, uma vez que o preço do arroz partido é inferior ao do grão inteiro.

Após estas etapas, o arroz apresenta-se ao consumidor como "arroz branco" ou como "arroz integral". Independentemente da forma de arroz que consome, o brasileiro exige grãos inteiros, sendo portanto a existencia de grãos quebrados um fator de depreciação.

Desta forma é interesse de todos os segmentos - produtores, consumidores e beneficiadores - que se busque a diminuição do número de grãos quebrados.

Um parametro utilizado como indicador de qualidade é o Rendimento de Grãos Inteiros (RGI) definido como:

$$\text{RGI} = \frac{\text{Peso de grãos inteiros após o beneficiamento}}{\text{Peso dos grãos antes do beneficiamento}}$$

Segundo informações de beneficiadores da região de Campinas, os rendimentos aqui encontrados são de 50 até quase 100%. Esta grande variação é por eles atribuída a uma série de

fatores, às vezes conflitantes entre si, havendo forte tendência para culpar um descontrole na temperatura de secagem.

Altos rendimentos são desejáveis e os motivos da quebra do grãos de arroz devem ser encontrados e seus efeitos minimizados ou eliminados.

O objetivo geral do presente trabalho é o de fornecer subsídios para uma melhor compreensão dos mecanismos de quebra do grão de arroz. Pretendeu-se, aqui, avaliar os efeitos dos processos de transferência de umidade no grão de arroz, seja por adsorção ou por desorção, relacionando-os com a ocorrência de quebras. O objetivo específico foi o de desenvolver um equipamento simples que permitisse detectar as condições ambientais críticas para o fissuramento do grão.

2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 - CONSTITUIÇÃO DO GRÃO DE ARROZ

O grão de arroz, Figura 2.1, constitui-se das seguintes partes: casca, germe, pericarpo, tegumento, aleurona e endosperma.

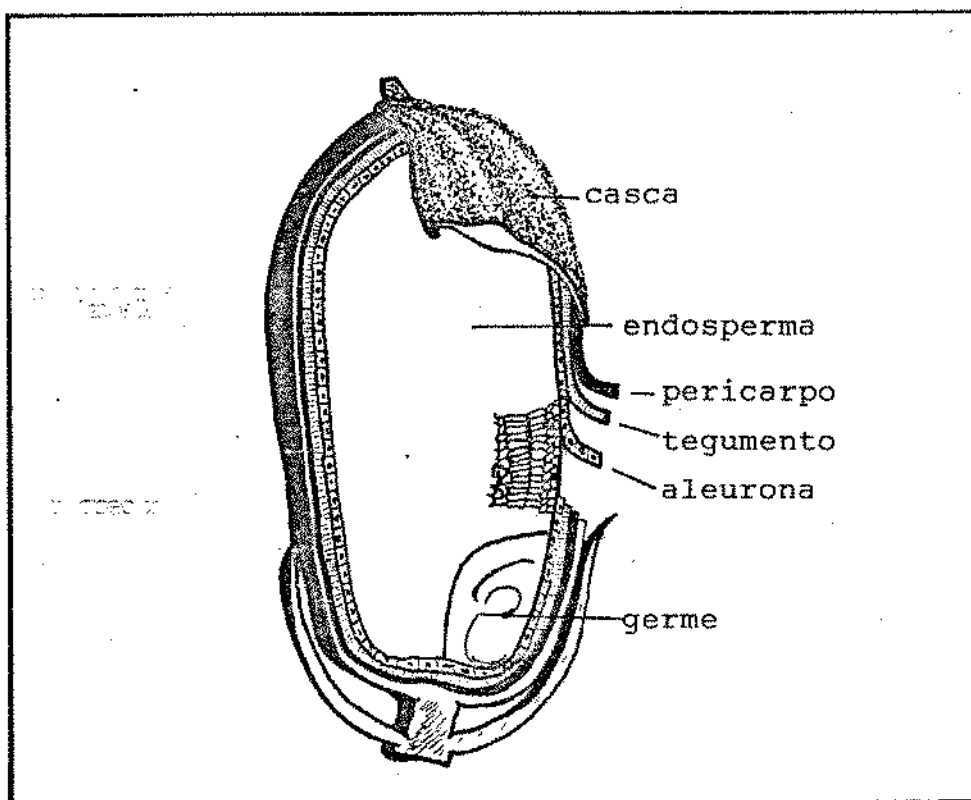


FIGURA 2.1 - Partes constituintes do grão de arroz
(Juliano, 1972)

A casca é a proteção exterior da semente, constituindo-se basicamente de celulose, lignina e cinzas.

possuindo pequena porcentagem de proteína e matéria graxa e praticamente nenhum amido. Na casca encontra-se também o composto cutina, o qual é repelente de água. O germe ou embrião apresenta alto conteúdo de proteína e matéria graxa. O pericarpo constitui-se basicamente de proteína, hemicelulose e celulose, da mesma forma que o tegumento e a camada de aleurona. Juntos com o germe, estes tres segmentos do grão de arroz constituem-se no "farelo", ou seja, a parcela retirada e descartada quando se deseja obter o "arroz brunido" (branco). O endosperma é a camada mais interna do grão e constitui-se basicamente (cerca de 90%) de amido (Juliano, 1972).

Estas diferenças entre as partes constituintes do grão de arroz são importantes sob o ponto de vista do presente trabalho, uma vez que os processos de fissura e quebra do grão estão relacionados com as características de cada uma destas partes.

2.2 - O FENÔMENO DA FISSURA E QUEBRA NO GRÃO DE ARROZ

É preciso, de início, que se defina o significado dos termos fissura e quebra usados no presente trabalho.

Chamamos de quebra o efeito decorrente da aplicação de uma força mecânica externa ao grão que ocasiona sua divisão em pequenos pedaços. A quebra é perceptível ao se retirar a casca do grão de arroz

Chamamos de fissura, as pequenas trincas decorrentes de uma ação mecânica interna ao grão, originada por condições externas não mecânicas e que não ocasionam a separação do grão. As fissuras são permanentes, a não ser que o grão de arroz seja submetido a um processo de gelatinização (como por exemplo no caso da parbolização). Em condições usuais de processamento, os grãos fissurados quebram durante o descasque, dependendo da quantidade e tamanho das fissuras existentes.

A resistência do grão de arroz à quebra está relacionada com suas características físico-químicas. Bhashyam e col. (1984) observaram que o arroz mais resistente à quebra é o que apresenta as mais altas temperaturas de gelatinização bem como as mais altas viscosidades de pico. Os autores observaram também que as variedades mais resistentes à quebra são também mais resistentes à hidrólise alcalina, embora tenham observado certa heterogeneidade quanto aos grãos individuais dentro de uma mesma variedade.

A fissura ou a quebra do grão de arroz também dependem, é claro, das condições ambientais e de processo às quais o grão é submetido. No caso do presente trabalho é este o aspecto relevante, estando implícito nas análises subsequentes que cada variedade de arroz responderá de forma distinta às condições do meio externo, de acordo com suas características morfológicas e físico-químicas.

A quebra do grão de arroz pode ser causada por dois motivos:

- a) uma diminuição da resistência mecânica do grão, ocasionada por alterações físico-químicas ou então pela existência de tensões internas que favoreçam a separação das partes;
- b) a existência de fissuras no interior do grão ocasionadas pelas condições ambientais.

2.3 - NATUREZA DAS FISSURAS NO GRÃO DE ARROZ

Dos motivos citados anteriormente para a quebra do grão, ou seja, a diminuição da resistência mecânica do grão e o surgimento de fissuras em seu interior, é este último o mais importante, sob o qual atentam praticamente todas as pesquisas realizadas até o momento.

A fissura surge quando tensões internas ao grão de arroz ultrapassam a tensão de ruptura do material biológico. Tais tensões internas são ocasionadas por forças de tração e/ou de compressão as quais, por sua vez, originam-se de um gradiente interno de umidade e/ou de um gradiente interno de temperatura. A aplicação de uma pequena força externa ao grão também pode causar a fissura do mesmo, uma vez que interage com as forças internas existentes.

As fissuras apresentam-se no grão de arroz de várias formas (longitudinais, radiais, superficiais, profundas) dependendo da variedade do arroz e do processo ao qual se submeteu o grão.

2.3.1 - Efeito do gradiente interno de temperatura -

Um gradiente de temperatura interno ao grão de arroz pode causar a fissura do mesmo, dentro de certos limites observados por alguns pesquisadores. Este gradiente é ocasionado quando se submete o grão a ambientes com uma temperatura diferente da sua. O valor deste gradiente dependerá da diferença de temperatura entre o grão e o ambiente e será responsável pela dilatação ou contração térmica no grão, fenômenos que podem causar tensões internas e, conseqüentemente, fissuras.

Henderson (1958), trabalhando com arroz em casca, mostrou que um aumento da temperatura de secagem e, conseqüentemente, o aumento do gradiente interno de temperatura, causava o acréscimo de grãos fissurados. O autor não levou em consideração o gradiente interno de umidade. Neste experimento o autor utilizou grãos com 22% de umidade (base úmida) e temperaturas do ar que variaram de 21°C a 99°C. A avaliação das fissuras foi realizada através de radiografias. O conteúdo final de umidade foi de 13,5% aproximadamente.

Em um trabalho mais cuidadoso, Kunze e Hall (1967) mantiveram constante a umidade do grão de arroz integral e o submeteram a diversas temperaturas, obtendo assim um gradiente interno de umidade nulo com diversos valores para o gradiente interno de temperatura. Os autores observaram que, para fissurar o grão, é preciso uma diferença de 34 °C entre a

temperatura do ar e a temperatura inicial do grão.

Arora e col. (1973) obtiveram experimentalmente algumas propriedades termo-físicas do grão de arroz brunido: coeficiente de expansão térmica, módulo de elasticidade e tensão de ruptura (tração). A partir dos valores encontrados, estimaram em 43 C a diferença mínima de temperatura entre o ar ambiente e o grão de arroz para que o mesmo fissurasse.

Estes resultados não foram confirmados por Chen e Kunze (1979), trabalhando com grãos integrais. Eles observaram que os mesmos não fissuraram quando expostos a uma corrente de ar com temperatura de 18 C a 41 C maior que o grão, desde que os mesmos não sofressem uma significativa variação de umidade. Encontraram também uma pequena indicação de que, se o grão for submetido a uma variação de temperatura maior que 96 C, poderão ocorrer fissuras. Para este experimento os autores utilizaram grãos a 25 C com conteúdos de umidade de 4,86%, 10,53% e 14,87% (bu).

Das observações dos autores precedentes, pode-se deduzir que o gradiente interno de temperatura não deve ter efeito reelevante na ocorrência de fissuras no grão de arroz, salvo quando ocasionado por altas diferenças de temperatura entre o ar e o grão. No processamento do arroz, altas diferenças de temperatura somente são observadas na etapa inicial de secagem e, mesmo assim, são menores que os valores observados nestas pesquisas descritas. Outras causas, portanto, devem ser encontradas para o processo de fissuramento.

2.3.2 - Efeito do gradiente interno de umidade -

Um sólido higroscópico, como é o caso do grão de arroz, quando exposto a um ambiente cuja pressão de vapor de água é maior ou menor que a pressão de vapor da água no seu interior sofre, respectivamente, um processo de adsorção ou desorção de água. Estes processos tendem a gerar, no interior do sólido, um gradiente de umidade. Este gradiente tende a desaparecer com o tempo à medida em que todo o sólido atinge uma condição de equilíbrio, na qual permanece a não ser que as condições externas sejam novamente alteradas.

O valor do gradiente interno de umidade depende sobretudo da diferença entre as pressões de vapor de água interna e externa. A primeira está relacionada com o conteúdo inicial de umidade no sólido e a segunda com as propriedades termodinâmicas do ar úmido.

Por outro lado, o gradiente interno de umidade também é influenciado pela facilidade com que o grão perde ou ganha água, ou seja, pela taxa de adsorção ou desorção de umidade. Esta taxa é função das características do grão (morfológicas e termo-físicas) e das propriedades (psicrométricas e de escoamento) do ar.

Assim sendo, no estudo do efeito do gradiente interno de umidade no processo de fissura do grão de arroz deve-se controlar não só as propriedades do ar mas também os fatores que afetam a cinética de adsorção e desorção de umidade.

Infelizmente as pesquisas realizadas sobre este assunto preocuparam-se quase que exclusivamente com a relação entre fissuras e propriedades do ar. Um estudo que incluísse a cinética de transferência de umidade traria subsídios para a melhor compreensão do fenômeno.

Kunze e Hall (1965) foram os primeiros pesquisadores a avaliar a relação entre a variação da umidade relativa ambiente com o tipo e a quantidade de fissuras que se desenvolveram no grão de arroz quando o mesmo foi submetido a um processo de desorção. Os autores submeteram grãos de arroz integral a ambientes com diferentes valores de umidade relativa, observando o surgimento de fissuras com o tempo. Encontraram, para grãos com 14% de umidade (base seca) ou menos, que o tempo de resposta no qual a fissura ocorre tem uma distribuição normal. Encontraram também diferentes padrões de fissuras em função da temperatura do ar, da variação da umidade relativa e em função da umidade inicial do grão.

A hipótese levantada por estes autores é de que as células externas do grão de arroz, ao adsorverem umidade, expandem-se produzindo tensões de compressão nas camadas superficiais do grão, o qual atua como um corpo livre. Tensões opostas (tração) tendem a surgir no interior do grão e, à medida em que aumenta a tensão de compressão nas células externas, há um aumento das tensões (tração) ao longo do eixo longitudinal. Quando é excedida a tensão de ruptura, surgem as fissuras perpendiculares ao eixo longitudinal, as quais aliviam as tensões internas. Os autores observaram que quando ocorreram até duas fissuras no grão, não houve dano posterior (separação

das partes). No entanto, quando os grãos de arroz foram sujeitos a uma grande variação de umidade relativa, surgiram cinco ou mais fissuras que separaram-no em partes aproximadamente iguais.

Em trabalho subsequente, Kunze e Hall (1967) avaliaram o efeito da taxa de adsorção de umidade na ocorrência de fissuras no grão integral de arroz, observando que grãos com maior conteúdo de umidade absorvem água mais rapidamente, fissurando mais rapidamente que os grãos com menor umidade, quando expostos a um igual aumento de pressão de vapor e à mesma temperatura.

Outro efeito notado por estes autores foi de que os grãos com conteúdo inicial de umidade de 9% (bs) ou menos fissuraram mais rapidamente quanto maior a mudança na pressão parcial de vapor. Os grãos com conteúdo inicial de 13% ou mais fissuraram com um menor aumento da pressão parcial de vapor do que os grãos mais secos.

Stermer (1968), trabalhando com arroz brunido, encontrou uma relação entre a quebra do grão e a variação das condições do ar, expressas em termos da umidade de equilíbrio, na forma de uma função válida para o período inicial do processo de adsorção ou desorção:

$$Y = 0,950 + 0,0564 (\Delta EMC - 2,0)^4 \dots\dots\dots [2.11]$$

onde Y é a taxa de quebra (% grãos fissurados por minuto) e ΔEMC é a variação do conteúdo de umidade de equilíbrio (% base

úmida) que o grão de arroz sofre devido às mudanças na temperatura e na umidade relativa do ar.

Este parece ter sido o primeiro pesquisador a utilizar a variação do conteúdo de umidade de equilíbrio como potencial para o fenômeno de fissuras e quebras do grão de arroz, em lugar das diferenças de umidade relativa, temperatura, pressão de vapor ou umidade interna. Resultados apresentados em 1966 por este autor serviram de base para as análises de Kunze e Hall (1967), já comentadas.

Stermer observou também que:

- a) grãos com alta umidade inicial foram mais susceptíveis à quebra;
- b) grãos sujeitos a pequena variação de umidade relativa sofrem sérios danos quando a temperatura da nova atmosfera é superior a 80°C;
- c) as fissuras no grão de arroz mostraram-se com diferentes padrões, dependendo do fenômeno, se o grão sofreu adsorção ou desorção de umidade.

Kunze e Choudhury (1972), trabalhando com arroz brunido e arroz integral, realizaram experimentos para avaliar a tensão (tração) de ruptura de grãos individuais sob certas condições de umidade. Avaliaram também essa tensão a certos intervalos de tempo após o grão ter sido submetido a ambiente que propiciasse a adsorção de umidade.

Estes autores observaram que as fissuras no grão de arroz surgiram certo tempo após ter-se iniciado o processo de

adsorção de umidade. Ao intervalo de tempo entre o início do processo de adsorção e o aparecimento da primeira fissura foi dado o nome de "tempo de retardo" (retardation time).

Quando da determinação da tensão de ruptura do grão de arroz, Kunze e Choudhury (1972) observaram que a mesma apresentou um aumento no seu valor ao longo do período de armazenagem, fato que foi explicado pela acomodação das tensões residuais existentes. Os autores descartaram a possibilidade de mudanças químicas ou biológicas devido ao curto período de tempo de armazenagem (3 meses).

Estas tensões residuais são desenvolvidas quando os grãos maturam no campo, ou quando são secos ou quando são sujeitos a variações ambientais. Elas se originam pelo gradiente interno de umidade que se desenvolve durante os processos de desorção. Nestes casos, as células externas tendem a se contrair, ocasionando tração na superfície e compressão no centro do grão.

No caso de um processo de adsorção de umidade, os autores observaram uma diminuição da tensão (tração) de ruptura à medida em que o grão de arroz ia ganhando umidade. Obtiveram, como melhor ajuste, funções quadráticas que relacionam a tensão (tração) de ruptura com o tempo de umidificação. A hipótese dos autores para este caso é de que as células externas, ao ganhar umidade, desenvolvem tensões de compressão na superfície e trações no interior do grão. Surge então um gradiente interno de tensão devido ao gradiente interno de umidade e, ao se aplicar o teste de tração antes da fissura do grão, o gradiente

de tensão devido à umidade interage com o gradiente de tensão aplicado, desenvolvendo um gradiente resultante de tensão. A fissura ocorre quando o gradiente resultante ultrapassa, em qualquer ponto no interior do grão, o gradiente de tração de ruptura. Quando não existe força externa aplicada, a fissura surge quando o gradiente de tensão devido ao gradiente interno de umidade ultrapassa o gradiente de tensão de ruptura.

Em uma revisão sobre o assunto, Kunze (1977) avaliou o processo de secagem do arroz e observou que, embora as fissuras possam ser causadas pela desorção de umidade, a readsorção tem um efeito significativo e deve ser minimizada no processamento do arroz. O autor avaliou a readsorção de umidade durante e após a secagem. No primeiro caso, a readsorção ocorre nas camadas superiores dos secadores que recebem, no início da secagem, ar mais úmido proveniente da parte inferior do secador. Em outro aspecto, a velocidade de adsorção de umidade teve efeito significativo na fissura do grão de arroz, sendo maior a incidência de fissuras quanto mais alta a velocidade.

Chattopadhyay, Hammerle e Hamann (1979), utilizando uma máquina de ensaios Instron, avaliaram o efeito da temperatura do ar e do conteúdo de umidade na tensão (compressão) de ruptura do grão de arroz. Submetendo os grãos a ensaios de compressão, foi notado que o aumento do conteúdo de umidade diminuiu a tensão (compressão) de ruptura nas temperaturas utilizadas (25°C a 69°C). O aumento da temperatura provocou também a diminuição da tensão de ruptura, independentemente do conteúdo de umidade do grão.

2.4 - FISSURAS E QUEBRAS NO PRÉ-PROCESSAMENTO DO ARROZ

Para ser consumido, o arroz em casca passa pelas seguintes etapas de pré-processamento:

colheita -> secagem -> armazenamento -> beneficiamento

As condições ambientes e de processo às quais o cereal está sujeito nestas etapas (bem como a variedade do arroz) influenciam a qualidade do produto final, a qual é analisada sob os seguintes aspectos:

- * rendimento total
- * rendimento de grãos inteiros
- * características de cozimento
 - quantidade de água absorvida
 - quantidade de sólidos liberados na água
 - coesividade do produto cozido
 - tempo necessário para cozimento
 - aroma, cor e sabor

Dentro dos objetivos do presente trabalho, preocupamo-nos em considerar apenas o aspecto qualitativo relacionado ao rendimento de grãos inteiros, como definido anteriormente no Capítulo 1.

Este rendimento é analisado após a etapa do beneficiamento e depende da formação de fissuras e quebras em todas as etapas do pré-processamento. Analisaremos, a seguir, o fenômeno de fissura e quebra do grão de arroz em cada uma destas etapas.

2.4.1 - Colheita

As práticas recomendadas para a colheita do arroz objetivam:

- assegurar a maturação da semente;
- evitar a perda de sementes por fatores climáticos;
- propiciar a secagem da semente ainda na planta;
- minimizar a ocorrência de fissuras.

Em função destes objetivos, as técnicas recomendadas para a colheita do arroz levam em consideração:

- a unidade da semente;
- a época da colheita;
- a incidência de chuva e insolação.

A prática usual consiste em colher o arroz quando este completa sua maturação, ou seja, quando as panículas apresentam a maioria dos grãos completamente amadurecidos e apenas algumas sementes, na base, ainda levemente imaturas.

A planta, colhida antes da maturação, tem excessivo teor de água e contém ainda muitas espiguetas vazias e grãos que não alcançaram o desenvolvimento completo, mais leves e gessados. Isto acarreta o decréscimo do rendimento do arrozal, do rendimento total e do rendimento de grãos inteiros. Deixado no campo até que os grãos sofram redução de umidade, o arroz torna-se mais susceptível à quebra durante o beneficiamento (Brandão, Galvão e Oliveira, 1970).

A umidade do grão de arroz na maturação, no entanto, nem sempre corresponde àquela que propicia o maior rendimento de grãos inteiros, uma vez que as condições climáticas na época de maturação terão efeito marcante no teor de umidade dos grãos.

Pesquisas realizadas com o intuito de estabelecer o teor de umidade ideal para se obter maior rendimento total e de grãos inteiros mostraram resultados distintos. Brandão, Galvão e Oliveira (1970) indicaram que, para a variedade "Pratão Precoce" plantada na área de Viçosa (MG), o teor de umidade na colheita em que se obteve o maior rendimento total foi de 24% (bu). Para que se obtivesse os maiores rendimentos de grãos inteiros, o corte foi realizado com os grãos apresentando de 20% a 25% de umidade.

Estes valores, no entanto, não podem ser generalizados pois são apenas indicativos para uma dada variedade e uma dada condição climática. Godoy (1963) confirmou claramente esta afirmação ao observar que o rendimento de grãos inteiros dependeu das condições meteorológicas locais durante a maturação. Analisando o rendimento de grãos inteiros em 6 variedades de arroz, este autor observou que os menores rendimentos foram obtidos com os grãos sujeitos a uma rápida e brusca umidificação (chuvas) seguida de grande perda de umidade (insolação).

Portanto, já ao nível da colheita, o arroz pode quebrar-se ou tornar-se mais susceptível à quebra durante o beneficiamento.

Mesmo após a colheita, continua existindo a possibilidade de ocorrência de fissuras uma vez que se encontram juntos, no mesmo lote colhido, grãos mais secos e grãos mais úmidos. Assim, a transferência de umidade entre os grãos causa a readsorção de umidade, podendo ocorrer a fissura dos grãos. Este fenômeno foi observado por Kunze e Prasad (1978) ao simularem as etapas pós-colheita, misturando grãos secos com grãos úmidos.

2.4.2 - Secagem

Após a colheita as panículas devem sofrer secagem até atingir um conteúdo de umidade de cerca de 13% (bu), evitando assim a deterioração química, bioquímica e microbiológica, bem como o ataque de insetos.

O arroz é seco ainda na casca uma vez que o grão descascado é mais susceptível à quebra e é de conservação mais difícil, pois a casca é uma proteção importante durante todo o pré-processamento. Além disto, o beneficiamento do grão úmido causa problemas nos engenhos devido à dificuldade de separação da casca e do farelo.

A secagem do arroz pode se dar em terreiros, sob a ação do sol ou não (secagem natural), ou em secadores com circulação de ar aquecido ou não (secagem artificial). Ambos tipos de secagem possuem métodos e técnicas próprios, cujo intuito é o de garantir a umidade desejada com o mínimo custo e

o máximo rendimento de grãos inteiros.

Na secagem é desejável minimizar qualquer tipo de tensão que possa provocar a quebra do grão. Devido ao fato de que as camadas externas secam mais rapidamente que as internas, tensões internas podem surgir quando o grão está sendo seco. Estas tensões podem tornar-se grandes o suficiente para provocarem a fissura do grão de arroz, que pode ocorrer quando a umidade é removida muito rapidamente.

Uma vez que os grãos fissurados normalmente quebram quando o arroz é beneficiado (Wasserman e Calderwood, 1972), é desejável minimizar as fissuras durante a secagem, bem como propiciar condições pós-secagem para que as mesmas não se desenvolvam.

O primeiro trabalho de que se tem notícia, relacionando o processo de secagem do arroz com o rendimento de grãos inteiros, é relatado por Rhind (1962) e foi realizado por pesquisadores japoneses em 1930. Nesta pesquisa, grãos de duas variedades de arroz foram submetidos à secagem natural imediatamente após a colheita e então expostos à chuva por 2 horas, sendo descascados e examinados antes e depois da exposição. Na Tabela 2.1 vemos o efeito significativo da reumidificação do grão de arroz no rendimento de grãos inteiros.

Estes mesmos autores observaram que a porcentagem de grãos quebrados foi diretamente proporcional ao tempo de exposição à chuva, variando de 12.5% a 62.0% para um tempo de 1/2 a 8 horas.

Por outro lado, a porcentagem de grãos quebrados aumentou gradativamente mesmo após o arroz ter sido removido da chuva, o que demonstra um efeito progressivo do fenômeno.

TABELA 2.1 - Influência da reumidificação por chuva na quebra do grão de arroz (de Kondo e Okamura, 1930)

Variedade	Tempo de secagem (h)	% de grãos quebrados	
		antes da chuva	depois da chuva
Kibiho	1	0.0	34.3
	3	0.0	42.0
Asahishinriki	1	1.7	11.3
	3	1.7	21.0

Nesta mesma linha de raciocínio, é citada por Rhind (1962), a pesquisa realizada por Grant em 1935, na Birmânia. Submetendo uma variedade de arroz a três métodos de secagem, este pesquisador observou a influência da secagem natural realizada a) ao sol, b) à sombra e c) ao sol com exposição noturna ao orvalho. Estes resultados são mostrados na Tabela 2.2. Nota-se claramente o efeito da insolação (desorção) intensa e da reumidificação (adsorção) pelo orvalho na porcentagem de grãos quebrados.

Tabela 2.2 - Efeito de métodos de secagem na porcentagem de quebra de grãos de arroz (de Grant, 1935).

Período de secagem (dias)	ao sol e orvalho	ao sol	á sombra
2	72.0	17.3	4.4
4	88.7	28.5	4.0
6	96.2	32.0	3.7
8	96.4	50.3	3.9
10	99.3	60.6	4.0

O primeiro estudo mais abrangente e mais significativo sobre a influência das condições de secagem na quebra do grão de arroz foi realizado por Henderson (1958). Variando temperatura do ar, tempo e número de passes na secagem, este autor analisou radiograficamente as fissuras desenvolvidas nos grãos ainda na casca, obtendo as seguintes conclusões:

a) as fissuras que ocorrem no grão em casca durante a secagem não necessariamente irão causar a quebra do grão, ou seja, deve-se analisar fissuras e quebras de maneira distinta;

b) aumentando-se a temperatura de secagem a porcentagem de grãos quebrados aumenta;

c) o maior rendimento de grãos inteiros é obtido com secagem feita com ar não aquecido ou com um aumento do

número de passes de secagem;

d) o aumento da umidade relativa ambiente, mantendo-se a mesma temperatura do ar, causa o aumento da porcentagem de grãos quebrados.

Na realidade, Henderson foi o primeiro pesquisador a formular a explicação já apresentada para o aparecimento das fissuras em grão de arroz, baseada na expansão da porção externa do grão, fracionando a parte central mais inelástica.

O aumento da temperatura de secagem, além de propiciar o aumento de grãos quebrados, pode causar ainda diminuição na qualidade de cozimento do arroz (Hogan e Planck, 1958), embora não cause alterações significativas nas qualidades organolépticas como cor, coesividade e aroma (Batcher e col., 1958).

Outro estudo importante relacionando técnica e temperatura de secagem com o rendimento de grãos inteiros foi realizado por Mc Neal (1961). Variando a temperatura de secagem (49 , 57 e 66°C), número de passes (1 a 6), tipo de leito (fixo ou contínuo) e tipo de fluxo de ar (normal ou com inversão) este autor observou que, para secar de 20% a 13,5% de umidade (bu), o rendimento de grãos inteiros é aumentado com:

- a) o aumento do número de passes;
- b) a diminuição da temperatura de secagem;
- c) a utilização de leito contínuo;
- d) uma secagem sem inversão do fluxo de ar.

No entanto, há evidências de que nem sempre o aumento da temperatura de secagem acarreta a diminuição do rendimento de grãos inteiros. Ban (1971), trabalhando com temperaturas de secagem de 40 a 130°C e com altas taxas de secagem, observou a existência de uma "Faixa de Saturação de Quebras". Ou seja, existe uma dada temperatura de secagem (que no caso específico foi em torno de 80°C) que causa a quebra em 100% dos grãos, independentemente da umidade inicial do arroz. Realizando secagem de arroz com temperaturas maiores ou menores que essa "temperatura de quebra máxima", o autor observou uma diminuição da porcentagem de grãos quebrados.

Este autor trabalhou com três níveis de umidade inicial e observou que o arroz com maior umidade inicial apresenta a menor porcentagem de grãos quebrados quando submetido a temperaturas maiores que a temperatura de quebra máxima. Ao utilizar temperaturas menores que a temperatura de quebra máxima, foi o arroz inicialmente menos úmido que apresentou as menores porcentagens de grãos quebrados. Segundo o autor, este comportamento deve-se à gelatinização do amido que ocorre quando grãos úmidos são submetidos a altas temperaturas de secagem.

Kunze e Prasad (1978) concluíram que as fissuras ocorridas na etapa de secagem devem-se à readsorção de umidade que ocorre durante ou após a secagem. Durante a secagem esta readsorção ocorre nas camadas superiores do secador e, após a secagem, o grão de arroz aquecido teria maior facilidade de adsorver água do ambiente.

Após a secagem o arroz com casca deve sofrer um período de descanso com o objetivo de abaixar a temperatura do grão, bem como de uniformizar a umidade, tanto internamente ao grão quanto externamente na massa total. Muitas vezes este procedimento é utilizado entre passes de secagem, sendo chamado neste caso de "têmpera" (tempering).

Durante este período o grão de arroz ainda pode sofrer fissuras ou quebras, uma vez que o gradiente interno de umidade persiste por um tempo após cessado o processo de secagem. Além disto é possível ocorrer readsorção de umidade do ambiente.

Kunze (1979), analisando o comportamento do grão em casca após a secagem, observou que:

- a) nem todos os grãos fissuram após a secagem;
- b) as fissuras continuaram ocorrendo durante 48 horas após cessada a secagem;
- c) os grãos não fissuram imediatamente após a secagem, existindo um período de tempo para que surja a primeira fissura.

Nishiyama, Satoh e Shimizu (1979) sugeriram a seguinte expressão matemática para a ocorrência de quebras após a secagem:

$$\frac{C - C_e}{C_o - C_e} = e^{(-k.t)^n} \dots\dots\dots [2.2]$$

onde: C - porcentagem de grãos quebrados no tempo t

C_e - porcentagem de grãos quebrados no equilíbrio

Co- porcentagem de grãos quebrados logo após a secagem
K e m dependem das condições de secagem, ou seja,
temperatura e umidade relativa.

Sharma e Kunze (1982) avaliaram o surgimento de fissuras em grão de arroz até 144 horas após a secagem, mantendo o arroz em ambiente hermético. Observaram que poucos grãos fissuraram logo após a secagem e que até 48 horas após a secagem houve um aumento significativo na porcentagem de grãos fissurados. Os autores ainda testaram o modelo de Nishiyama, Satoh e Shimizu (1979) encontrando boa correlação com os valores experimentais.

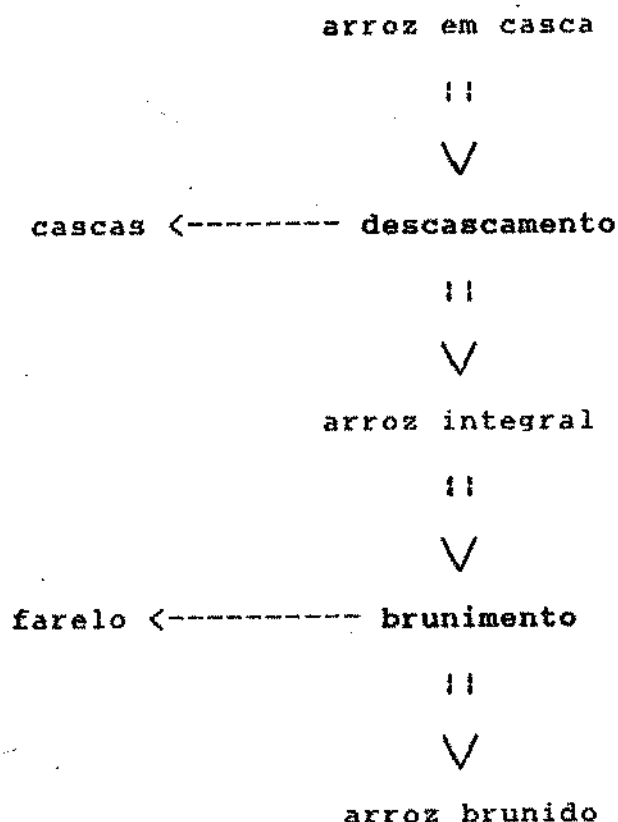
Nguyen e Kunze (1984) secaram 2 variedades de arroz de 20% a 12% de umidade (bu) a 25 , 40 , e 60°C. Os grãos foram então armazenados a duas temperaturas (10 e 45°C) e 3 ambientes (11%, 43% e 75% de umidade relativa). Avaliando o desenvolvimento de fissuras até 72 horas após a secagem, foi observado que:

a) para uma das variedades, independentemente da condição de secagem, a melhor condição de armazenamento foi a de 45°C e 11% de umidade relativa ;

b) para a outra variedade, a melhor condição de armazenamento dependeu das condições de secagem.

2.4.3 - Beneficiamento

Após a secagem, o arroz em casca é armazenado até o momento do beneficiamento, que é entendido aqui como o conjunto de tratamentos físicos que permite obter arroz integral ou arroz brunido. O beneficiamento consta das seguintes etapas:



Este beneficiamento é realizado em equipamentos ("máquinas" ou "engenhos") que executam as etapas acima descritas.

O descascamento é realizado pela passagem dos grãos entre dois cilindros de borracha que giram com diferentes velocidades e rotações opostas, podendo existir vários conjuntos de cilindros por máquina. A distancia entre os cilindros é

ajustável para cada lote de grãos, sendo a casca retirada por cisalhamento. O arroz assim obtido - exclusivamente sem a casca - é denominado "arroz integral" que pode ser consumido desta forma ou então sofrer tratamento posterior.

O arroz integral pode ainda ser submetido ao brunimento, obtendo-se "arroz brunido". O brunimento é realizado pela abrasão dos grãos com discos ou cilindros de material abrasivo, que desbastam a porção externa do grão integral, retirando o germe e a camada de aleurona. Assim, o grão brunido é constituído apenas do endosperma. A eficiência do brunimento é controlada pelo tempo de abrasão e pela pressão exercida pelo material abrasivo sobre o grão de arroz.

O arroz brunido pode ainda ser submetido ao polimento em cilindros polidores, podendo inclusive ser adicionada parafina para propiciar um aspecto brilhante e proteção contra o ambiente.

Apesar do beneficiamento ser responsável por grande parte da quebra ocorrida nos grãos de arroz, muitos grãos já estão quebrados ou pelo menos fissurados na casca quando chegam nesta etapa, devido às condições desfavoráveis de colheita, secagem e/ou armazenamento.

No beneficiamento, a maior porcentagem de quebras ocorre no primeiro descascador e durante os primeiros 15 segundos de operação (Smith e Mc Crea, 1951).

Autrey, Altschul e Hogan (1955) avaliaram, no rendimento de grãos inteiros, o efeito de tratamentos preliminares e o efeito das condições atmosféricas durante o beneficiamento do arroz. Para alguns grãos - notadamente aqueles que sofreram secagem e/ou armazenamento inadequados - foi interessante aspergir vapor de água ou misturar substâncias abrasivas (areia, sais de cálcio) antes do beneficiamento. Quanto às condições atmosféricas, o autor observou que o maior rendimento de grãos inteiros foi obtido em ambiente com uma temperatura de 29 C e umidade relativa de 70%.

2.5 - CINÉTICA DE ADSORÇÃO E DESORÇÃO DE UMIDADE NO ARROZ

A análise do fenômeno de fissura e quebra do grão de arroz indicou um efeito preponderante da intensidade dos processos de adsorção e desorção de umidade entre o grão e seu ambiente. Consequentemente, para um estudo completo, é necessário se considerar também estes processos de transferência de umidade, tanto em termos da velocidade com que ocorre esta transferência como em termos dos parâmetros que a influenciam.

O fluxo de umidade devido a um certo gradiente de umidade entre o sólido e o ar ambiente depende tanto da resistência interna que o sólido oferece quanto da resistência externa que o ar oferece. No presente trabalho estamos preocupados exclusivamente com a migração de umidade no interior do sólido. Assim sendo, analisaremos o processo de adsorção e desorção de umidade no interior do sólido, com base em alguns modelos.

2.5.1 - Transporte de umidade no interior do alimentos:

O modelo difusional -

A transferência de umidade no interior de alimentos, notadamente nos processos de secagem, é analisada utilizando-se modelos teóricos de transferência de massa em estado não estacionário. O modelo mais utilizado se baseia na teoria de difusão da umidade como líquido e/ou vapor, descrita pela segunda Lei de Fick (Sherwood, 1929):

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \nabla (D_{ap} \cdot \nabla X) \dots\dots\dots [2.3]$$

onde: X - umidade

t - tempo

D_{ap} - Difusividade aparente

∇ - operador gradiente

Crank (1967) apresentou várias soluções analíticas para a equação [2.3] em função das condições inicial e de contorno. Tais funções aplicam-se a sólidos com formas geométricas simples e regulares e também para difusividade constante ou dependente da concentração de água.

A solução da equação de difusão acima, para o caso de uma esfera homogênea e com D_{ap} constante é dada por:

$$X^* = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} e^{(-n^2 \cdot \pi^2 \cdot D_{ap} \cdot t / r^2)} \dots\dots [2.4]$$

onde:

r - raio da esfera

X^* - umidade adimensional = $(X - X_s)/(X_o - X_s)$ sendo X a umidade média na esfera a um dado tempo t , X_o é a umidade inicial e X_s a umidade superficial.

Para longos períodos de tempo, a equação [2.4] reduz-se apenas ao primeiro termo da série:

$$X^* = \frac{6}{\pi^2} e^{(-\pi^2 \cdot D_{ap} \cdot t / r^2)} \dots\dots\dots [2.5]$$

A umidade superficial X_s utilizada na determinação do adimensional de umidade X^* é um parâmetro difícil de ser determinado experimentalmente. Assume-se que a superfície do sólido mantém-se a um conteúdo constante de umidade, tão logo se inicie o processo de transferência de umidade. Este conteúdo de umidade foi chamado por McEwen e O'Callaghan (1955) de conteúdo de umidade de equilíbrio dinâmico.

Alguns autores (Hustrulid e Flikke, 1959; Hustrulid, 1962; Chittenden e Hustrulid, 1966) determinaram o valor de X_s simultaneamente com o valor da difusividade pelo ajuste da função 2.5 aos dados experimentais. No entanto é comum determinar-se o valor da umidade superficial a partir das isotermas de sorção.

Aguerre, Suárez e Viollaz (1984) trabalhando com arroz em casca, concluíram que a umidade de equilíbrio predita por isotermas de desorção nem sempre é o valor apropriado para estimar a umidade superficial do produto durante a secagem. Segundo estes autores, a umidade superficial X_s tendeu ao valor da umidade de monocamada prevista pela equação BET quando a secagem do arroz foi realizada a baixas umidade relativas do ar (entre 7% e 14% para temperaturas entre 40°C e 70°C). Baseados em dados experimentais, eles sugerem a utilização da seguinte equação para o cálculo da umidade superficial:

$$X^* = \frac{(X_i \cdot X_{i+2j}^2 - X_{i+j})}{(X_i \cdot X_{i+2j} - 2X_{i+j})} \dots\dots\dots [2.6]$$

onde m_i é o conteúdo médio de umidade do grão no tempo i , e j é o intervalo de tempo entre dois valores de umidade.

A difusividade aparente engloba todos os efeitos do transporte de massa e, embora não assumo o mesmo significado restrito quando do desenvolvimento do modelo difusional, é este o valor que pode ser determinado experimentalmente e que possui utilização prática. No caso do arroz, a difusividade varia com o inverso da temperatura absoluta, como observado por vários pesquisadores (Steffe e Singh, 1980; Aguerre, Suárez e Viollaz, 1982; Steffe e Singh, 1982).

Algumas soluções analíticas da equação [2.3] levam em conta a dependência da difusividade em relação à concentração de umidade. Existe no entanto, muita divergência quanto a

significância desta relação nos processos de secagem de alimentos. Esta questão torna-se mais complexa se levarmos em conta que existe um gradiente interno de concentração e, sendo assim, a difusividade assumiria valores distintos a cada posição interna ao sólido. Chu e Hustrulid (1968a, 1968b) apresentam solução numérica para o caso de difusividade dependente da concentração. Aguerre, Gabitto e Chirife (1985) apresentam também solução numérica da segunda lei de Fick para vários tipos de dependência da concentração.

Outro fator que deve ser levado em conta é a variação de volume que pode acompanhar os processos de desorção e adsorção de umidade. Neste caso a integração da equação [2.3] deve considerar esse efeito e uma integração numérica pode ser necessária (Misra e Young, 1980).

Steffe e Singh (1980), aplicando o método das diferenças finitas e considerando o arroz em casca como uma esfera heterogênea constituída por três camadas homogêneas concêntricas, encontraram os seguintes valores de difusividade (em m²/hora) em função da temperatura absoluta do ar (T_a):

$$\begin{array}{ll} \text{endosperma } D = 0,00257 \cdot e^{(-2,88 \cdot 10^3 / T_a)} \\ \text{farelo } D = 0,797 \cdot e^{(-5,11 \cdot 10^3 / T_a)} \\ \text{casca } D = 484 \cdot e^{(-7,38 \cdot 10^3 / T_a)} \end{array}$$

Estes valores foram obtidos em ensaios de secagem, com temperatura entre 35 e 55°C. Os autores assumiram a hipótese de difusão líquida, coeficiente de difusão independente da concentração e desprezaram a transferência de calor bem como a

alteração do volume durante a secagem.

Aguerre, Suárez e Viollaz (1982), embora não apresentando explicitamente o valor da difusividade do arroz integral, mostram um gráfico da relação deste parâmetro com o inverso da temperatura absoluta, do qual podemos inferir um valor entre 0,101 e 0,36 m²/h para a faixa de temperatura entre 40 e 60°C.

Steffe e Singh (1982), assumindo material homogêneo, encontraram através de secagem em monocamada os seguintes valores de difusividade (m²/h) em função da temperatura absoluta:

$$\text{arroz integral } D = 0,141.e^{(-4350/T_a)}$$

$$\text{arroz em casca } D = 33,6.e^{(-6420/T_a)}$$

2.5.2 - Modelos semi-teóricos para a transferência de umidade

Devido ao fato dos cereais não apresentarem forma geométrica simples e de terem dimensões difíceis de definir, e considerando que a forma da equação [2.5] também corresponde a uma solução simplificada da 2ª Lei de Fick para a placa plana e para cilindros longos, vários autores foram bem sucedidos ao utilizarem equações do tipo:

$$X^* = A . e^{(-k.t)} \dots\dots\dots [2.71]$$

para ajuste dos dados experimentais de secagem. Na equação [2.7], A e k são constantes experimentais.

Por comparação com a equação [2.5] conclui-se que a constante A deveria estar associada com a geometria do grão, e k com a difusividade e as dimensões. A constante k depende do material, da temperatura e de outras condições específicas ao processo em particular. Seu valor deve ser extrapolado com muito critério para outras condições para não incorrer em prováveis erros. Por ser uma constante experimental, seu uso é restrito.

Uma relação muito utilizada na secagem de alimentos é a equação de Lewis. Esta equação tem origem bem diferente da Lei de Fick e assume uma certa uniformidade na umidade, englobando toda a resistência em um filme junto à interface:

$$\frac{dX}{dt} = -k.(X - X_e) \dots\dots\dots [2.8]$$

que, integrando, resulta em:

$$\frac{X - X_e}{X_o - X_e} = e^{(-k.t)} \dots\dots\dots [2.9]$$

Hustrulid e Flikke (1959) observaram que pequenos grãos, em camada delgada, secam de acordo com esta equação, resultado confirmado por Sharma, Kunze e Tolley (1982) para arroz em casca.

Um modelo de secagem baseado na existencia de dois compartimentos, foi proposto por Sharma, Kunze e Tolley (1982)

para explicar o comportamento do arroz em casca, o qual não deixa de ser outra simplificação do modelo difusional de Fick:

$$X^* = A_1 \cdot e^{(-k_1 \cdot t)} + A_2 \cdot e^{(-k_2 \cdot t)} \dots\dots\dots [2.10]$$

onde A1 e A2 são constantes características do material e k1 e k2 são as constantes de secagem para cada um dos dois compartimentos.

Hustrulid e Flikke (1959) analisaram os dados obtidos com secagem de milho e observaram que a equação [2.10] descreveu muito bem a curva de secagem, apresentando melhor correlação que a equação [2.5] .

2.5.3 - Modelo empírico para a transferência de umidade -

A transferência de umidade pode também ser analisada através de equações empíricas, sendo a equação de PAGE uma modificação da equação [2.9] (Lewis):

$$X^* = e^{(-k \cdot t^n)} \dots\dots\dots [2.11]$$

onde k e n são constantes determinadas experimentalmente.

Misra e Brooker (1980) reuniram dados de secagem de milho de nove autores diferentes e ajustaram-nos à equação de Page, observando que a constante n refere-se à resistência interna e k refere-se às condições externas.

3 - MATERIAIS E METODOS

3.1 - PREPARO DA MATERIA PRIMA

Foram estudadas duas variedades de arroz, IAC-25 e IAC-165, cedidas pelo Instituto Agronômico de Campinas e provenientes das estações experimentais do órgão. Informações sobre as condições de colheita e secagem não eram disponíveis.

Quando do seu recebimento os dois lotes de 5 kg cada foram acondicionados em latas, adicionando-se 1/4 de uma pastilha de Fosfina em cada lote. As latas foram então lacradas e mantidas à temperatura ambiente por 30 dias, a fim de se realizar o expurgo.

Após o expurgo, procedeu-se ao beneficiamento e limpeza dos lotes, obtendo-se as frações: arroz em casca, arroz integral e arroz brunido. O beneficiamento foi realizado no Beneficiador de Amostras marca SUZUKI (Figura 3.1) disponível na Faculdade de Engenharia Agrícola/UNICAMP. A fração integral foi obtida pela simples passagem do arroz em casca pelo descascador, constituído por dois rolos de borracha. A fração brunida foi obtida pela passagem do arroz integral pelo disco abrasivo da máquina beneficiadora. Para que as amostras brunidas apresentassem o mesmo grau de beneficiamento sem perda significativa de endosperma, estabeleceu-se empiricamente através de análise visual, o tempo de permanência do arroz integral na câmara de brunimento. Este tempo de tratamento foi cerca de 1 minuto.

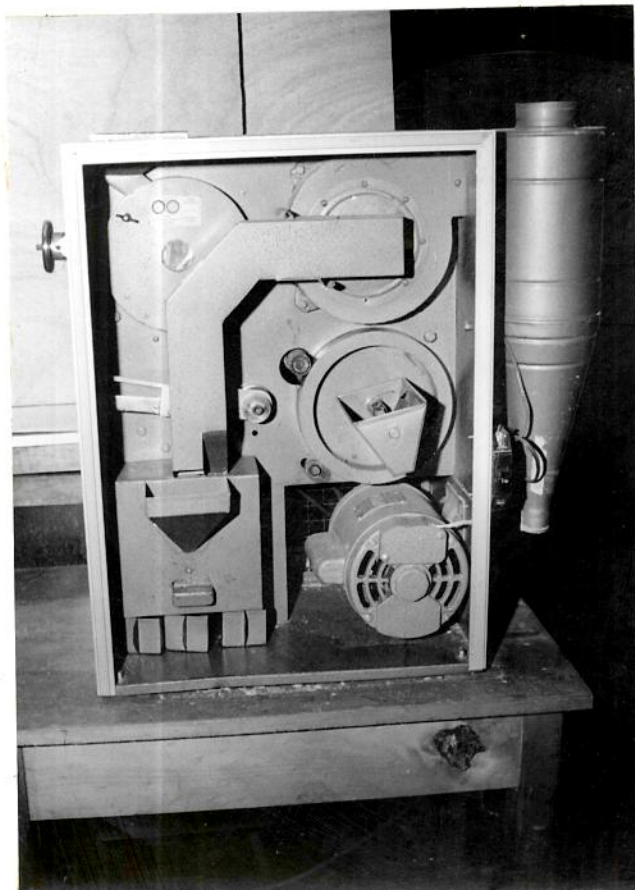


FIGURA 3.1 - Beneficiador de arroz SUZUKI

Após o beneficiamento, as tres frações das duas variedades foram colocadas em recipientes de vidro hermeticamente fechados e mantidas armazenadas - à temperatura ambiente e ao abrigo da luz - até o momento de sua utilização. O tempo máximo de armazenamento foi de 6 meses.

Quando necessário, os vidros foram abertos e, coletada a quantidade suficiente de amostra, imediatamente fechados e retornados à condição de armazenagem. A amostra foi então novamente selecionada, descartando-se os grãos chochos, imaturos, partidos e as impurezas presentes.

3.2 - EQUIPAMENTO DE ENSAIOS

Para a determinação da cinética de adsorção/desorção e avaliação das fissuras no grão de arroz, foram feitas duas tentativas exploratórias. A primeira delas constituída de uma série de 5 recipientes de vidro conectados entre si (Figura 3.2). Os recipientes continham soluções salinas supersaturadas pelas quais passava o ar a ser condicionado. Devido às propriedades destas soluções, conseguia-se obter o ar a distintos valores de umidade relativa. Os ensaios realizados neste equipamento mostraram, entretanto, pouca precisão devido a alguns fatores:

- a) a vazão de ar foi pouca para a quantidade de amostra necessária;
- b) a velocidade do ar entre os grãos foi insuficiente para minimizar a resistência externa à

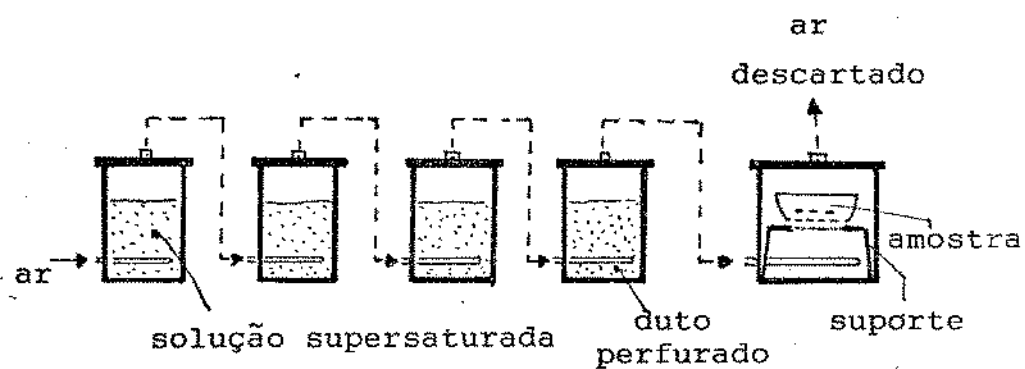


FIGURA 3.2 - Montagem para obtenção de corrente de ar com umidade relativa e temperatura constantes.

transferência de umidade;

c) não foi possível manter-se um controle satisfatório da temperatura das soluções, o que ocasionava sensível variação da umidade relativa;

d) não foi possível a determinação da umidade relativa uma vez que não se dispunha de higrometro e não havia velocidade de ar suficiente para a determinação da temperatura de bulbo úmido.

Devido a estes aspectos negativos, realizou-se outra montagem utilizando as mesmas soluções salinas supersaturadas. Esta nova montagem, mostrada na Figura 3.3, era constituída de colunas de vidro com 12 cm de diâmetro e 50 cm de altura, cujo fundo, de vidro sinterizado, permitia a passagem ascendente do ar. As colunas foram conectadas em série e seriam revestidas de material aquecedor para controle da temperatura. Os problemas existentes na tentativa anterior foram solucionados, mas esta montagem foi descartada devido à pouca resistência das colunas: a primeira coluna rompeu-se em função da elevada pressão do ar ocasionada pela série de colunas posteriores.

Procedeu-se então à terceira e definitiva montagem. Os experimentos foram realizados em uma câmara de ensaios construída para esta pesquisa no próprio Departamento de Engenharia de Alimentos e descrita a seguir. O ar, à temperatura, vazão e umidade relativa controladas, era fornecido por um condicionador de ar, modificado para esta finalidade. As medidas de temperatura foram obtidas por um registrador eletrônico com sensores de termopares tipo T (Cobre-Constantan).

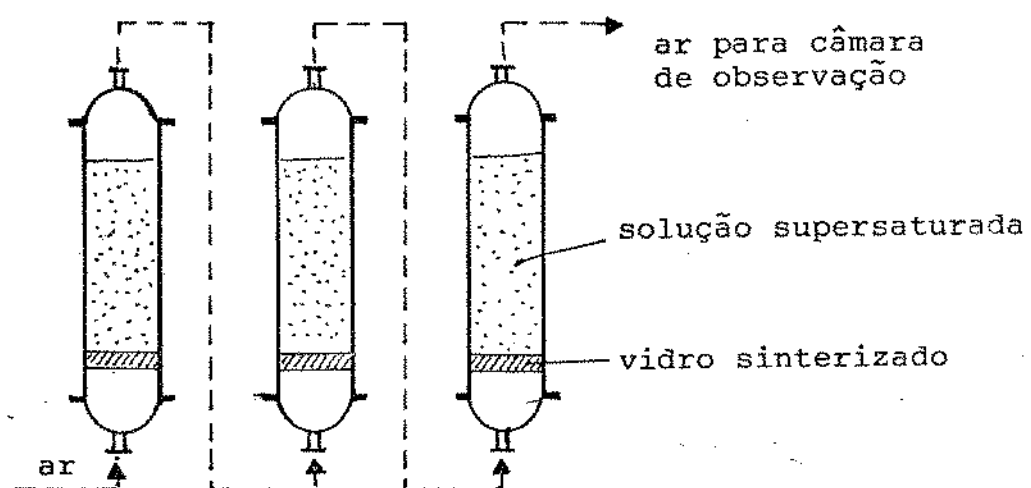


FIGURA 3.3 - Montagem alternativa para obtenção de ar a temperatura e umidade relativa constantes.

3.2.1 - Câmara de ensaios -

A câmara de ensaios (Figura 3.4) compõe-se de duas colunas verticais para os experimentos de desorção e adsorção, sendo uma delas dotada de visor para acompanhar o surgimento das fissuras nos grãos durante o processo de secagem ou umidificação.

No interior destas colunas escoa ar proveniente de qualquer equipamento externo (no caso, do condicionador). Em cada coluna existe uma válvula tipo borboleta que permite ajustar a vazão desejada do ar.

Exteriormente às colunas e internamente à câmara circula ar à mesma temperatura que a do ar de processo (interno às colunas). Este arranjo, tipo "banho de ar", foi necessário para evitar qualquer alteração nas condições do ar de processo, especialmente a condensação do seu vapor de água nas paredes internas das colunas.

Em cada coluna existe um suporte, fabricado em aço inoxidável, para a colocação dos cestos ou bandejas que conterão as amostras. Utilizou-se cestos com fundo e tampa de tela, diâmetro de 8 cm e altura de 2 cm, fabricados inteiramente em aço inoxidável. Estes cestos, contendo a amostra, foram colocados no suporte, ficando assim expostos à corrente permeante e ascendente do ar condicionado.

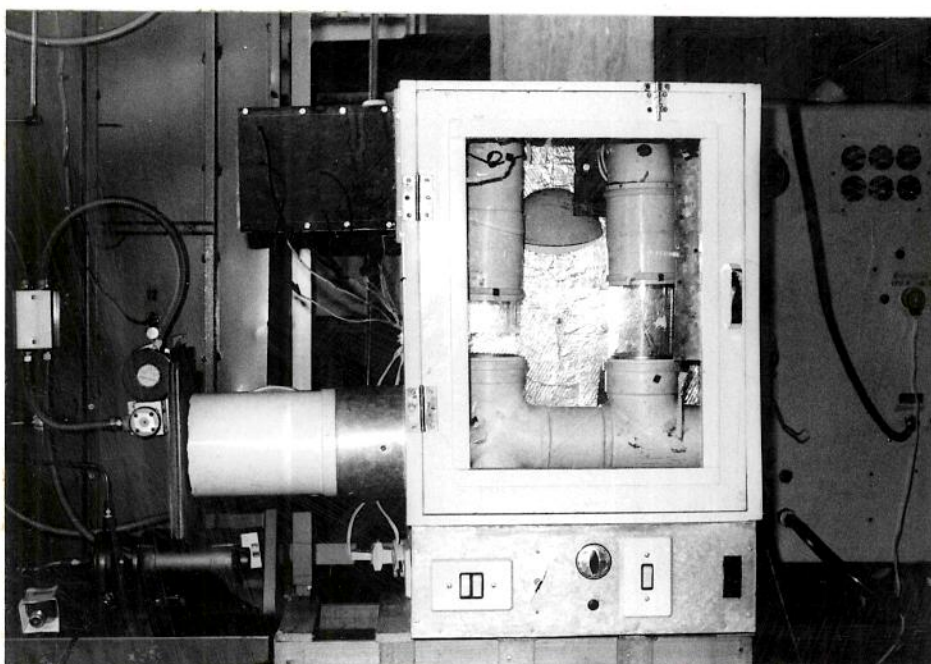


FIGURA 3.4 - Câmara de Ensaios de sorção

Uma das colunas permite a conexão do cesto à parte inferior de uma balança de precisão através de uma vareta de aço inoxidável, permitindo assim a pesagem da amostra sem a retirada do cesto.

A outra coluna possui dois visores de vidro, um superior e outro inferior, projetados para permitir fotografar a amostra que é colocada entre os dois visores, no interior da coluna. Abaixo do visor inferior, há um espaço para colocação de uma lâmpada fotográfica, acima da qual é colocado filtro polarizador. Acima do visor superior é colocada a câmara fotográfica com outro filtro polarizador invertido de 90° em relação ao filtro inferior. Assim, a luz polarizada atravessa a amostra e, com a segunda polarização, obtém-se a visibilidade das fissuras no arroz brunido. Este arranjo foi utilizado, com sucesso, por Stermer (1968).

3.2.2 - Condicionador de ar -

Para o condicionamento do ar ambiente às condições desejadas de temperatura, vazão e umidade relativa foi utilizado o equipamento marca AMINCO-AIRE (Figura 3.5) modificado. O objetivo das modificações foi aumentar a precisão e a versatilidade do equipamento. Para tanto, o controle original de temperatura do ar - termostato com sensor bimetalico - foi substituído por um controlador eletrônico com sensor de termopar (tipo T) modelo da Instrumentos Elétricos ENGR0. Outra modificação foi a substituição do motor original do ventilador por um motor de corrente contínua com controle eletrônico de

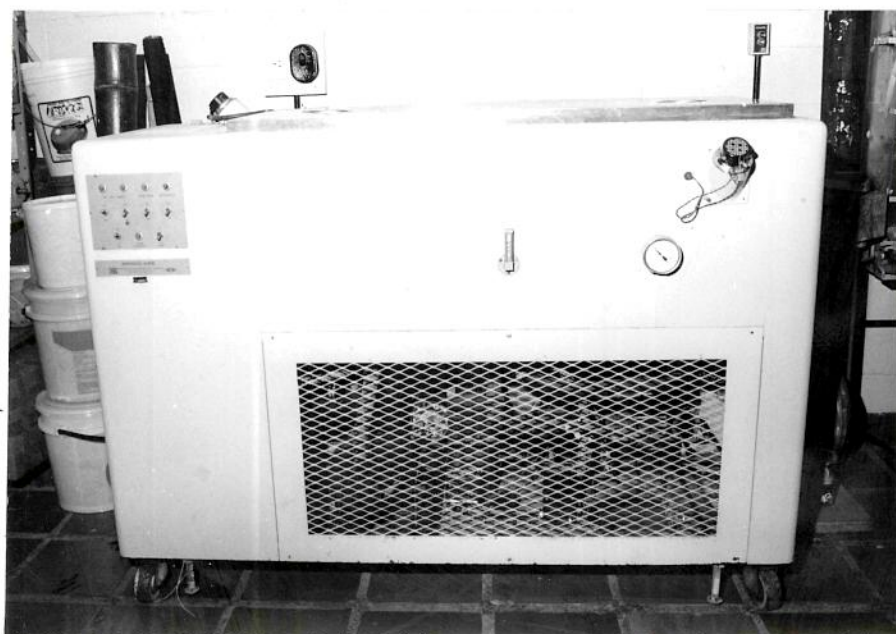


FIGURA 3.5 - Condicionador de ar AMINCO-AIRE

rotação, propiciando assim um melhor ajuste da vazão do ar.

3.2.3 - Registrador de temperaturas -

Para os registros das temperaturas utilizou-se o equipamento DIGISTRIP modelo III da KAYE (Figura 3.6), o qual utiliza termopares como sensores. No caso, foram utilizados termopares cobre-constantan (tipo T). Os pontos de medição foram: a) no interior de câmara de ensaios; e b) imediatamente antes da entrada nas colunas da câmara de ensaio (ar de processo). No ponto (b) foram tomados os valores da temperatura de bulbo úmido e da temperatura de bulbo seco do ar de processo, com os quais calculou-se o valor da umidade relativa.

3.3 - PROCEDIMENTOS UTILIZADOS

3.3.1 - Ajustes dos controles -

Após definidas as condições de determinado ensaio, eram realizados os ajustes dos seguintes parâmetros:

- a) temperatura do ar de circulação da câmara de ensaios (banho de ar);
- b) temperatura do ar de processo, através do controlador citado na Secção 3.2.3;
- c) velocidade do ar de processo, medida com velômetro marca ALNOR, à saída das duas colunas;



FIGURA 3.6 - Registrador de temperatura DIGISTRIP

d) umidade relativa do ar de processo.

A velocidade do ar de processo no interior das colunas foi tal que assegurasse desprezível a resistência externa à transferência de massa. Assim, a análise poderia ser realizada unicamente em termos do mecanismo interno de transferência de massa.

Assim, para efeito de simplificação dos procedimentos, decidiu-se manter uma velocidade tal que promovesse uma agitação uniforme e constante dos grãos, isto é, uma fluidização incipiente nos grãos. A determinação da velocidade do ar no interior das colunas quando se observava essa agitação dos grãos, forneceu o valor médio de 2,7 m/s, com uma faixa de variação de 2,5 a 3,0 m/s. Com este valor de velocidade, pode-se assumir um processo de transferência de massa controlado unicamente pela resistência interna.

3.3.2 - Cinética de adsorção e desorção -

Após os ajustes das condições desejadas, os cestos, contendo cada um cerca de 15 g de grãos selecionados e com umidade determinada, foram colocados nos suportes e deixados sob a ação da corrente de ar. A intervalos regulares de tempo os cestos tinham sua massa determinada.

Por problemas de precisão de medidas, não foi utilizado o procedimento para pesagem como descrito na Seção 3.2.1. Para esta determinação, os cestos foram retirados das

colunas a intervalos regulares, tendo sua massa sido determinada em uma balança marca METTLER com resolução de 1 mg. Após a determinação da massa, os cestos foram recolocados rapidamente nas colunas, sendo que o tempo máximo de permanência dos mesmos fora das colunas foi de 20 segundos.

As determinações da massa dos cestos foram realizadas a cada 15 minutos nas primeiras 2 horas, a cada 30 minutos nas 2 horas subsequentes e a cada 1 hora até atingir-se 8 horas de ensaio. Realizou-se também medidas a 12, 24, 36 e 48 horas ou mais de ensaio, sendo os cestos deixados nas colunas até atingirem peso constante, permitindo assim a determinação da umidade de equilíbrio (dinâmico) nas condições do ensaio.

Cada tipo de arroz (em casca, integral e brunido) de cada uma das duas variedades foi submetido à ação de uma corrente de ar a 30°C e a umidades relativas que variaram de 30% a 90%, conforme quadro abaixo:

	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%
com casca	X		X		X		X
integral	X		X		X		X
brunido	X	X	X	X	X	X	X

3.3.3 - Avaliação das fissuras nos grãos -

Inicialmente pretendia-se verificar o surgimento das fissuras através das fotografias dos grãos brunidos, como realizado por Stermer e descrito na Secção 3.2.1.

No entanto, os testes fotográficos realizados demonstraram ser este método inaplicável com os recursos materiais disponíveis, já que compromissos entre nitidez e profundidade de campo impediram a visualização correta das fissuras.

Optou-se pela verificação das fissuras a olho nú, com o auxílio da luz polarizada e do filtro polarizador. Assim, foi montado externamente à câmara de ensaios um suporte com a lâmpada fotográfica e os filtros polarizadores (Figura 3.7) para o qual era levado, a intervalos regulares de tempo, o cesto com os grãos de arroz para a visualização das fissuras.

O acompanhamento das fissuras nos grãos pôde ser realizado somente para o arroz brunido e foi levado a efeito simultaneamente com os ensaios de adsorção e de desorção.

Nestes casos, um cesto contendo 100 grãos seleccionados foi colocado sob a ação da corrente de ar e, simultaneamente, outro cesto com 15 g de grãos seleccionados foi colocado na outra coluna para o ensaio de adsorção ou desorção.

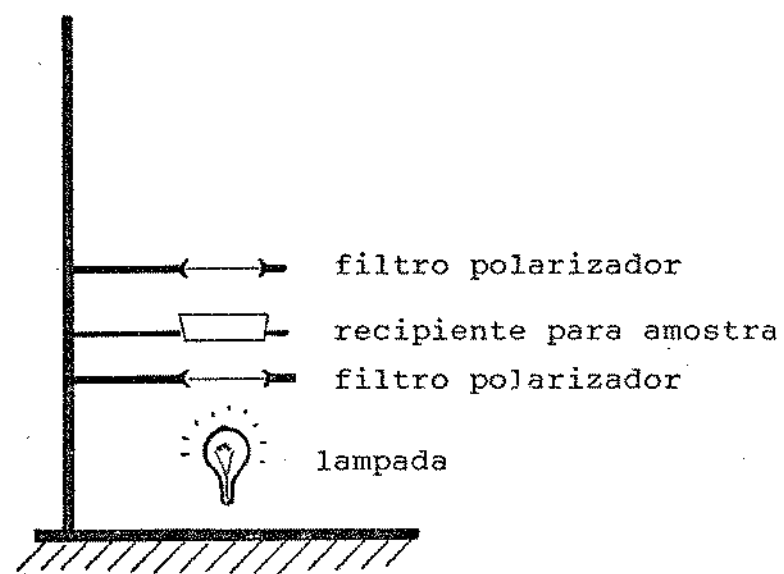


FIGURA 3.7 - Montagem para visualização de fissuras em grãos brunidos de arroz.

A intervalos de tempo regulares, como descrito na Secção 3.3.2, o cesto para análise das fissuras era retirado, sendo os grãos fissurados contados e eliminados. Simultaneamente o outro cesto era pesado conforme procedimento descrito anteriormente.

3.3.4 - Conteúdo de umidade no arroz -

A umidade da amostra foi determinada no final de cada ensaio ao atingir o equilíbrio (peso constante) e corresponde, portanto, à umidade de equilíbrio dinâmico. O método utilizado foi o de secagem em estufa à vácuo (26" de mercúrio) a 70°C por 96 horas (Aguerre, Suárez e Viollaz, 1982).

Aproximadamente 3 g de amostra foram colocadas em cadinhos de alumínio com fundo de tela, sendo as massas determinadas em uma balança METTLER com resolução de 0,1 mg. As determinações de umidade foram realizadas em triplicata.

4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste Capítulo são apresentados os resultados mais significativos em termos de cinética de sorção e são discutidos os prováveis mecanismos de fissuramento e quebra do grão de arroz. Os valores finais de umidade de equilíbrio do arroz foram correlacionados em função da umidade relativa do ar e aqui apresentados na forma de isotermas de sorção. Tabelas com os valores experimentais de todos os ensaios estão organizadas no Apêndice.

4.1 - CINÉTICA DE DESORÇÃO E ADSORÇÃO -

O comportamento geral do grão, durante os ensaios de adsorção e desorção, em termos de variação de massa, foi o mesmo, independentemente da variedade e do tipo do arroz usado. Uma amostra dos resultados está traçada nas Figuras 4.1a e 4.1b que apresentam as curvas de adsorção e desorção para a variedade IAC-25 com casca e para IAC-165 brunido respectivamente, colocadas em ambientes a diferentes umidades relativas.

As Figuras 4.1a e 4.1b mostram que os ensaios de desorção, para os ambientes a 30, 40 e 50% de umidade relativa, apresentam uma diminuição da umidade do cereal com o tempo. Os ensaios de adsorção, com os ambientes a 70, 80 e 90% de umidade relativa, apresentam o aumento da umidade com o tempo. A forma das curvas é característica dos processos de transferência de umidade em sólidos, por apresentarem uma grande variação inicial

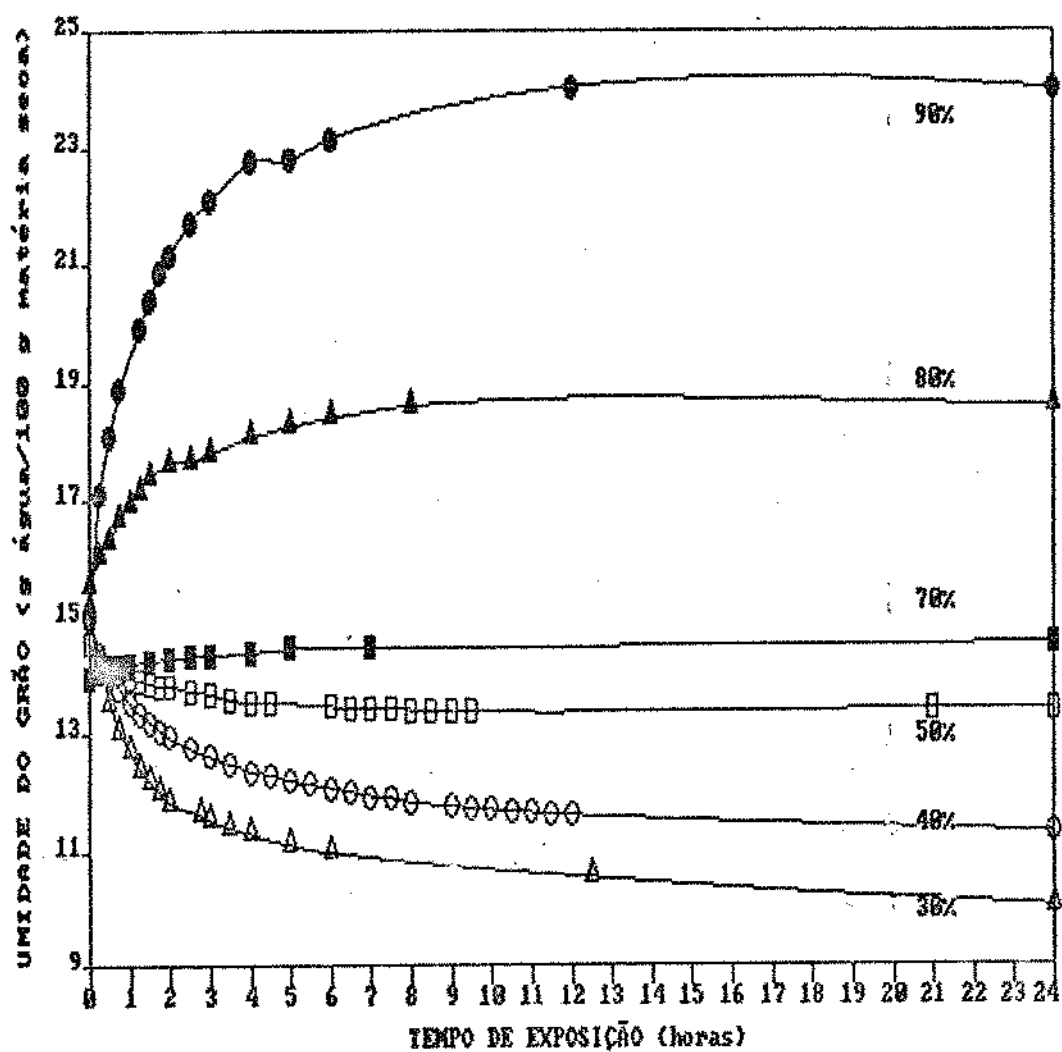


FIGURA 4.1a - Variação da umidade do arroz em função do tempo de exposição a diferentes umidades relativas de ar a 30°C. Variedade IAC-165 brunido.

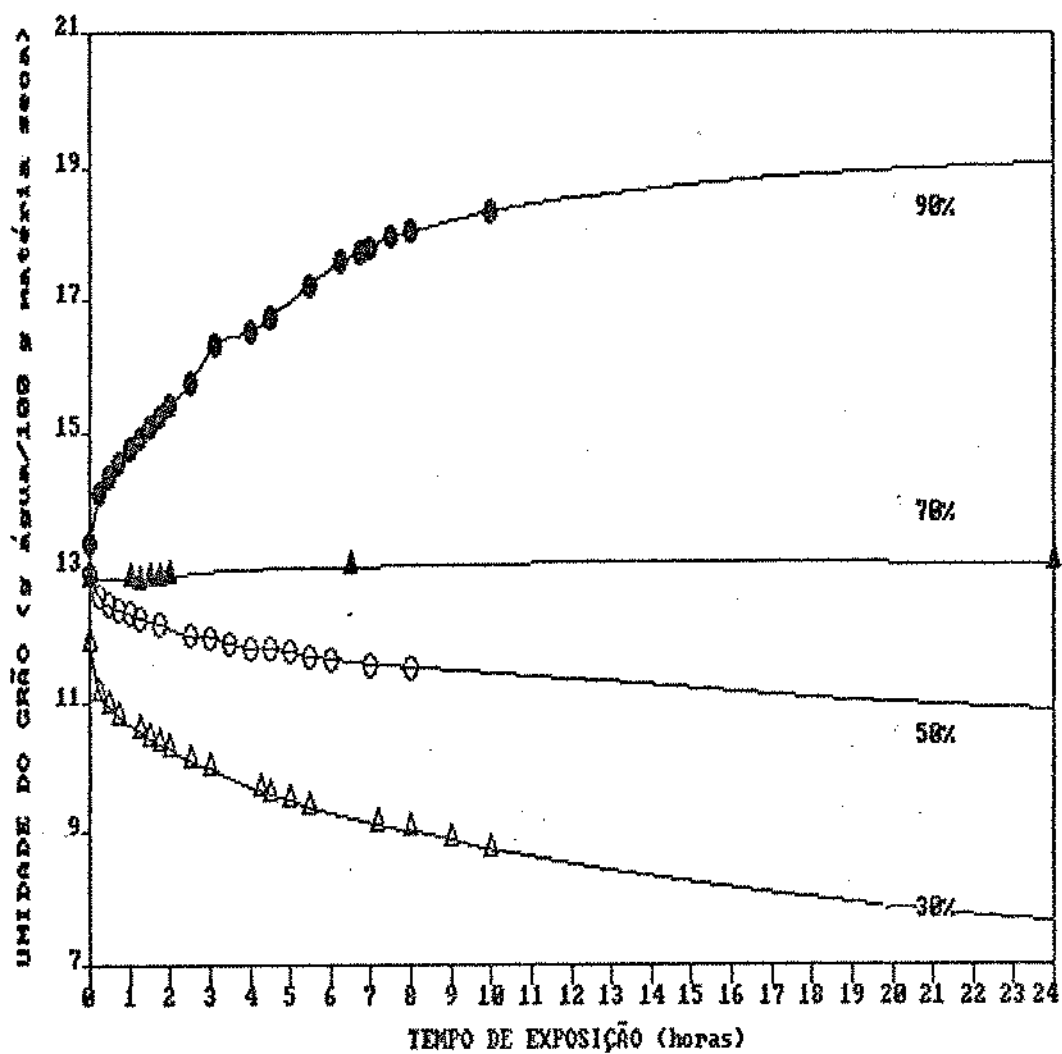


FIGURA 4.1b - Variação da umidade do arroz em função do tempo de exposição a diferentes umidades relativas de ar a 30°C. Variedade IAC=25 em casca.

da umidade (ou seja, alta taxa de transferência de umidade), sendo que essa variação de umidade vai se tornando menor com o aumento do tempo de exposição, até que a partir de um dado tempo a umidade do cereal permanece constante. Este comportamento deve-se à diminuição da força motriz para a transferência de água (neste caso a diferença do potencial químico da umidade entre o ambiente e o interior do grão) com o tempo de exposição, até que o grão atinja um valor de equilíbrio tornando-se nulo o potencial para a transferência de umidade.

Nas duas figuras nota-se que a maior variação de umidade ocorreu no grão exposto a 90% de umidade relativa e que os ensaios realizados a 70% de umidade relativa apresentaram a menor variação de umidade. O pequeno potencial de umidade para os ensaios realizados a 70% de umidade relativa é o responsável pela pequena taxa de variação de umidade no grão, o que causou certa imprecisão e indefinição nas curvas de adsorção obtidas nesta condição de ar, uma vez que o grão estava com sua umidade inicial muito próxima da umidade de equilíbrio. É preciso alertar que este comportamento dificulta o ajuste à modelos de transferência de umidade.

Para a análise da cinética de desorção e adsorção foram calculados os valores experimentais da umidade adimensional (X^*), definida como:

$$X^* = \frac{X - X_e}{X_o - X_e} \dots\dots\dots [4.1]$$

onde X , X_o e X_e são, respectivamente, a umidade média a um tempo t , a umidade inicial do grão e a umidade de equilíbrio com o

ambiente.

A unidade de equilíbrio, para cada tipo de arroz e para cada unidade relativa do ar, foi encontrada conforme descrito na Secção 3.3.4.

As Figuras 4.2a, 4.2b e 4.2c apresentam os resultados obtidos com arroz com casca, integral e brunido, usando a concentração adimensional como abcissa.

De acordo com a equação [2.4], se a difusividade for constante e se a amostragem dos grãos for perfeita mantendo-se as dimensões, as curvas de unidade adimensional em função do tempo, obtidas com as várias condições do ar, deveriam coincidir. Na Figura 4.2a, que apresenta os dados a 30% e 90% de umidade relativa referentes à variedade IAC-25, é flagrante que as curvas não se sobrepõem. O mesmo efeito foi observado para a variedade IAC-165. A Figura 4.2b ilustra o caso do arroz integral, mostrando o comportamento da variedade IAC-25 sujeita a umidades relativas de 30, 50 e 90%. O afastamento entre as curvas é similar ao observado para arroz em casca. Já no caso do arroz brunido observa-se uma tendência à sobreposição para as duas variedades, sobretudo nas 3 primeiras horas de tratamento, como pode ser visto na Figura 4.2c para a variedade IAC-25.

Este comportamento parece indicar que para arroz em casca e arroz integral a difusividade não deve ser assumida como independente da concentração de umidade no grão. Considerando que em processos transientes, como os estudados, a camada externa assume logo no início valores próximos aos da umidade de

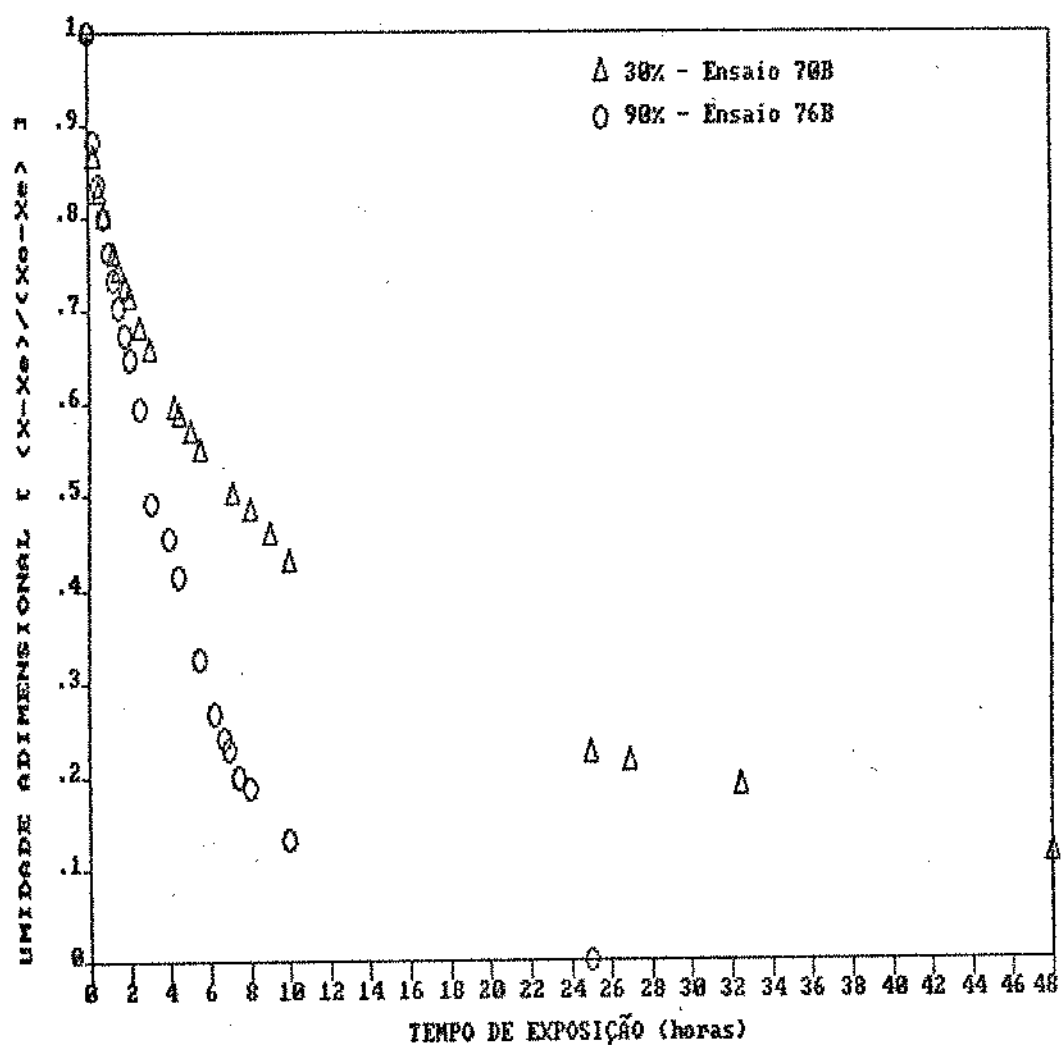


FIGURA 4.2a - Variação da umidade adimensional X^* $(X-X_e)/(X_o-X_e)$ em função do tempo de exposição a 30% e 90% de umidade relativa. Temperatura 30°C.

Variedade IAC-25, em casca.

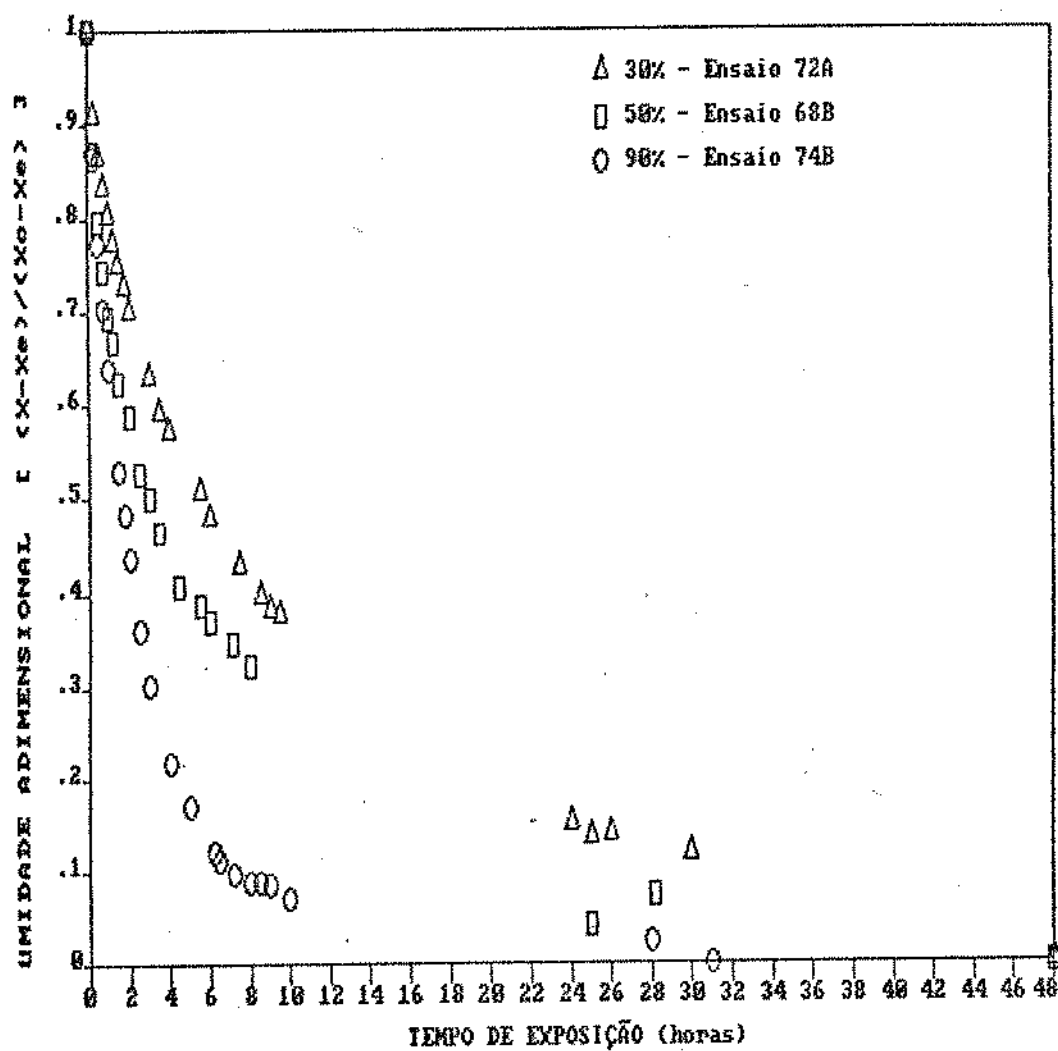


FIGURA 4.2b - Variação da umidade adimensional X^* $(X-X_e)/(X_o-X_e)$ em função do tempo de exposição a 30%, 50% e 90% de umidade relativa. Temperatura 30°C.
 Variedade IAC-25, integral.

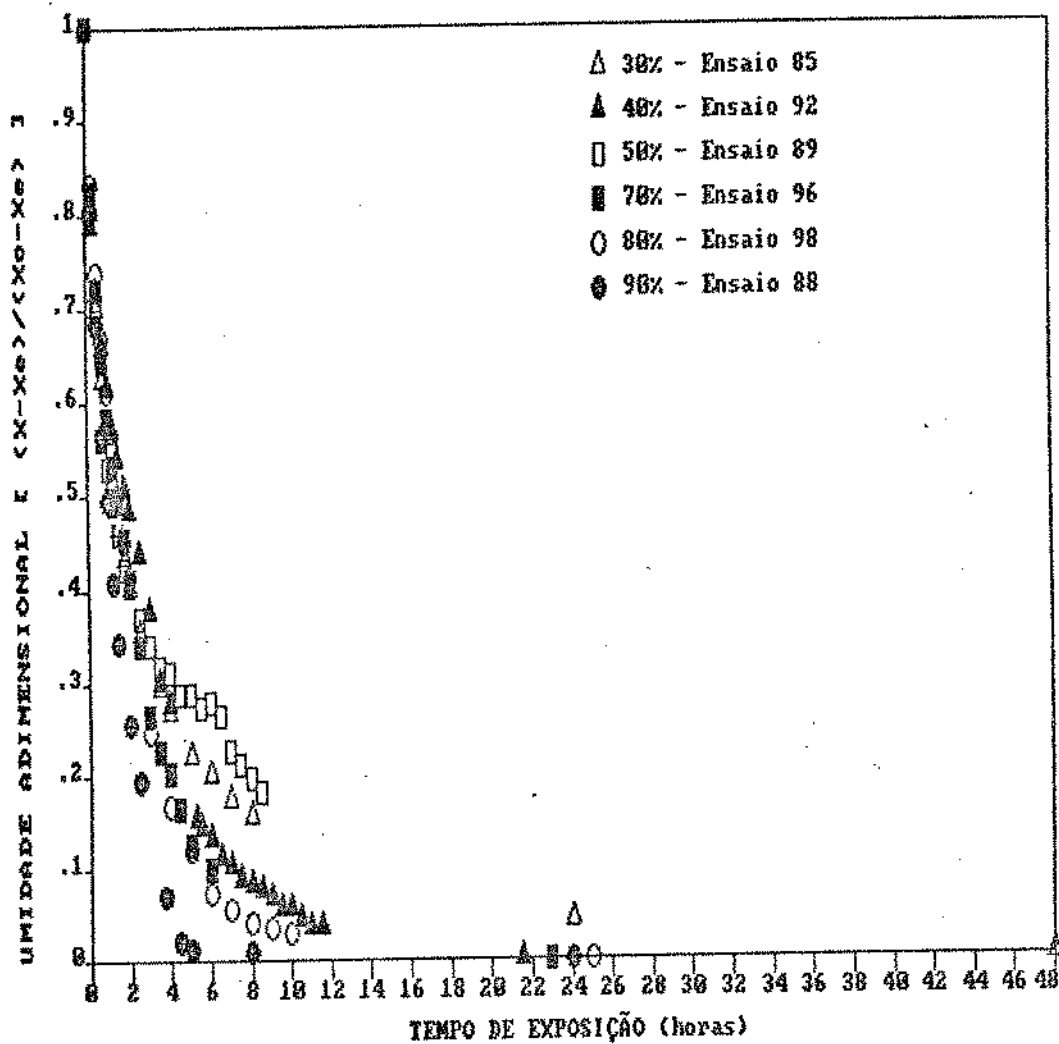


FIGURA 4.2c - Variação da umidade adimensional X^* $(X-X_e)/(X_o-X_e)$ em função do tempo de exposição a diversas umidades relativas. Temperatura 30°C.
Variedade IAC-25, brunido.

equilíbrio, é possível concluir que as difusividades da casca e da camada de aleurona devem variar consideravelmente com a umidade. Este fato ocorre em menor proporção com a difusividade do endosperma. A ordem das curvas deixa claro que a resistência à transferência de massa deve diminuir com o aumento da umidade relativa e portanto a difusividade nas camadas externas aumenta com o conteúdo de umidade. Esta tendência tem sido encontrada em alimentos.

Uma outra explicação para a não superposição das curvas na Figura 4.2a e 4.2b pode se basear no comportamento de migração da água no próprio endosperma. O surgimento de fissuras pode facilitar a movimentação da umidade, que se deslocaria rapidamente pelas mesmas e encontraria assim um comprimento característico bem menor para a difusão pura. Esse mecanismo pode explicar a inversão na sequência de curvas da Figura 4.2c, ou seja, a posição relativa da curva referente a 50% de umidade relativa, condição que propiciou o menor número de grãos fissurados. É difícil explicar, entretanto, as curvas nas Figuras 4.2a e 4.2b pois, conforme a Secção 4.4.3, os resultados indicam que as fissuras atingem igualmente os ensaios a 30 e a 90% de umidade relativa.

Caso as suposições que levam à 1ª Lei de Fick se aplicassem à situação em estudo, as curvas de logaritmo da variação de umidade em relação ao tempo deveriam, a menos dos instantes iniciais, tender a uma reta. As Figuras 4.3a, 4.3b, 4.3c e 4.3d que apresentam uma amostragem de diversos ensaios, indicam que esta tendência é apenas manifestada em algumas situações, mas que em alguns dos casos há desvios consideráveis

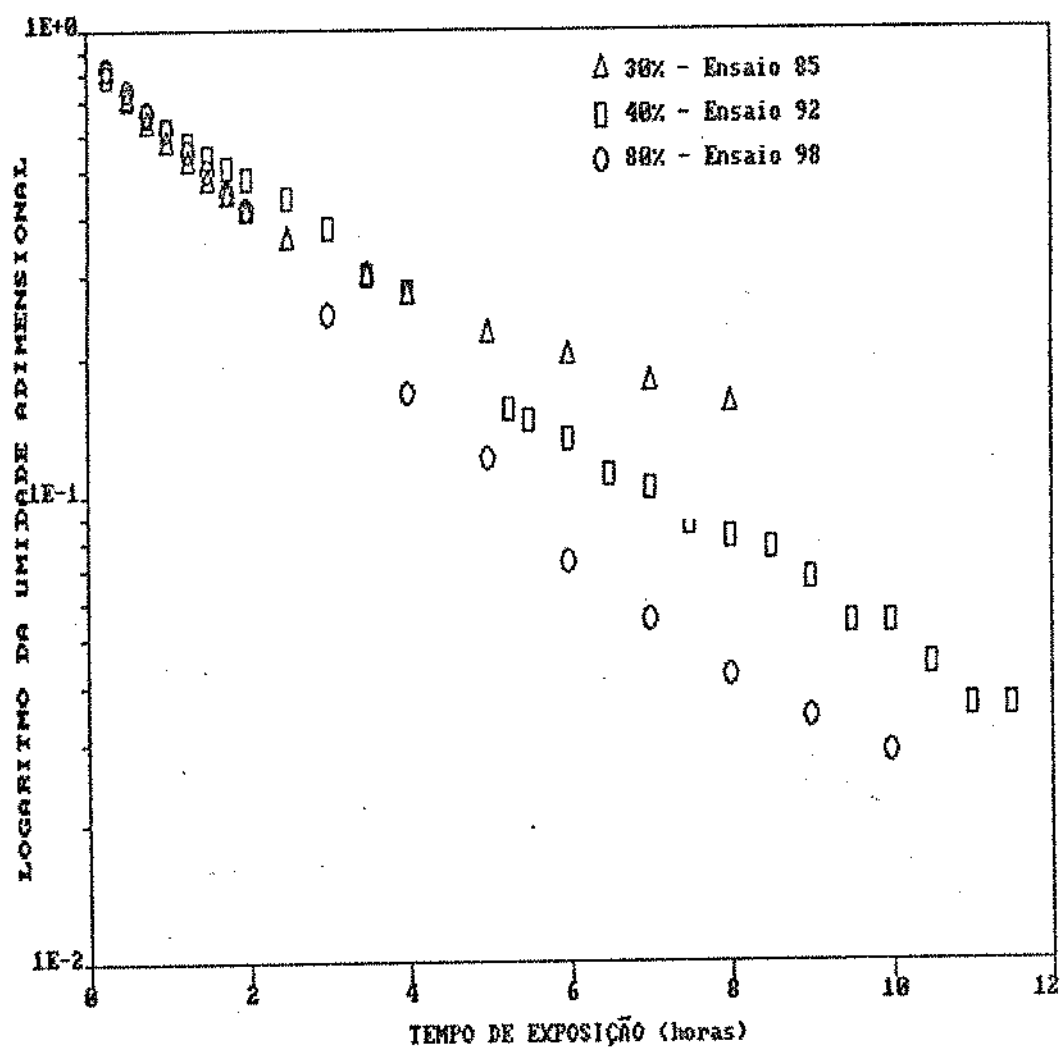


FIGURA 4.3a - Logaritmo da umidade adimensional em função do tempo de exposição a 30%, 40% e 80% de umidade relativa. Temperatura 30°C. Variedade IAC-25, brunido.

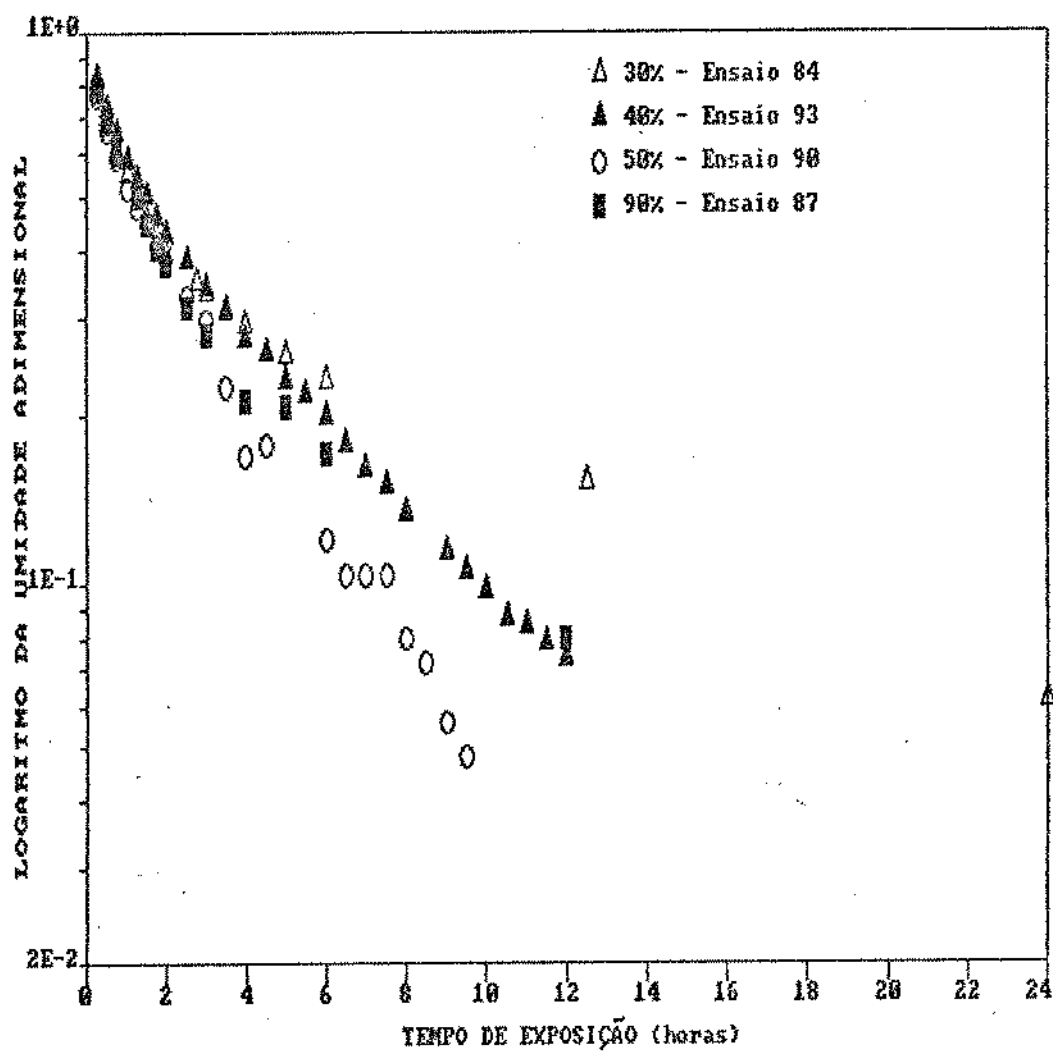


FIGURA 4.3c - Logaritmo da unidade adimensional em função do tempo de exposição a 30%, 40%, 50% e 90% de umidade relativa. Temperatura 30°C. Variedade IAC-165, brunido

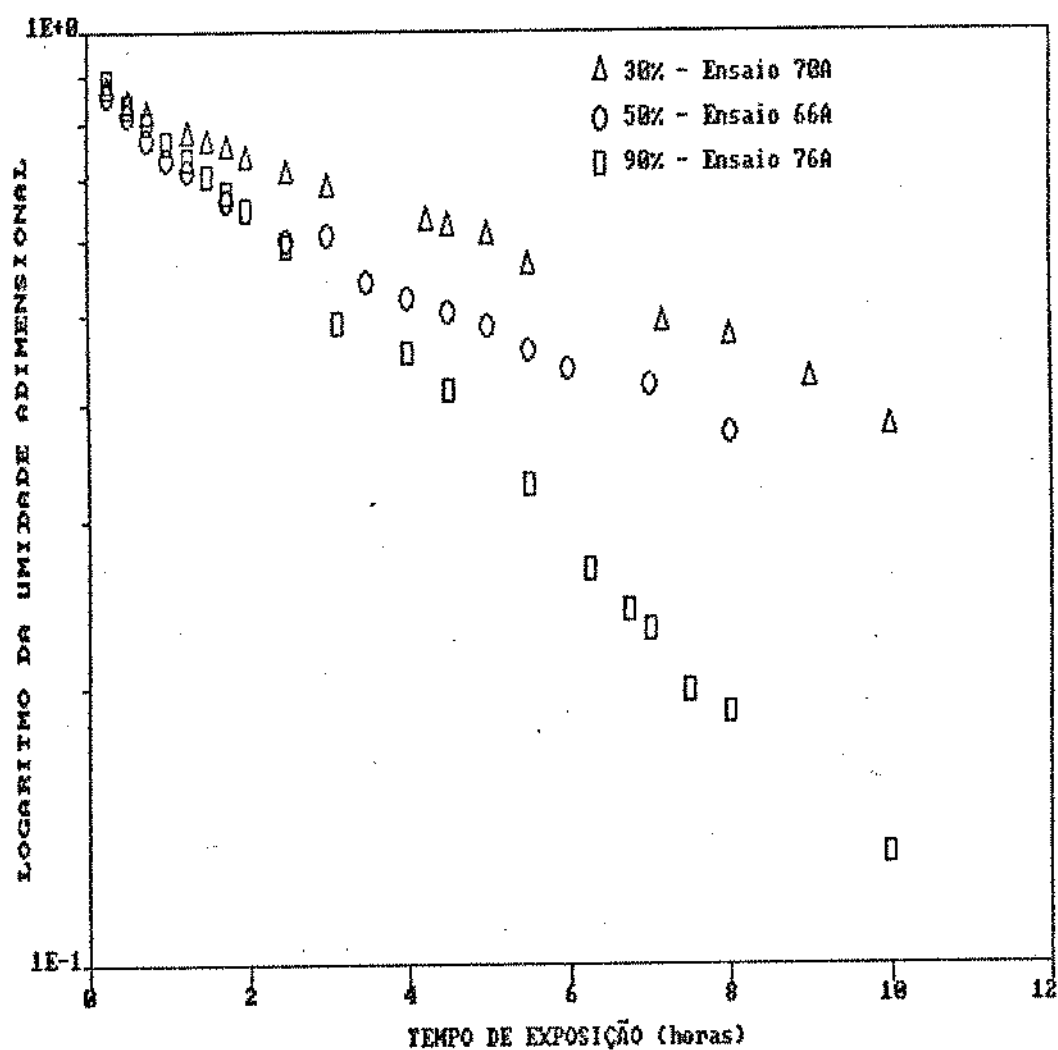


FIGURA 4.3c - Logaritmo da umidade adimensional em função do tempo de exposição a 30%, 50% e 90% de umidade relativa. Temperatura 30°C.
Variedade IAC-25, em casca.

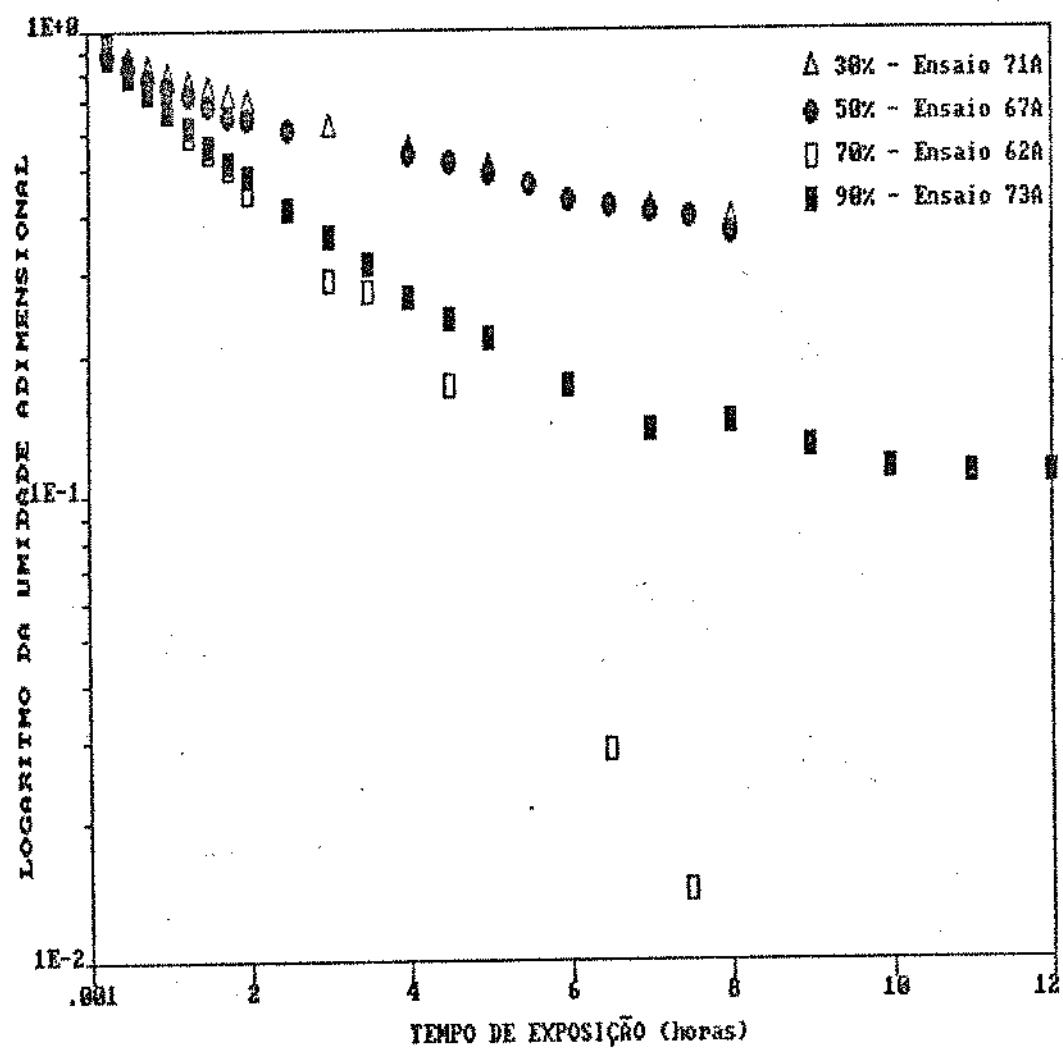


FIGURA 4.3d - Logaritmo da unidade adimensional em função do tempo de exposição a 30%, 50%, 70% e 90% de umidade relativa. Temperatura 30°C. Variedade IAC-165, integral.

do modelo difusional, como bem mostram as Figuras 4.3c e 4.3d.

Para a análise da cinética de transferência de umidade, os dados experimentais de umidade adimensional foram ajustados, em função do tempo, de acordo com três equações:

A) equação de Page (equação [2.11]) modificada com a inclusão de uma constante multiplicativa:

$$X^* = A.e^{(-k.t^n)} \dots\dots\dots [4.2]$$

B) equação simplificada da 2ª Lei de Fick (equação [2.7]) que será chamada aqui de Modelo Difusional

C) equação de Lewis (equação [2.9]). Como este último modelo apresentou desvios muito grandes, seus resultados não serão comentados aqui, embora possam ser vistos no Apêndice.

O ajuste foi realizado pelo método de Gauss-Newton usando o utilitário SAS - Statistical Analysis System - disponível no computador VAX da Universidade Estadual de Campinas. Todos os pontos levantados foram considerados, mesmo aqueles que, pela simples observação visual de curvas, poderiam ser descartados como sendo erro experimental.

A Tabela 4.1 mostra os parâmetros A e k do modelo difusional obtidos para cada ensaio com as duas variedades de arroz. São apresentados os valores da soma dos quadrados dos resíduos (SQR) para cada determinação.

A Tabela 4.2 apresenta os parâmetros A, k e n da equação de Page modificada ajustados pelos resultados de cada

TABELA 4.1 - PARÂMETROS AJUSTADOS PARA O MODELO DIFUSIONAL

VAR	TIPO	URF	ENSAIO	A	k	SQR
25	B R U N I D O	30	85	0,8464	0,31885	0,06679
		40	92	0,8852	0,3119	0,02375
		50	83	0,77499	0,10551	0,10334
			89	0,75426	0,21526	0,14866
		70	78	0,93943	0,51092	0,02202
			96	0,92505	0,41260	0,01112
		80	98	0,95161	0,43296	0,00528
		90	80	0,92764	0,40884	0,03821
			88	0,97961	0,69892	0,00250
			95	0,90651	0,58853	0,06359
	I N T E G R A L	30	72A	0,88837	0,09501	0,03851
			72B	0,89823	0,10350	0,03046
		50	68A	0,86717	0,11909	0,05070
			68B	0,85736	0,15431	0,05202
		70	64A	1,05584	0,27963	0,04301
			64B	1,02793	0,30344	0,03292
		90	74A	0,95979	0,36792	0,01160
			74B	0,94243	0,36070	0,01654
		C/	70A	0,85829	0,06973	0,05235
	C A S C A	30	70B	0,82130	0,06005	0,07483
		50	66B	0,86432	0,11641	0,03424
		70	63A	1,17837	0,22117	0,15120
			63B	1,17710	0,19392	0,11290
		90	76A	0,95335	0,22493	0,01019
			76B	0,94874	0,19849	0,00690
		30	84	0,84379	0,32122	0,09473
		40	93	0,83049	0,26947	0,06750
		50	82	0,77605	0,13861	0,09206
	B R U N I D O		90	0,85332	0,38419	0,05629
		70	77	0,93622	0,49922	0,01807
			97	0,89933	0,33967	0,02407
		80	99	0,94397	0,47703	0,01734
		90	81	0,85156	0,30953	0,11797
			87	0,88327	0,40185	0,05326
			94	0,81189	0,18759	0,09735
		30	71A	0,89244	0,11091	0,02785
	I N T E G R A L		71B	0,90152	0,10826	0,02566
		50	67A	0,86426	0,10591	0,06102
			67B	0,86667	0,11570	0,06931
		70	62A	1,01701	0,41465	0,00692
			62B	1,04402	0,55038	0,03331
		90	73A	0,94127	0,33392	0,02819
			73B	0,92083	0,29495	0,04356
		30	69A	0,81768	0,06259	0,05242
	C/ C A S C A		69B	0,82028	0,05929	0,05176
		50	65A	0,82395	0,06713	0,04744
			65B	0,85360	0,06329	0,03748
		70	61A	1,03218	0,71636	3,15237
			61B	1,05549	0,33872	0,52555
		90	75A	0,93491	0,10746	0,01346
			75B	0,93078	0,10885	0,01434

165

URF : Umidade Relativa Nominal (%)

TABELA 4.2 - PARÂMETROS AJUSTADOS PARA A EQUAÇÃO DE PAGE

VAR	TIPO	URF	ENSAIO	A	k	n	SQR
25	B R U N I D O	30	85	1,01273	0,58816	0,58487	0,00288
		40	92	0,95011	0,41417	0,83668	0,01497
		50	83	0,96145	0,36485	0,48379	0,05722
			89	1,01977	0,62198	0,46706	0,01553
		70	78	0,97540	0,57532	0,89389	0,01897
			96	0,98880	0,52151	0,81113	0,00195
		80	98	0,98212	0,48491	0,90196	0,00283
		90	80	1,02106	0,56485	0,72477	0,01271
			88	0,99126	0,71941	0,95576	0,00209
			95	1,01790	0,78916	0,66040	0,01937
	I N T E G R A L	30	72A	0,99023	0,21031	0,69160	0,00265
			72B	0,98929	0,20876	0,71731	0,00189
		50	68A	0,98811	0,27364	0,63145	0,00864
			68B	0,99447	0,34440	0,61060	0,00643
		70	64A	0,99985	0,18700	1,32000	0,03103
			64B	0,98992	0,23904	1,19611	0,02816
		90	74A	1,00729	0,44761	0,85821	0,00492
			74B	1,01062	0,47386	0,80728	0,00318
		C/	70A	0,96137	0,17687	0,67165	0,00959
	C A S C A		70B	0,96895	0,21093	0,59402	0,00290
		50	66B	0,96804	0,25435	0,64311	0,00611
		70	63A	1,01917	0,04178	2,30133	0,04476
			63B	1,01620	0,02765	2,29694	0,01976
		90	76A	0,94833	0,21790	1,01726	0,01013
			76B	0,95763	0,21053	0,96924	0,00671
165	B R U N I D O	30	84	1,02383	0,61581	0,52613	0,01189
		40	93	1,00382	0,53395	0,63906	0,00106
		50	82	0,97656	0,43091	0,47869	0,03157
			90	0,99443	0,62375	0,66476	0,01218
		70	77	0,95891	0,54032	0,93137	0,01695
			97	0,99654	0,50839	0,69921	0,00350
		80	99	1,00712	0,58641	0,80342	0,00606
		90	81	1,03013	0,60554	0,55091	0,02689
			87	1,01279	0,63350	0,60481	0,00999
			94	1,01400	0,48010	0,54941	0,01049
	I N T E G R A L	30	71A	0,98146	0,21701	0,73318	0,00189
			71B	0,98572	0,20692	0,74490	0,00148
		50	67A	0,99818	0,27834	0,57212	0,00281
			67B	1,01028	0,30768	0,54982	0,00550
		70	62A	1,00691	0,39670	1,03987	0,00656
			62B	0,97216	0,41963	1,32517	0,01868
		90	73A	1,00503	0,43502	0,82012	0,01722
			73B	1,02493	0,45416	0,72857	0,01162
		C/	69A	0,93634	0,18457	0,66560	0,01075
	C A S C A		69B	0,93925	0,17990	0,66145	0,00928
		50	65A	0,93194	0,17664	0,68119	0,01495
			65B	0,94798	0,15376	0,71067	0,00873
		90	75A	0,97716	0,15606	0,83469	0,00743
			75B	0,97295	0,15793	0,83417	0,00848

ensaio, para os tres tipos de grãos (em casca, integral e brunido) e para as duas variedades estudadas.

A comparação entre os parâmetros de correlação da Tabela 4.1 e da Tabela 4.2 confirma que a equação de Page modificada ajustou-se melhor aos pontos experimentais, uma vez que apresentou menores valores para a soma dos quadrados dos resíduos.

Analisando os valores das Tabelas 4.1 e 4.2 notamos que para alguns tipos de arroz, em ambas variedades, houve considerável diferença entre os resultados obtidos em ensaios duplicados realizados a 90% de umidade relativa. Tal fato deve-se, provavelmente, à instabilidade de leituras a altas umidades relativas do ar, uma vez que pequenas alterações nestas provocam considerável diferença na umidade do grão, podendo inclusive ocorrer condensação. O alto valor de SQR observado para um experimento com arroz com casca, IAC-165 a 70% de umidade relativa, provavelmente reflete um descontrole experimental que deve ter ocorrido e que salienta ainda mais a baixa definição no formato da curva, para pequenas variações de massa.

Para garantirmo-nos de que a umidade no final de cada ensaio realmente refletisse a condição de equilíbrio, procedemos ao ajuste do modelo difusional e da equação de Page modificada considerando a umidade de equilíbrio (X_e) como um parametro adicional a ser determinado. Assim sendo, os valores experimentais de X (umidade do grão em base seca) foram ajustados em função do tempo, de acordo com as equações:

$$X = (X_o - X_e) . A . e^{(-k . t)} + X'_e \dots\dots\dots [4.3]$$

$$X = (X_o - X_e) . A . e^{(-k . t^n)} + X'_e \dots\dots\dots [4.4]$$

Tal procedimento apresentou resultados muito próximos aos valores experimentais, com exceção das condições mostradas na Tabela 4.3. Mesmo nestes casos, as diferenças são aceitáveis considerando as difíceis condições de controle do ar a 90% de umidade relativa conforme mencionado anteriormente, bem como as imprecisões na determinação da umidade final do produto mais seco e muito higroscópico (ar a 30% UR). Nesta Tabela observa-se que os valores obtidos com a equação [4.4] (Page) apresentam os desvios mais pronunciados, uma vez que esta equação é empírica e não leva em conta as suposições de equilíbrio inerentes ao modelo difusional. Além disto, nela o ajuste é feito com 4 constantes e portanto com maior grau de liberdade de variação nestes parâmetros.

Na Tabela 4.4 são apresentados alguns valores da constante k para o modelo difusional calculados a partir dos valores de difusividade e raio característico obtidos por vários autores. Comparando-se com os valores obtidos no presente trabalho, vemos que há concordância destes com os resultados de Steffe e Singh (1982) no caso de arroz integral apenas. A comparação torna-se difícil em função das diferentes umidades relativas, temperaturas e umidades iniciais. Os valores da constante foram calculados a partir dos dados de difusividade e raio característico obtidos pelos autores citados acima. Nos

TABELA 4.3 - Comparação entre os valores experimentais de umidade de equilíbrio e aqueles obtidos por ajuste das equações 4.3 e 4.4

ensaio variedade		tipo	UR (%)	umidade de equilíbrio (bs)		
				experim	Eq 4.3	Eq 4.4
85	IAC-25	B	30	9,63	10,15	9,71
83	IAC-25	B	50	13,40	13,35	11,00
80	IAC-25	B	90	23,95	22,91	23,16
72A	IAC-25	I	30	8,03	8,44	7,60
72B	IAC-25	I	30	8,03	8,35	7,75
82	IAC-165	B	50	12,99	13,03	8,73
81	IAC-165	B	90	24,10	22,45	23,30
87	IAC-165	B	90	24,81	23,90	24,33
69A	IAC-165	C	30	7,01	7,34	5,81
69B	IAC-165	C	30	7,06	7,42	5,85

TABELA 4.4 - COMPARAÇÃO ENTRE OS VALORES DA CONSTANTE k OBTIDOS NESTE TRABALHO E OS VALORES CALCULADOS A PARTIR DE DADOS DE RAIO CARACTERÍSTICO E DIFUSIVIDADE OBTIDOS POR OUTROS AUTORES.

TIPO DE ARROZ	TEMP (°C)	UR (%)	k	REFERENCIA
em casca	35,4	65,5	0,107	<i>Steffe e Singh (1982)</i>
	30	50	0,116	*
	30	70	0,221	*
integral	35,4	64,4	0,357	<i>Steffe e Singh (1982)</i>
	--	--	0,437	idem
	30	50	0,154	*
	30	70	0,303	*
brunido	35,3	62,5	0,834	<i>Steffe e Singh (1980)</i>
	39,9	68,6	0,917	idem
	30	50	0,319	*
	30	70	0,511	*

* Resultados obtidos no presente trabalho com a variedade IAC-25

dois casos a Difusividade foi obtida pelo ajuste da 2ª Lei de Fick (equação [2.4]).

Nas Figuras 4.4 a 4.14 são apresentados os valores experimentais e a curva das funções ajustadas, referentes a alguns ensaios com a variedade IAC-25, conforme resultados apresentados nas Tabelas 4.1 e 4.2 . A variedade IAC-165 mostrou o mesmo comportamento.

Nota-se pelas Figuras 4.4 a 4.14 que a equação de Page modificada descreve melhor a cinética de sorção para as condições deste experimento. O modelo Difusional pode ser utilizado para descrever a cinética de sorção, com pouco desvio em relação aos pontos experimentais, somente para X^* maior que 0,3, independentemente do tipo de arroz e da umidade relativa do ar. Isto, aliás, já era inferido pelo comportamento da maioria das curvas traçadas em escala semi-logaritimica, na Figura 4.3. Para os processos de adsorção, o modelo difusional apresenta pouca diferença em relação à equação de Page modificada, mesmo para valores de umidade adimensional menores que 0,3. Na Tabela 4.1 podemos notar o reflexo deste comportamento na soma dos quadrados dos residuos: para umidade relativas maiores que 70% (adsorção) observa-se com poucas exceções os menores valores de SQR, independentemente do tipo e variedade do arroz. Isto significa dizer que esta equação simplificada do modelo difusional pode descrever melhor o comportamento na adsorção que na desorção.

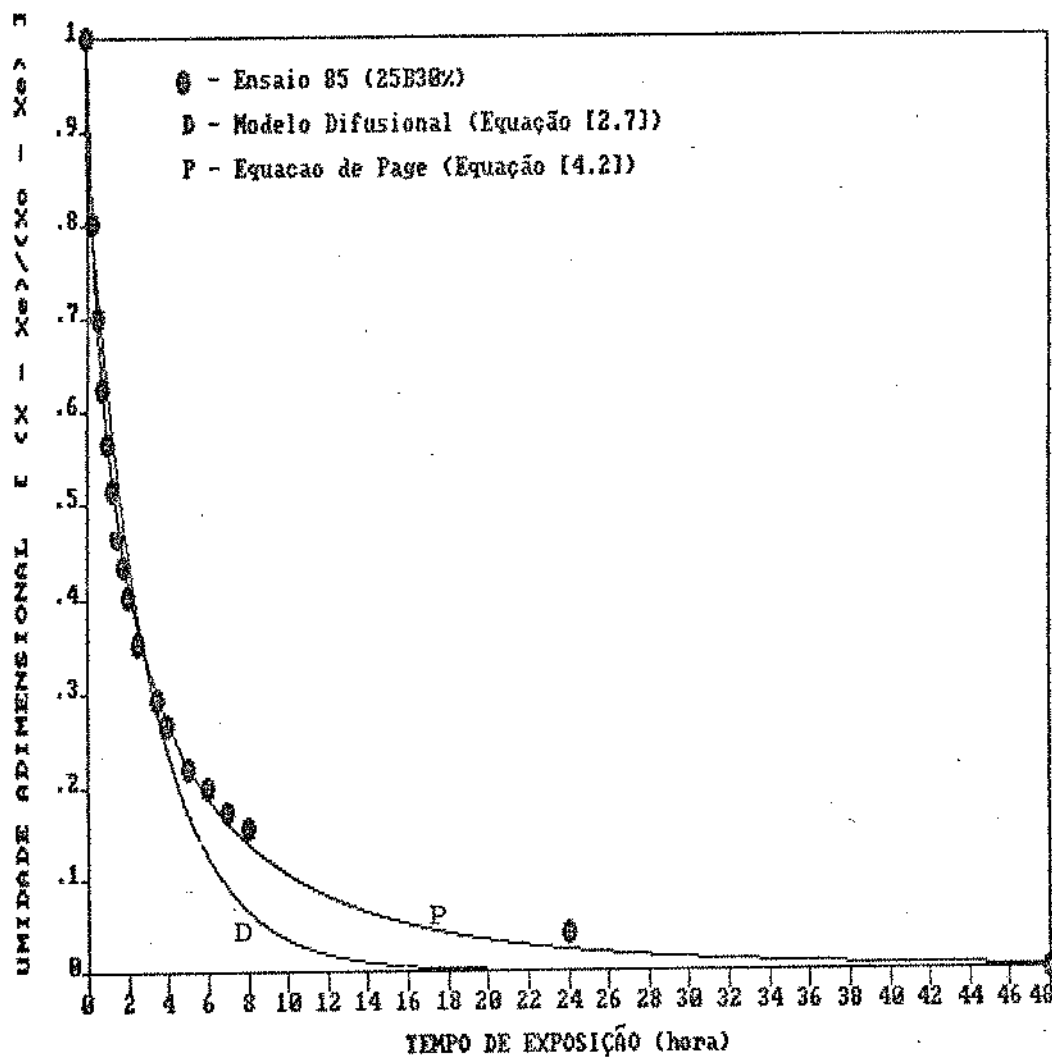


FIGURA 4.4 - Comparação entre os valores experimentais da variação da umidade adimensional em função do tempo de exposição e as curvas obtidas pelo modelo difusional e pela equação de Page. Temperatura 30°C, 30% de umidade relativa. Variedade IAC-25, brunido.

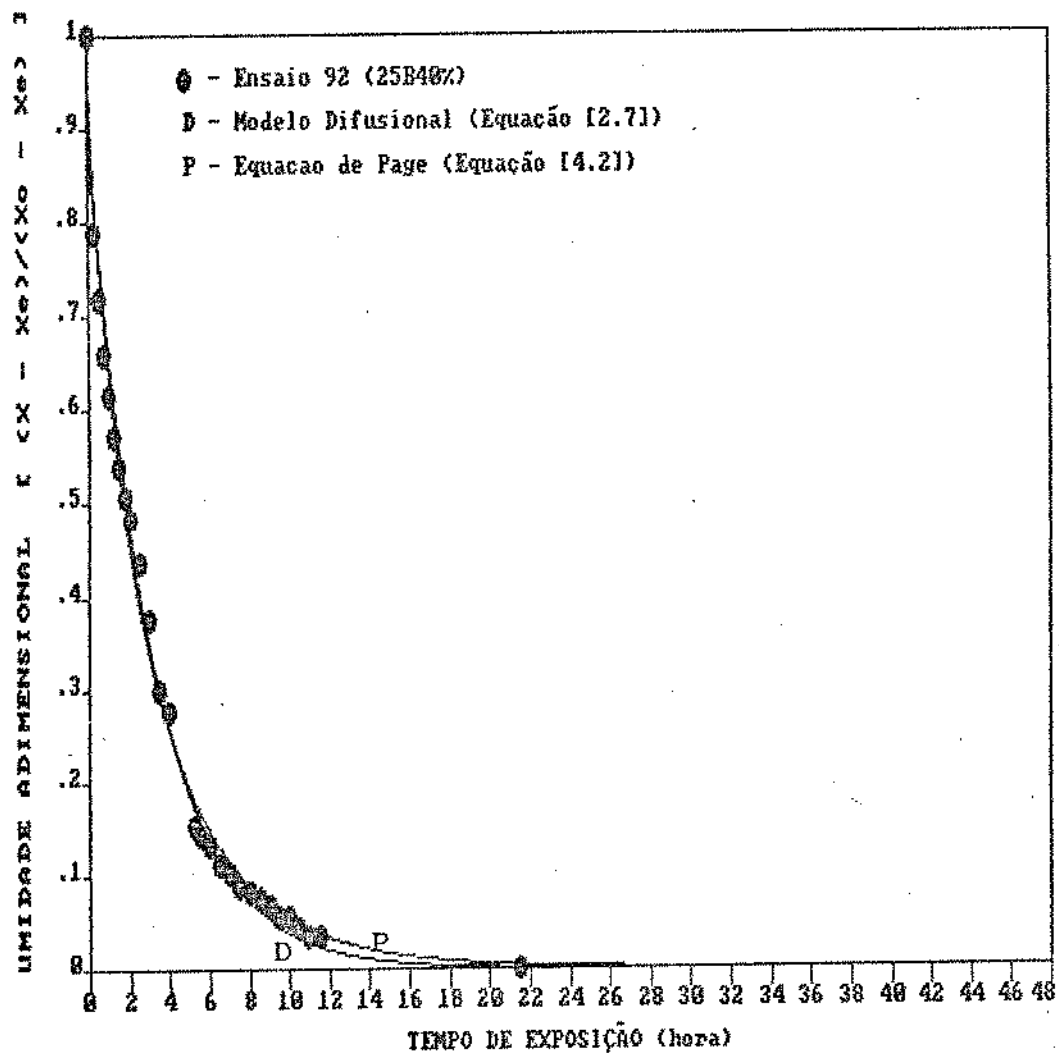


FIGURA 4.5 - Comparação entre os valores experimentais da variação da umidade adimensional em função do tempo de exposição e as curvas obtidas pelo modelo difusional e pela equação de Page. Temperatura 30°C, 40% de umidade relativa. Variedade IAC-25, brunido.

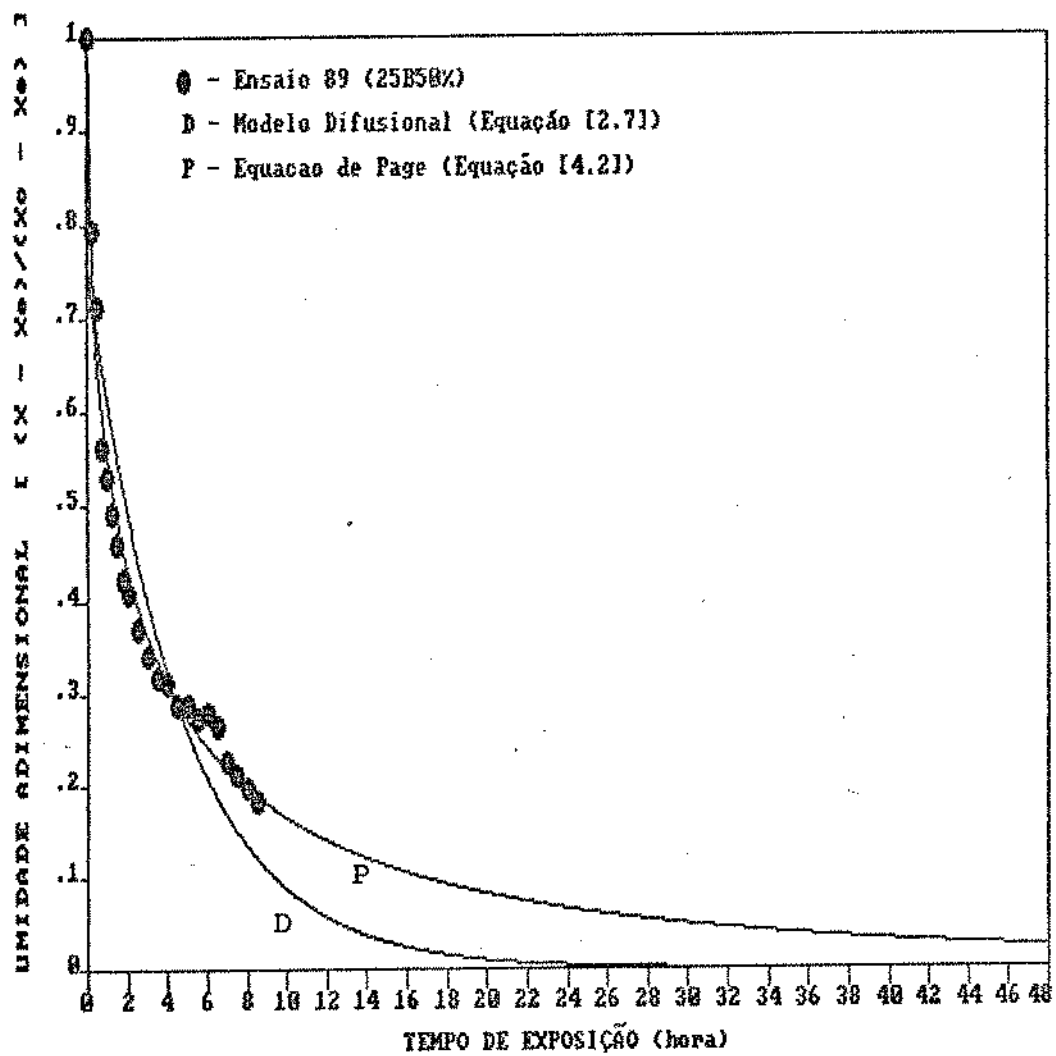


FIGURA 4.6 - Comparação entre os valores experimentais da variação da umidade adimensional em função do tempo de exposição e as curvas obtidas pelo modelo difusional e pela equação de Page. Temperatura 30°C, 50% de umidade relativa. Variedade IAC-25, brunido.

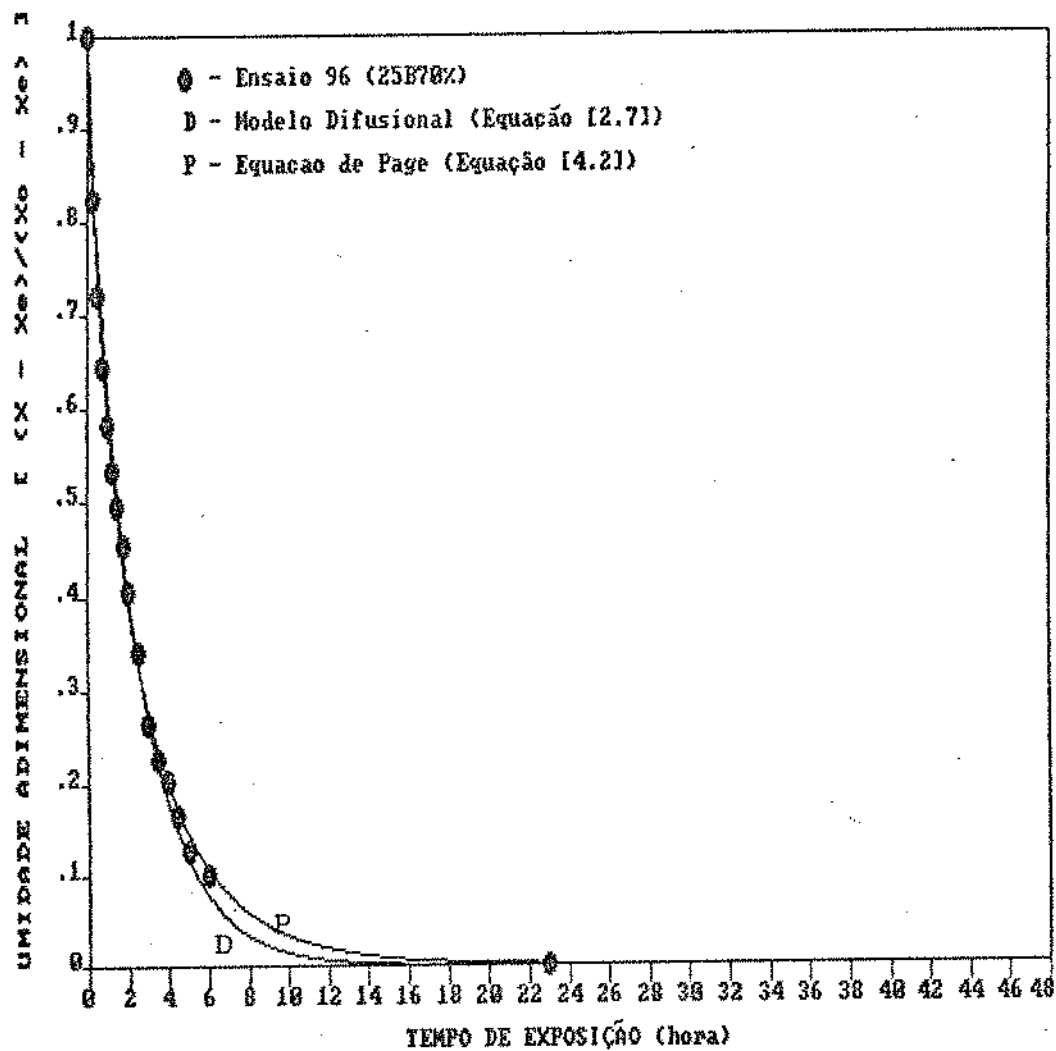


FIGURA 4.7 - Comparação entre os valores experimentais da variação da umidade adimensional em função do tempo de exposição e as curvas obtidas pelo modelo difusional e pela equação de Page. Temperatura 30°C, 70% de umidade relativa. Variedade IAC-25, brunido.

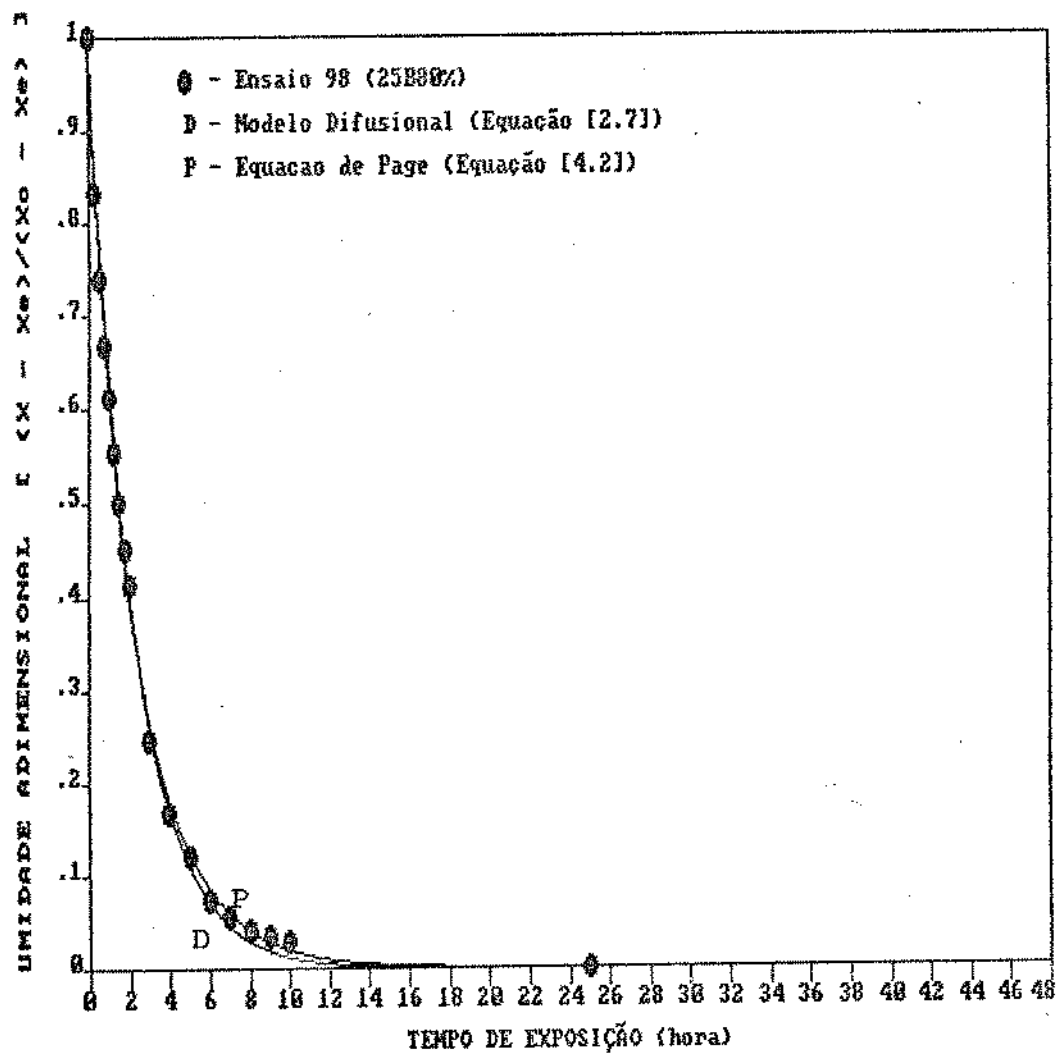


FIGURA 4.8 - Comparação entre os valores experimentais da variação da umidade adimensional em função do tempo de exposição e as curvas obtidas pelo modelo difusional e pela equação de Page. Temperatura 30°C, 80% de umidade relativa. Variedade IAC-25, brunido.

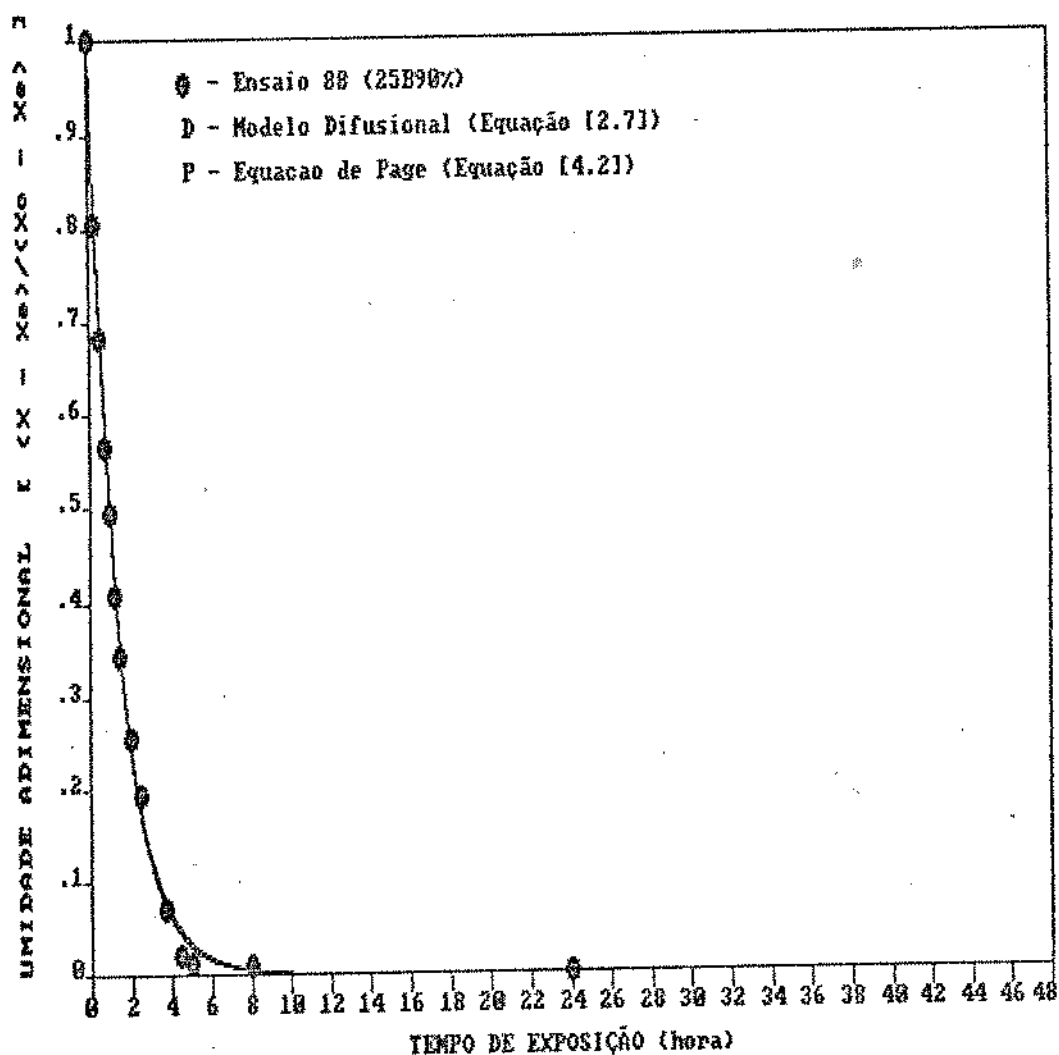


FIGURA 4.9 - Comparação entre os valores adimensionais da variação da umidade adimensional em função do tempo de exposição e as curvas obtidas pelo modelo difusional e pela equação de Page. Temperatura 30°C, 90% de umidade relativa. Variedade IAC-25, brunido.

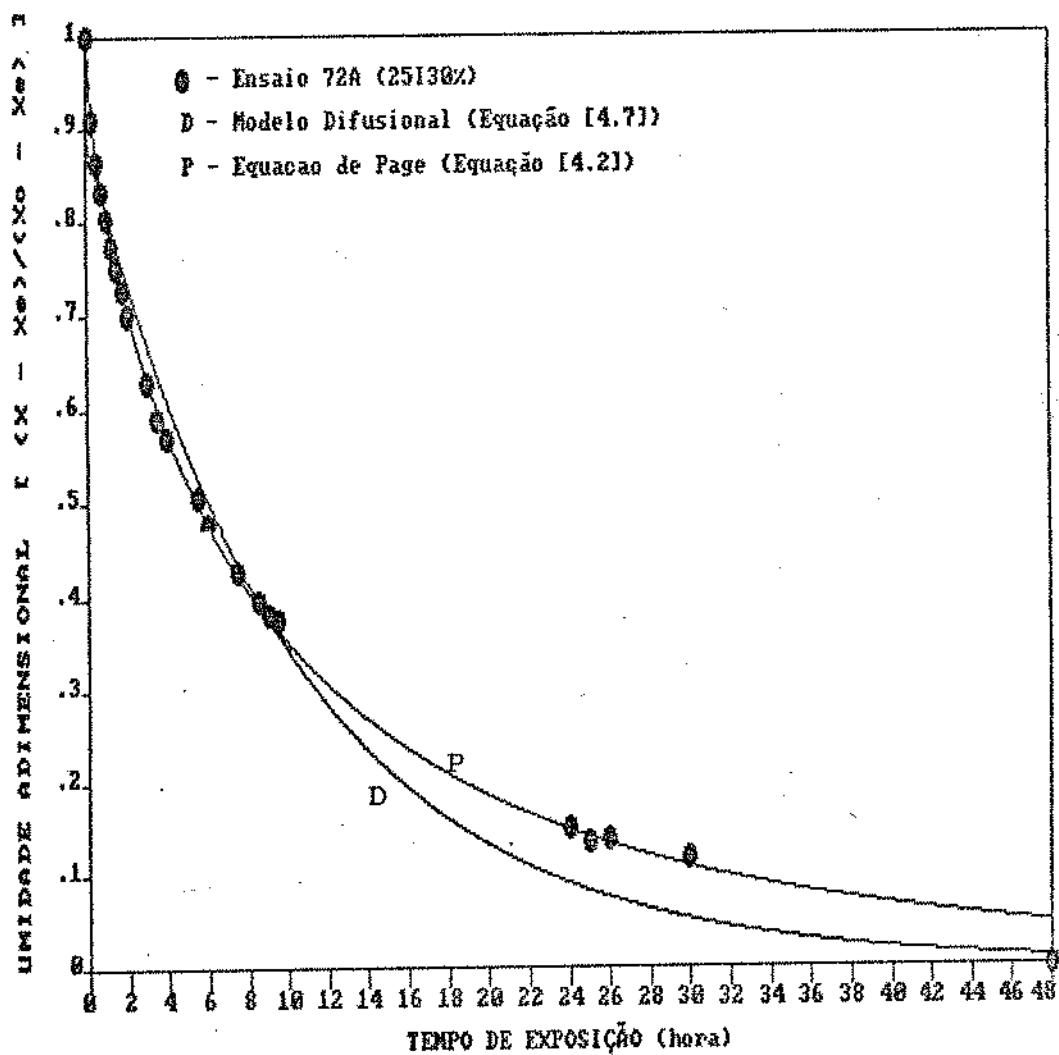


FIGURA 4.10 - Comparação entre os valores experimentais da variação da umidade adimensional em função do tempo de exposição e as curvas obtidas pelo modelo difusional e pela equação de Page. Temperatura 30°C, 30% de umidade relativa. Variedade IAC-25, integral.

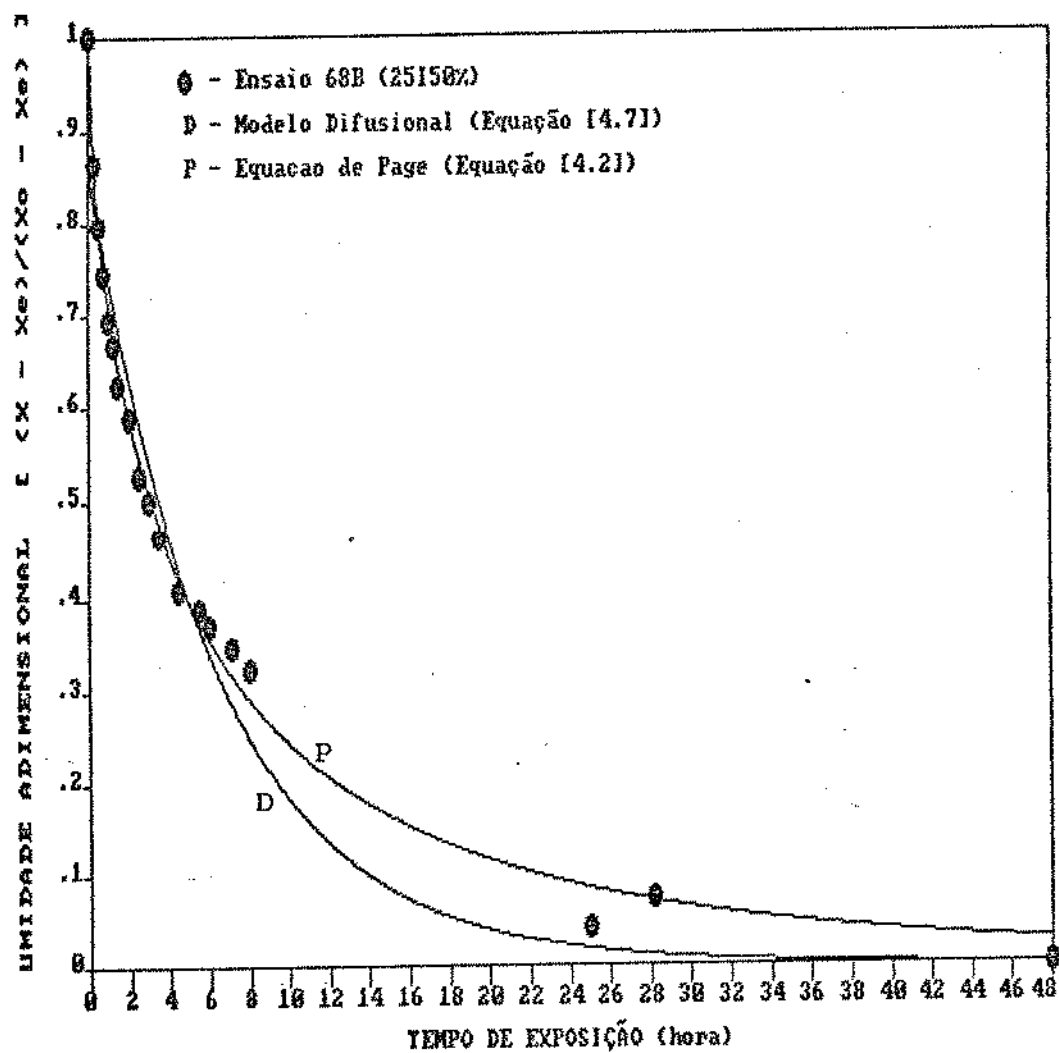


FIGURA 4.11 - Comparação entre os valores experimentais da variação da umidade edimensional em função do tempo de exposição e as curvas obtidas pelo modelo difusional e pela equação de Page. Temperatura 30°C, 50% de umidade relativa. Variedade IAC-25, integral.

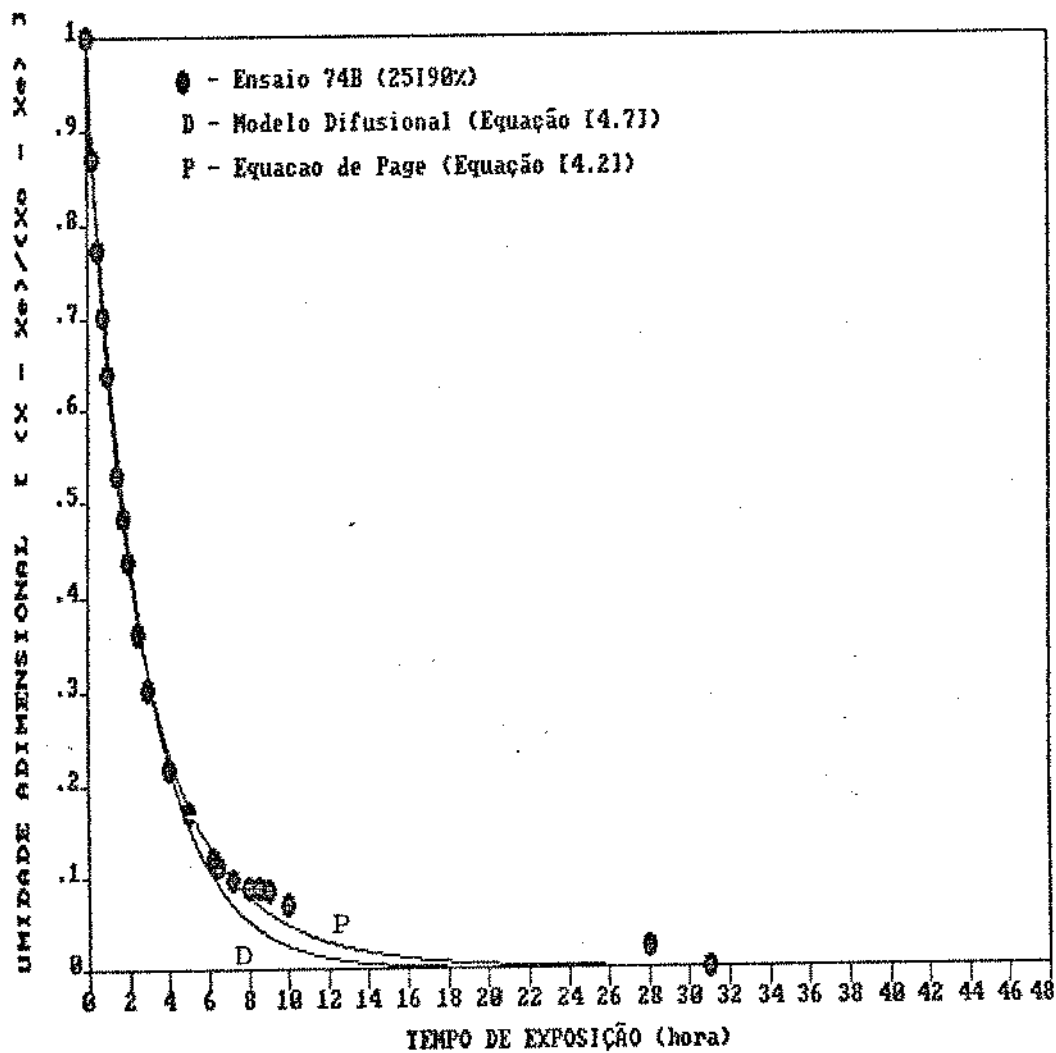


FIGURA 4.12 - Comparação entre os valores experimentais da variação da umidade adimensional em função do tempo de exposição e as curvas obtidas pelo modelo difusional e pela equação de Page. Temperatura 30°C, 50% de umidade relativa. Variedade IAC-25, integral.

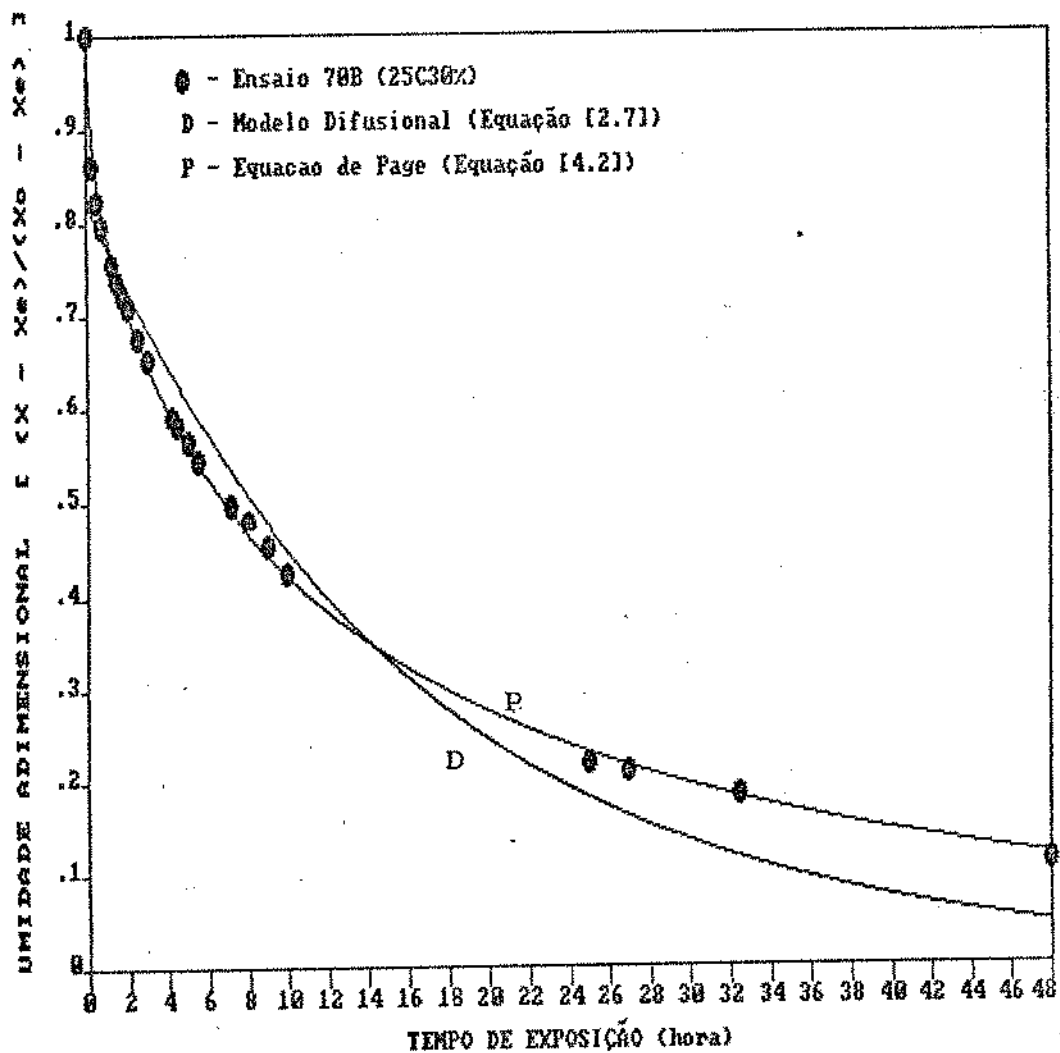


FIGURA 4.13 - Comparação entre os valores experimentais da unidade adimensional em função do tempo de exposição e as curvas obtidas pelo modelo difusional e pela equação de Page. Temperatura 30°C, 30% de umidade relativa. Variedade IAC-25, em casca.

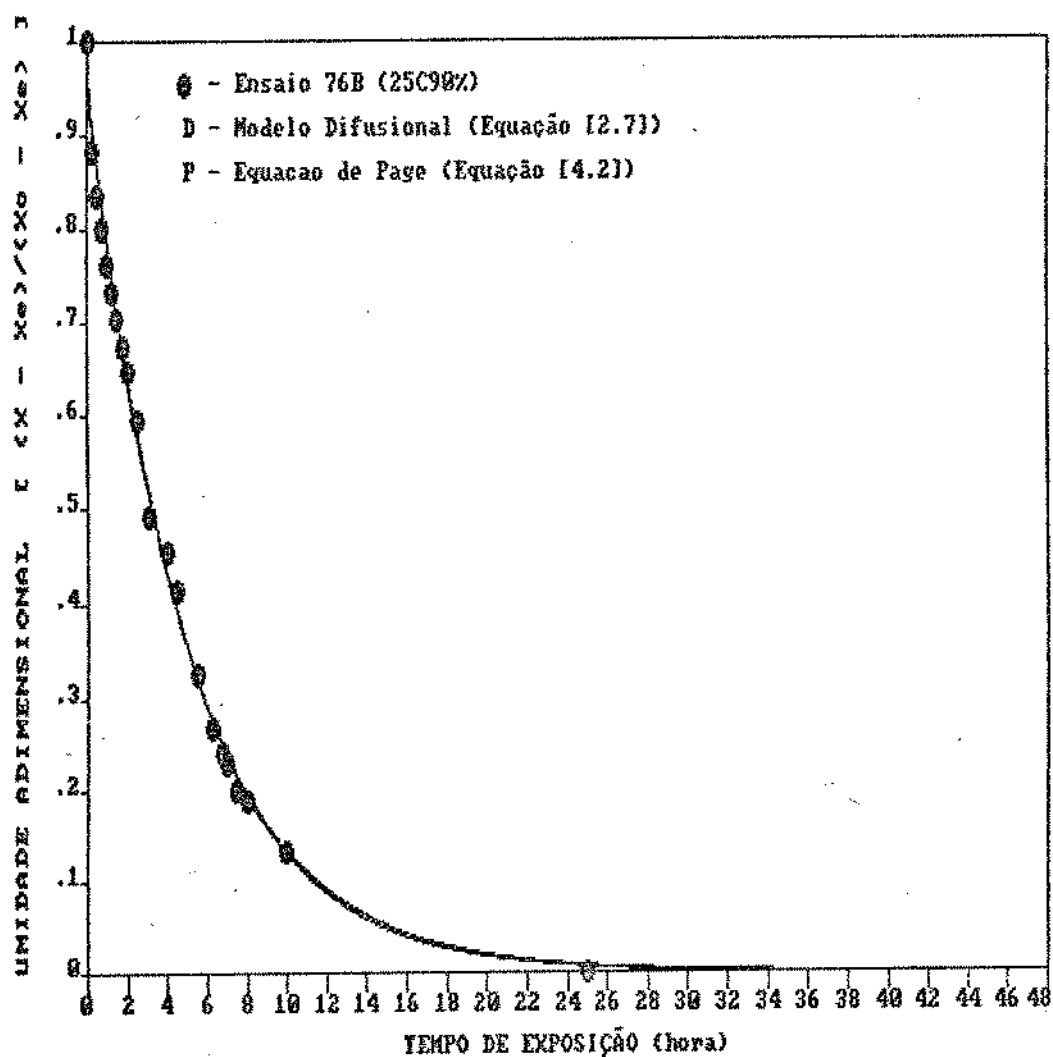


FIGURA 4.14 - Comparação entre os valores experimentais da umidade adimensional em função do tempo de exposição, e as curvas obtidas pelo modelo difusional e pela equação de Page. Temperatura 30°C, 90% de umidade relativa. Variedade IAC-25, em casca.

A não aplicabilidade do modelo difusional pode ser devida a uma dependência da difusividade em relação à concentração de umidade no interior do grão. Além deste fato, o arroz apresenta-se em diversos tamanhos e possui tal forma geométrica que o torna difícil de ser descrito tanto como esfera quanto como cilindro. No presente caso, entretanto, é provável que o fissuramento do grão seja a variável preponderante no fenômeno, como se verá na Seção 4.4. A rede de fissuras formada durante o processo de desorção ou adsorção produz canais preferenciais para a migração de umidade e o sólido deixa de ter a dimensão característica assumida na modelagem da Lei de Fick. O caráter distinto observado no comportamento das fissuras também poderia explicar o diferente ajuste do modelo difusional no caso da absorção e secagem.

Observando-se as curvas de cinética de adsorção e desorção, nota-se que os processos de adsorção apresentaram-se mais rápidos (maior valor da constante k), para os três tipos e as duas variedades do arroz, indicando que é mais fácil o grão absorver do que perder umidade. Este comportamento pode ser visualizado quantitativamente no valor da constante k da Tabela 4.1 e da Tabela 4.2. As umidades relativas iguais ou maiores que 70% (adsorção) correspondem os maiores valores da constante k e, portanto, da difusividade. Isto pode ser explicado pelo aumento da difusividade com a umidade do arroz: nos ensaios de adsorção, a camada externa do grão se umidece mais pois atinge uma umidade de equilíbrio maior, e com isto facilita o transporte de umidade até o centro. Já no caso de desorção ocorre o contrário e forma-se uma camada externa seca e mais impermeável.

Esta variação de k (e consequentemente de) com a umidade relativa do ar (e consequentemente com a umidade de equilíbrio) é mais pronunciada no arroz integral e com casca do que no arroz brunido. A casca do arroz, portanto, tende a proteger o grão servindo como tampão no caso de variações bruscas na umidade do ambiente, mas essa proteção é mais segura no caso de desorção. Isto pode explicar a maior taxa de quebra encontrada por alguns autores, para o caso de adsorção.

A uma mesma umidade relativa (como era de se esperar) o arroz em casca apresentou maior resistência à transferência de umidade, expressa no tempo necessário para se atingir o equilíbrio. A camada de aleurona, bem como a casca, oferecem resistências adicionais à transferência de umidade entre o centro do grão e o exterior.

Na equação de Page (equação [2.11]), as constantes k e n parecem estar relacionadas com as condições externas e com a resistência interna, respectivamente (Misra e Brooker, 1980). No presente estudo não foi possível uma conclusão a este respeito, uma vez que tais valores (Tabela 4.2) não apresentam correlação significativa com o tipo de grão ou com a umidade relativa do ar.

No modelo Difusional, como já foi analisado, a constante k está relacionada com a difusividade aparente (D_{ap}) e com a dimensão característica do grão. Para avaliar o comportamento da constante k em função do tipo do grão e da umidade relativa do ar, foi realizado o ajuste da equação

simplificada do modelo Difusional (equação [2.7]) para os pontos experimentais de umidade adimensional (X^*) obtidos nas primeiras 5 horas de tratamento. Os resultados são mostrados na Tabela 4.5.

Para o arroz brunido, não foi possível estabelecer uma relação entre o valor da constante k e a umidade relativa. Os valores de k obtidos nas condições de 70% de umidade relativa não são confiáveis, devido à pouca precisão obtida com a pequena variação de umidade no grão.

Para o tipo integral, nas duas variedades, o valor da constante apresentou seus menores valores para as condições de 30% e 50% UR, não mostrando diferença significativa entre estas duas condições. Este valor aumentou para a condição de 90%.

Para o tipo em casca, o valor da constante aumentou com o aumento da umidade relativa do ar. Não há diferença significativa entre o valor de k , para a variedade IAC-165, nas condições de 30% e 50% UR. Na variedade IAC-25, k apresentou o menor valor para a condição a 30% de umidade relativa.

A Figura 4.15 mostra o comportamento do valor da constante k em função da umidade relativa do ar ambiente, para as duas variedades nos tipos "em casca" e "integral". Nota-se o aumento de seu valor com o aumento da umidade relativa do ar, indicando uma maior facilidade à transferência de umidade a altas umidades relativas. Observa-se também que há maior resistência à transferência de umidade no caso do arroz em casca, já que este apresenta um valor de k menor que o obtido para o arroz integral, dado um mesmo valor de umidade relativa.

TABELA 4.5 - Resultados do ajuste do modelo Difusional para as primeiras cinco horas de tratamento.

VAR	TIP	URF	ENS	A	k	SQR
25	B	30	85	0,71723	0,26062	0,00386
		40	92	0,80276	0,26206	0,00126
		50	83	0,69222	0,09338	0,00460
			89	0,60980	0,17626	0,00443
		70	78	0,86408	0,45305	0,00405
			96	0,85208	0,37108	0,00058
		80	98	0,92780	0,41734	0,00072
		90	80	0,77499	0,32661	0,00684
			88	0,95253	0,67449	0,00153
			95	0,76489	0,49947	0,01061
	I	30	72A	0,89931	0,11816	0,00034
			72B	0,90698	0,12463	0,00050
		50	68A	0,84606	0,12493	0,00160
			68B	0,81885	0,16326	0,00122
		70	64A	1,22145	0,36385	0,02502
			64B	1,15901	0,37007	0,01537
		90	74A	0,93903	0,36752	0,00018
			74B	0,90975	0,35885	0,00063
	C	30	70A	0,84267	0,06931	0,00029
			70B	0,83486	0,08054	0,00025
		50	66A	0,81678	0,10886	0,00160
			66B	0,82735	0,11274	0,00174
		70	63A	1,14300	0,15375	0,03456
			63B	1,14820	0,13020	0,02079
		90	76A	0,91507	0,19788	0,00138
			76B	0,91815	0,18021	0,00137
165	B	30	84	0,66485	0,22426	0,00712
		40	93	0,74659	0,25538	0,00312
		50	82	0,65802	0,09841	0,00253
			90	0,73975	0,32923	0,00338
		70	77	0,89029	0,46338	0,00573
			97	0,79352	0,28513	0,00193
		80	99	0,80915	0,38854	0,00573
		90	81	0,73137	0,27953	0,00952
			87	0,72362	0,30748	0,00459
			94	0,74617	0,18919	0,00281
	I	30	71A	0,87911	0,12045	0,00061
			71B	0,89161	0,11892	0,00055
		50	67A	0,83202	0,10833	0,00253
			67B	0,82021	0,10868	0,00292
		70	62A	0,97101	0,38668	0,00115
			62B	1,20458	0,64022	0,02390
		90	73A	0,90690	0,32439	0,00738
			73B	0,89922	0,30419	0,00132
	C	30	69A	0,81509	0,07675	0,00034
			69B	0,82214	0,07478	0,00036
		50	65A	0,81067	0,07595	0,00069
			65B	0,85422	0,07631	0,00082
		70	61A	1,73908	1,06204	0,23715
			61B	1,21349	0,41467	0,02572
		90	75A	0,91763	0,10404	0,00012
			75B	0,90945	0,10273	0,00005

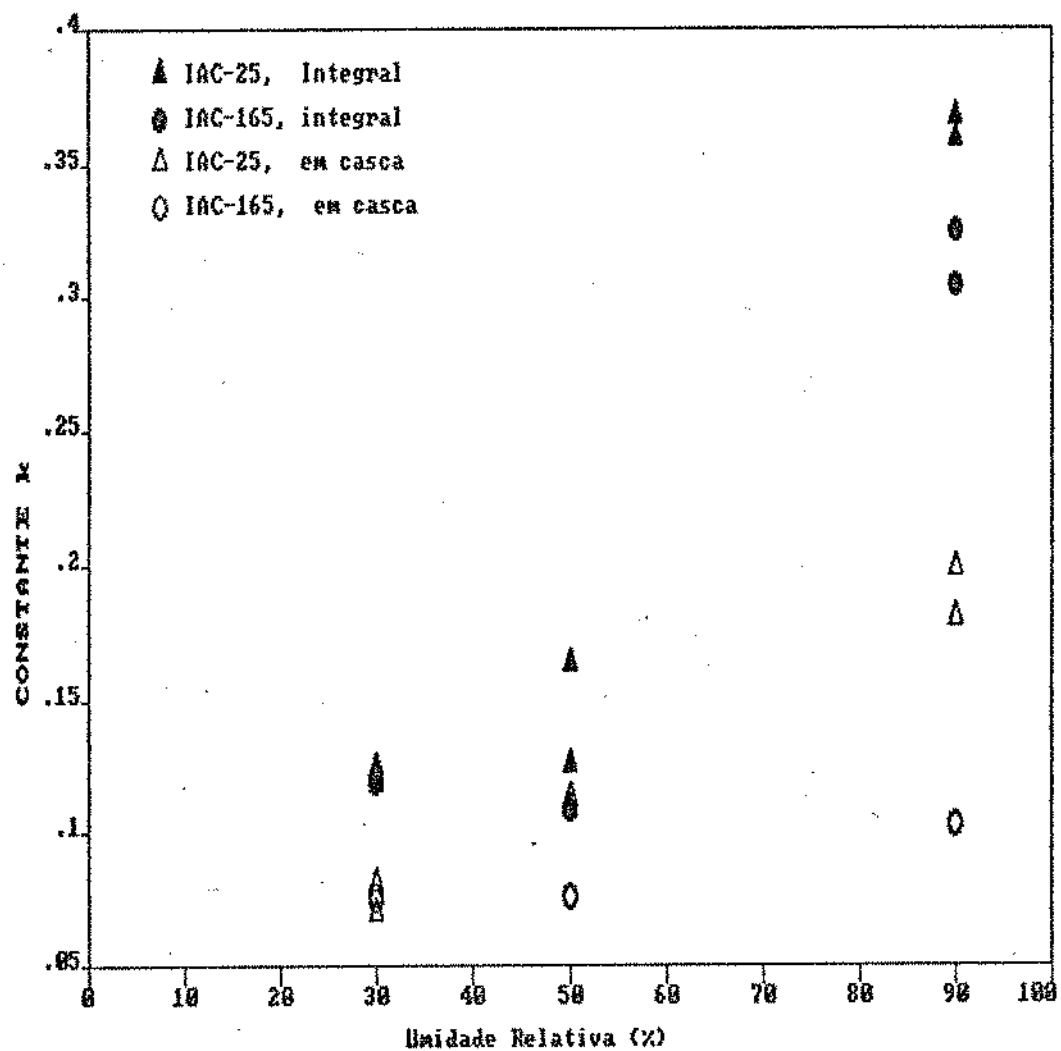


FIGURA 4.15 - Valor da constante k da equação 2.7 $X^*=A.exp(-k.t)$ em função da umidade relativa. Variedades IAC-25 e IAC-165 integral e em casca.

4.3 - ISOTERMAS DE SORÇÃO -

A relação entre a umidade relativa (ou atividade de água) do ar ambiente e a umidade de um material higroscópico em equilíbrio com esse ar pode ser expressa gráfica e analiticamente, para uma dada temperatura, por uma isoterma de sorção. Existem dois caminhos para um produto atingir a umidade de equilíbrio: absorvendo água do ambiente ou cedendo água para o ambiente. Para uma mesma condição de ar, a umidade de equilíbrio do produto que perde água é maior que a umidade quando o produto absorve água. Este fenômeno é chamado de histerese e, por esta razão, costuma-se representar a relação de equilíbrio por uma isoterma de adsorção (quando todas as condições de equilíbrio são atingidas pelo ganho de água) e por uma isoterma de desorção (quando todas as condições de equilíbrio são atingidas pela perda de água).

Não existe uma explicação física geral para o fenômeno de histerese, sendo comum atribuí-la a uma condição de pseudo-equilíbrio das forças capilares, ou então a reações irreversíveis que ocorrem durante os processos de secagem e hidratação.

O efeito de histerese nem sempre é significativo e a diferença de umidade existente entre as isotermas de desorção e adsorção depende do material em estudo. Para arroz em casca, Putranon e col. (1979) determinaram que a histerese tem pequeno efeito na faixa de 15 a 95% de umidade relativa a 25°C. Breese (1955) verificou que o arroz em casca apresenta histerese menor que 1,8 % no intervalo de 50 a 70% UR, sendo que no intervalo de

20 a 80% UR a diferença de umidade entre adsorção e desorção mantém-se em torno de 1%. Pequena histerese foi encontrada por Juliano (1964) para arroz em casca e por Houston (1952) para arroz integral. Todos estes autores utilizaram método estático para a determinação da umidade de equilíbrio.

Na presente investigação, os dados de umidade de equilíbrio foram uma consequência e não o objetivo direto da pesquisa. Não houve, portanto, preocupação em levantar curvas completas de adsorção e desorção, mas sim correlacionar os dados de equilíbrio aqui obtidos.

Como já foi descrito no Capítulo 3, este trabalho utilizou o método dinâmico para a determinação da umidade de equilíbrio. A Tabela A.1 do Apêndice lista as umidades de equilíbrio do cereal obtidas para cada valor de atividade de água no ar, para as duas variedades estudadas. O tempo para a massa de grãos atingir o equilíbrio variou de 24 a 168 horas de exposição, de acordo com o valor da umidade relativa do ar e com o tipo do arroz (brunido, integral e em casca), não havendo diferença significativa entre as variedades estudadas. Para atingir a umidade de equilíbrio, o arroz sofreu um processo de desorção para as condições de 30, 40 e 50% de umidade relativa e um processo de adsorção ocorreu para as umidades relativas de 70, 80 e 90%.

Os resultados indicam uma maior higroscopicidade para o arroz brunido sendo que o arroz em casca apresentou a menor porcentagem de umidade a um mesmo valor de atividade de água. Não houve diferença significativa entre as duas variedades

estudadas. Assim, por exemplo, a 50% de umidade relativa, à temperatura de 30°C, grãos da variedade IAC-25 apresentam um conteúdo de umidade de cerca de 10,7% (bs) se estiverem ainda na casca. Uma vez descascados, estes grãos apresentam 11,8% de umidade e, se estiverem brunidos possuem 13,4% de umidade. Para a variedade IAC-165, estes valores de umidade são, respectivamente, 10,7%, 12,3% e 13,2%.

Foi observada certa imprecisão nas determinações da umidade final dos grãos devido a limitações nos controles dos equipamentos que provocaram flutuações no valor da umidade relativa e da temperatura do ar de processo. No entanto, como verificado na Tabela 4.3, foram poucas as condições cujo ajuste da equação [4.2] ou [4.3] forneceu um valor de umidade de equilíbrio significativamente distinto daquele obtido experimentalmente.

Para a construção das isotermas de sorção, foram ajustados os parâmetros das três equações mais utilizadas em alimentos: GAB, Halsey e Henderson, descritas a seguir.

O modelo de GAB (Guggenheim-Anderson-de Boer), desenvolvido a partir do modelo BET, leva em conta três constantes e é expresso pela seguinte equação:

$$\frac{X}{X_0} = \frac{(C.K.a_v)}{(1 - K.a_v).(1 - K.a_v + C.K.a_v)} \quad \dots\dots[4.51]$$

onde:

- a_w é a atividade de água
- X_0 é o conteúdo de umidade correspondente à monocamada (BET);
- C é uma constante relacionada com a diferença entre o calor de sorção da água da monocamada e das demais camadas, sendo função da temperatura;
- K é uma constante que leva em conta o calor de sorção da água, sendo também função da temperatura.

A equação de GAB tem sido utilizada com sucesso para estimar a umidade de equilíbrio de frutas secas (Maroulis, Tsami e Marinos-Kouris, 1988), nozes, sementes oleaginosas, condimentos e alimentos amiláceos (Lomauro, Bakshi e Labuza, 1985), para uma grande faixa de atividade de água (0,1 a 0,9).

A equação de Halsey foi proposta em 1948 e assume a forma

$$a_w = e^{(-a/RT.M^r)} \dots\dots\dots [4.6]$$

onde a e r são constantes e $M = X / X_m$, sendo X_m a umidade da monocamada.

Iglesias e Chirife (1976a) propuseram uma modificação na equação [4.6], na forma

$$a_w = e^{(-C/X^r)} \dots\dots\dots [4.7]$$

onde C é uma constante.

A equação de Halsey descreve razoavelmente bem (Iglesias, Chirife e Lombardi, 1975; Iglesias e Chirife, 1976b) a umidade de equilíbrio de vários alimentos na faixa de atividade de água de 0,10 a 0,80. Lomauro, Bakshi e Labuza (1985) observaram que esta equação descreve bem o comportamento de nozes e oleaginosas e, razoavelmente, o comportamento de produtos amiláceos.

A equação de Henderson é expressa como:

$$1 - a_w = e^{(-k \cdot X^n)} \dots\dots\dots [4.8]$$

onde k e n são constantes experimentais.

A equação de Henderson é uma das mais antigas e também uma das mais estudadas equações para a determinação da umidade de equilíbrio de alimentos, mais especificamente em cereais. Agrawal, Clary e Nelson (1971) encontraram boa aplicabilidade desta equação para arroz em casca na faixa de atividade de água de 0,25 a 0,75. Para alimentos amiláceos e para frutas, Boquet, Chirife e Iglesias (1978) observaram que a equação de Henderson apresenta bons resultados. Para arroz em casca, na faixa de atividade de água de 0,036-0,823, a equação de Henderson apresentou melhor resultado que a equação de Halsey, segundo Aguerre, Suárez e Viollaz, (1983).

Os parâmetros das equações [4.5], [4.7] e [4.8] foram ajustados através de regressão não-linear no SAS - Statistical Analysis System, sendo os resultados apresentados na Tabela 4.6.

As duas variedades de arroz apresentaram um comportamento higroscópico semelhante. Nas Figuras 4.16 a 4.18 são apresentados os pontos experimentais e as funções ajustadas, para cada tipo de arroz da variedade IAC-25. Os resultados não são animadores. É bem verdade que as curvas exibem a forma sigmoidal, mas os pontos experimentais não são responsáveis pela definição desta curvatura. Na maioria dos casos uma reta poderia correlacionar melhor os resultados (exceto na origem). É importante salientar que os ajustes foram provavelmente prejudicados pela ausência de valores experimentais para $x < 0.3$, que são fundamentais para definir a forma característica da isoterma de sorção.

Um segundo fator que parece ser relevante, sobretudo para arroz brunido, é a presença de uma histerese, que será discutida posteriormente.

Pela Tabela 4.6 pode-se notar que o ajuste da equação de GAB, em geral, forneceu os menores valores para a soma dos quadrados dos resíduos (SQR), sendo os maiores valores obtidos para o ajuste da equação de Halsey. O ajuste da equação de Henderson, por sua vez, apresenta ainda valores satisfatórios para SQR, sendo que esta equação descreveu bem o comportamento das duas variedades nos três tipos.

TABELA 4.6 - RESULTADOS DOS AJUSTES DE ISOTERMAS DE SORÇÃO

A) EQUAÇÃO DE GAB (Equação [4.5])

VAR	TIPO	X°	C	k	SQR
25	B	0,08522	45,8276	0,69519	0,000292
	I	0,08868	10,5393	0,68231	0,000058
	C	0,09299	6,6462	0,61221	0,000175
165	B	0,08432	51,4783	0,71863	0,000416
	I	0,09080	12,3486	0,68861	0,000070
	C	0,08983	9,3544	0,59786	0,000079

B) EQUAÇÃO DE HALSEY MODIFICADA (Eq. [4.7])

VAR	TIPO	C	R	SQR
25	B	0,002061	2,77961	0,011952
	I	0,006692	2,09204	0,013493
	C	0,008142	1,86663	0,032292
165	B	0,002610	2,68868	0,009269
	I	0,007003	2,12846	0,011103
	C	0,004240	2,17929	0,025354

C) EQUAÇÃO DE HENDERSON (Eq. [4.8])

VAR	TIPO	K	n	SQR
25	B	67,9577	2,24071	0,002426
	I	43,3346	1,91152	0,000717
	C	50,1031	1,85515	0,007309
165	B	50,5072	2,10615	0,004381
	I	42,0051	1,94787	0,000955
	C	85,1239	2,11105	0,003676

B:BRUNIDO I:INTEGRAL C:COM CASCA

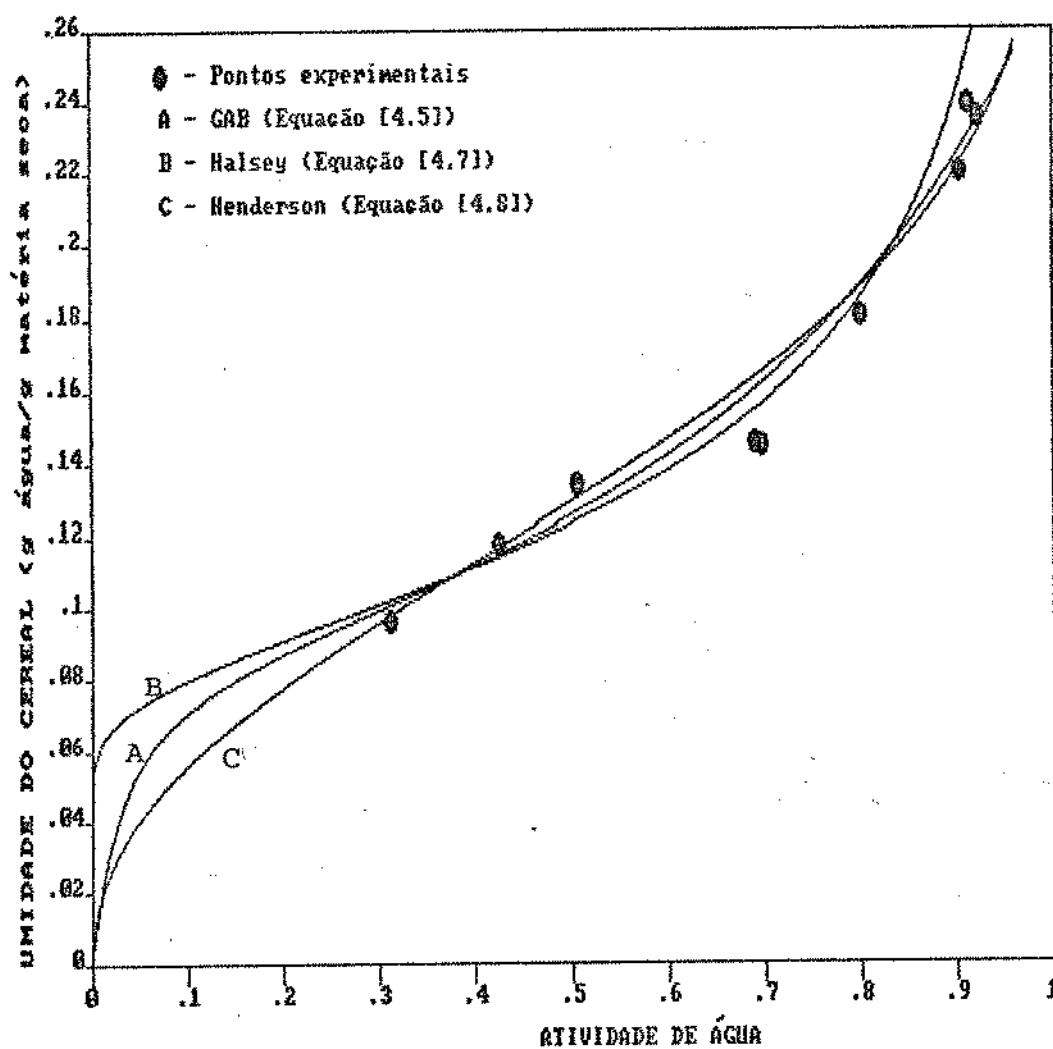


FIGURA 4.16 - Comparação entre isotermas de sorção segundo as equações de GAB, Halsey e Henderson. Temperatura 30°C. Variedade IAC-25, brunido.

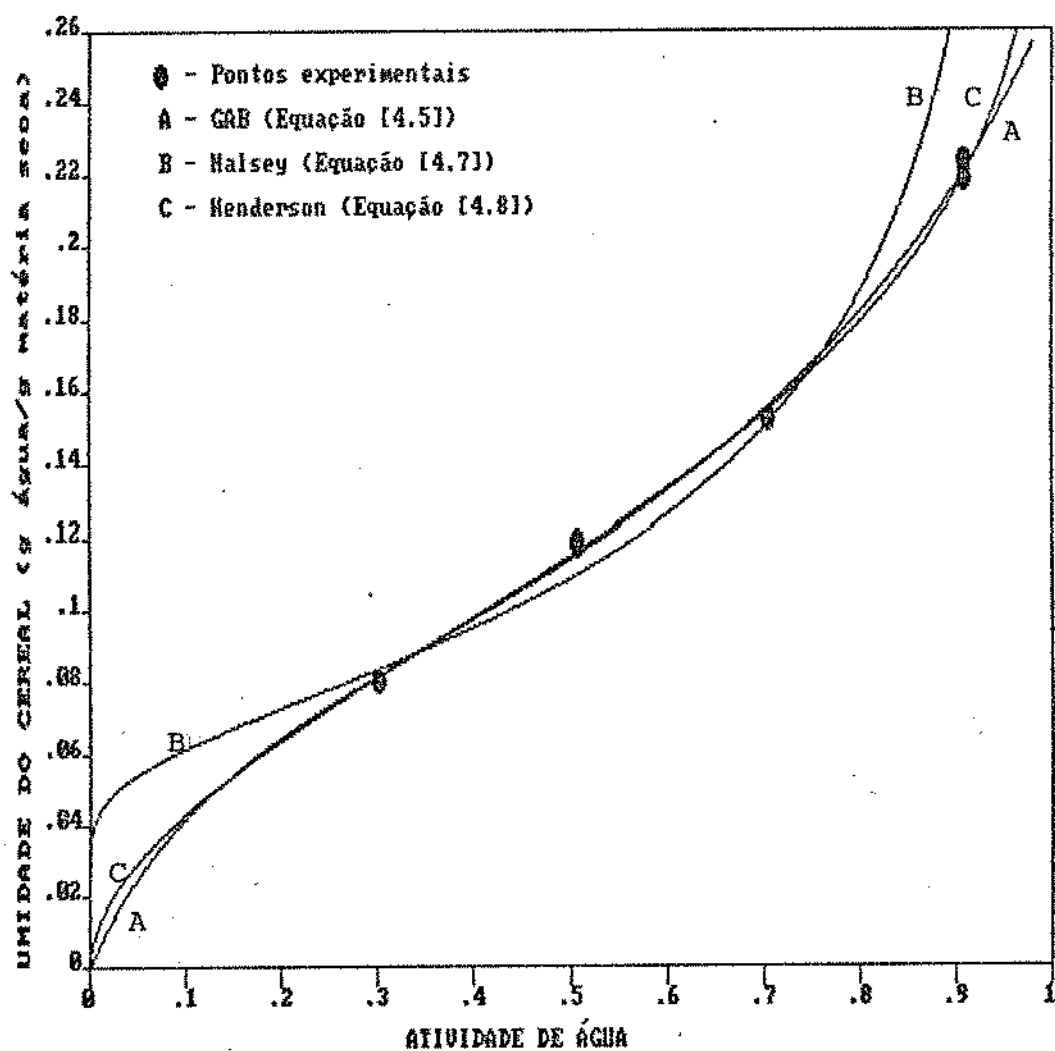


FIGURA 4.17 - Comparação entre isotermas de sorção segundo as equações de GAB, Halsey e Henderson. Temperatura 30°C. Variedade IAC-25, integral.

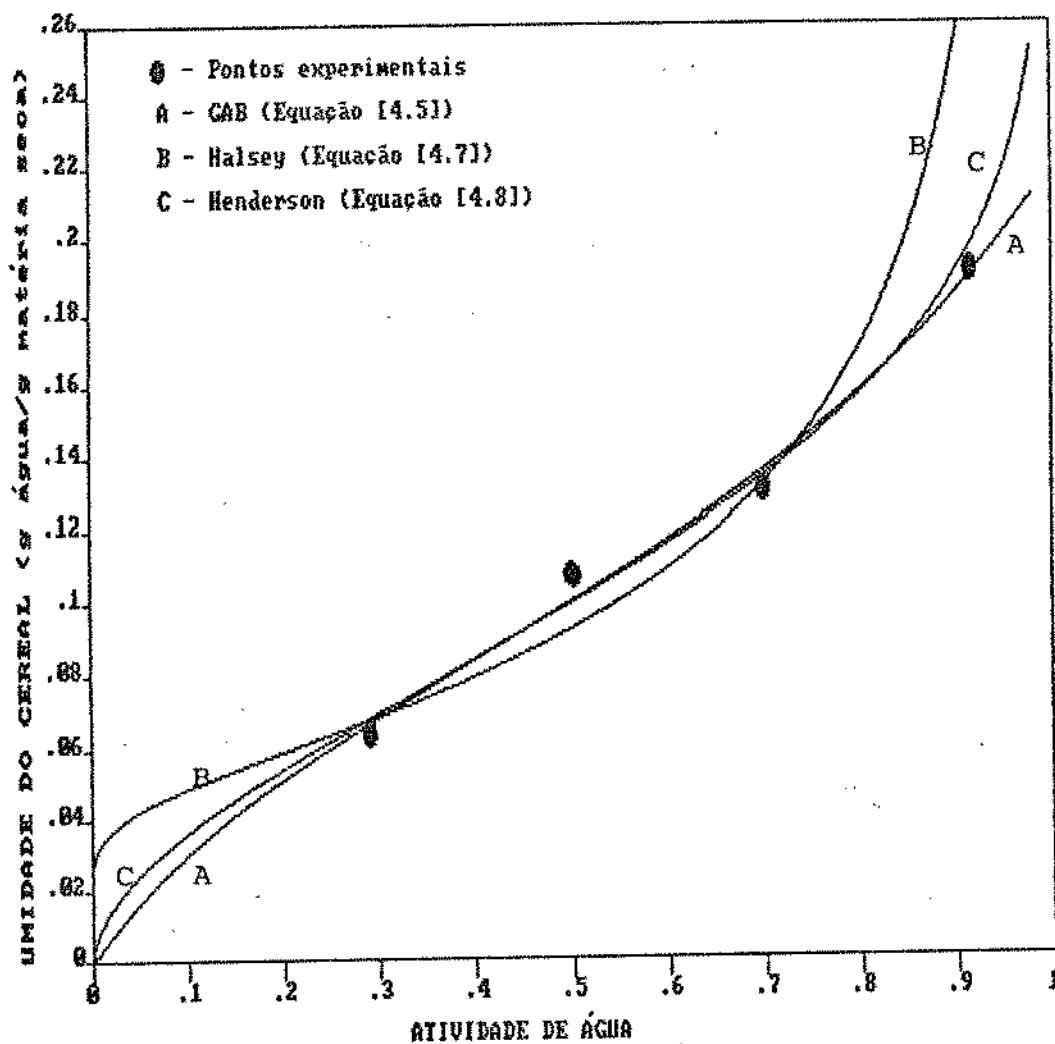


FIGURA 4.18 - Comparação entre isotermas de sorção segundo as equações de GAB, Halsey e Henderson. Temperatura 30°C. Variedade IAC-25, em casca.

As Figuras 4.16 a 4.18 confirmam essas conclusões, pois o comportamento da equação de GAB foi muito semelhante ao de Henderson, enquanto que a equação de Halsey apresenta um ajuste inaceitável.

Uma análise visual dos pontos experimentais lançados no gráfico da Figura 4.16, assim como no equivalente da variedade IAC-165, revela claramente a possibilidade de agrupar os valores de equilíbrio do arroz brunido em duas categorias: uma tendência para os valores menores que 60% de umidade relativa e outra para aqueles acima deste valor. O comportamento geral parece se enquadrar muito bem como o de um sistema que apresenta o fenômeno de histerese.

No sentido de verificar essa hipótese, foi feita uma análise estatística usando os modelos de GAB e Henderson aplicados a dois trechos: um deles considera a origem, os tres pontos com umidade relativa menor que 60% e o ponto a 90% UR; o outro também considerou a origem e os tres pontos maiores que 60% UR.

Os resultados mostram um ajuste bem melhor, sobretudo para a equação de Henderson, e os parâmetros encontrados estão na Tabela 4.7. Não se obteve uma correlação para a variedade IAC-165 para o modelo de GAB, provavelmente devido ao pequeno número de pares de valores, insuficientes para definir as tres constantes desta equação. Segundo Bizot (1983), é necessário um mínimo de 4 pares de pontos experimentais (além do valor zero) para a correta definição da isoterma de sorção pelo modelo de

TABELA 4.7 - RESULTADOS DOS AJUSTES DE ISOTERMAS DE ADSORÇÃO E DESORÇÃO PARA ARROZ BRUNIDO

A) EQUAÇÃO DE GAB (Eq. (4.5))

VAR	TIPO	X ₀	C	k	SQR	OBS
25	B	0,08025	6,9413	0,740538	0,000117	A
		0,11756	9,1093	0,587827	0,000139	D

B) EQUAÇÃO DE HALSEY MODIFICADA (Eq. (4.7))

VAR	TIPO	C	R	SQR	OBS
25	B	0,001444	2,87302	0,006636	A
		0,002279	2,73525	0,011638	D
165	B	0,002408	2,62775	0,001163	A
		0,003091	2,61257	0,008356	D

C) EQUAÇÃO DE HENDERSON (Eq. (4.8))

VAR	TIPO	K	n	SQR	OBS
25	B	23,2843	1,54510	0,000314	A
		59,2008	2,18316	0,000880	D
165	B	17,6063	1,41027	0,000968	A
		41,8877	2,02513	0,001615	D

A : ADSORÇÃO D : DESORÇÃO

A Figura 4.19 apresenta as curvas obtidas pela equação de Henderson, no caso da variedade IAC-25. Observa-se que as duas isotermas definem bem um processo de histerese, bem acentuada. A 60% de UR, por exemplo, a curva de desorção apresenta uma umidade de equilíbrio 20% maior do que aquela obtida pela curva de adsorção. Esta diferença é muito maior que os valores encontrados na literatura, por autores que trabalharam com arroz em casca.

Reavaliando-se as curvas das Figuras 4.17 e 4.18, considerando agora a possibilidade de se encontrar efeitos da histerese no arroz em casca e no arroz integral, concluímos ser aceitável assumirmos sua existência, apesar dos poucos pontos experimentais levantados. Nesses casos a ordem de grandeza da histerese teria a mesma magnitude da encontrada por Breese (1955), mas será preciso maior número de dados experimentais para uma conclusão definitiva.

A tendência salientada na Figura 4.19 merece um alerta especial. É pouco provável que um processo completo de adsorção (partindo do arroz completamente seco) ou de desorção (partindo do produto totalmente umedecido) produza isotermas coincidentes com os da figura. Não existe nem mesmo uma sustentação física para tanto e não se encontrou na literatura referências a histereses com essa ordem de grandeza.

É inegável, entretanto, que ao se partir de arroz com cerca de 0,14 g de água/g de massa seca, os mecanismos de

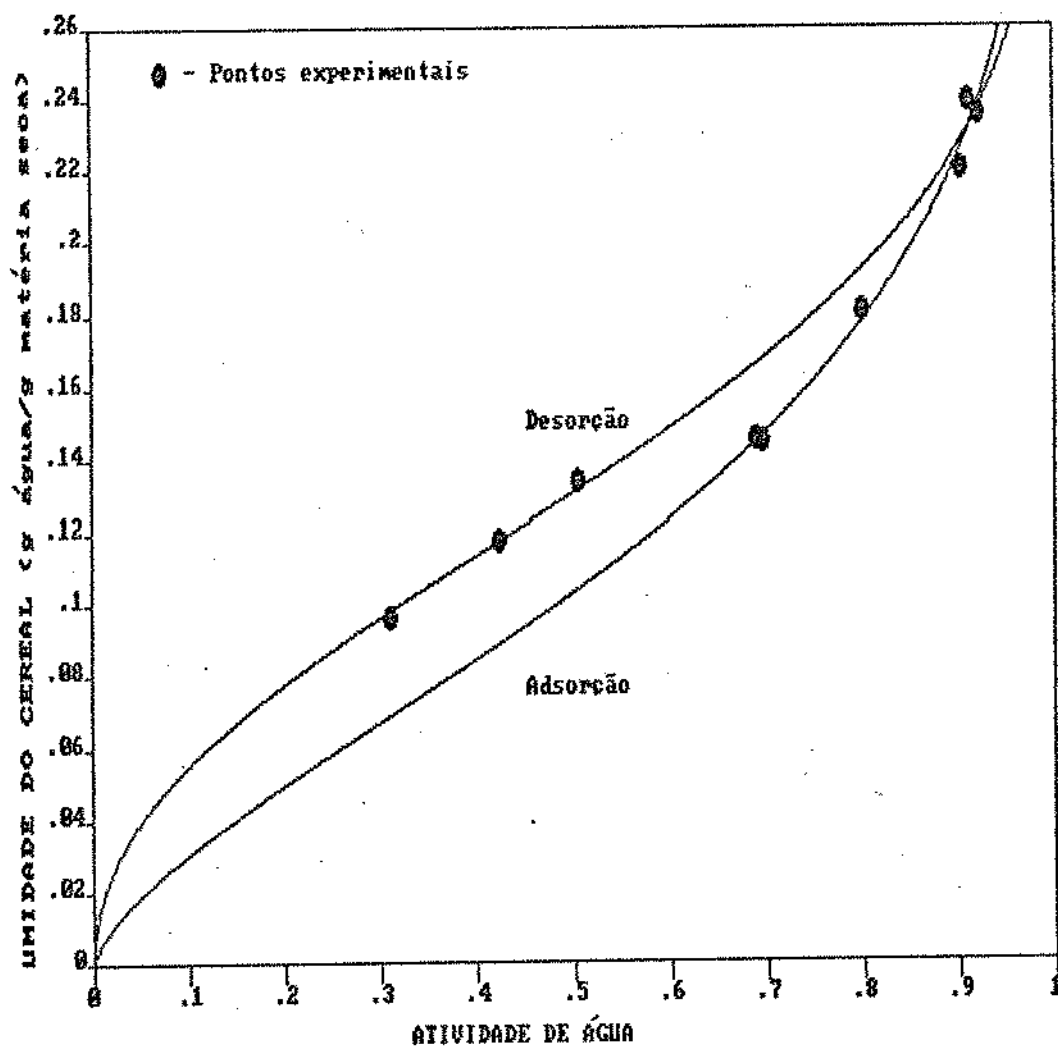


FIGURA 4.19 - Isotermas de adsorção e desorção segundo equação de Henderson. Temperatura 30°C. Variedade IAC-25, brunido.

adsorção e desorção são diferentes quando submetidos a um processo dinâmico de estabelecimento de equilíbrio. Como essa é a técnica utilizada nas práticas industriais, será preciso adequar uma curva de equilíbrio para cada caso específico, e não utilizar as isotermas de uma maneira universal.

A possibilidade dos dados de equilíbrio dinâmico serem diferentes dos levantados por métodos estáticos e a possível influência da umidade inicial do produto devem ser pesquisados.

Os resultados aqui obtidos, portanto, em termos de isotermas de sorção, devem ser considerados com muito critério, pois refletem uma dualidade de comportamento, conforme discutido acima. Mesmo assim, é interessante compará-los com os valores da literatura.

Lomauro, Bakshi e Labuza (1985), estudando o comportamento de sorção de vários alimentos amiláceos, observaram que 80% destes foram bem descritos pela equação de GAB, sendo que a equação de Halsey descrevia 65% dos isotermas. Para o caso específico do arroz (brunido, integral e em casca), estes autores observaram que o melhor ajuste foi obtido com o modelo de GAB, sendo que a equação de Halsey propiciou o pior ajuste aos pontos experimentais.

Aguerre, Suárez e Viollaz (1983) compararam os modelos de Halsey e de Henderson na descrição dos isotermas de desorção do arroz em casca tendo o primeiro apresentado desvios significativos em relação aos valores experimentais.

Na Tabela 4.8 são apresentados, para efeito de comparação, os valores obtidos em pesquisas precedentes em relação às equações de GAB, Halsey e Henderson. Estas funções estão graficadas nas Figuras 4.20 a 4.22. Nota-se que a equação de Henderson (Figura 4.21) apresentou maior concordância entre os vários autores.

Na Figura 4.20 confirma-se a inadequação da equação de Halsey para descrever a umidade de equilíbrio para valores de atividade de água menores que 0,15 e maiores que 0,85.

A Figura 4.22 mostra uma diferença considerável entre os resultados do presente trabalho e os obtidos por Lomauro, Bakshi e Labuza (1983), embora haja coerência de comportamento entre o arroz em casca e o arroz integral da variedade IAC-25. Essa diferença pode ser atribuída às condições de processo usadas na presente pesquisa (método dinâmico e combinação de adsorção e desorção), mas também pode ser devida ao fato de se trabalhar com variedades bem diferentes. Benedetti e Jorge (1987), que utilizaram também uma variedade desenvolvida pelo Instituto Agrônomo de Campinas (IAC-47), encontraram um resultado que mostra boa correspondência com os da variedade IAC-25 (Figura 4.21).

Vários outros autores pesquisaram a umidade de equilíbrio do arroz, mas não correlacionaram seus dados com as isotermas aqui utilizadas. Na Tabela 4.9 estão apresentados os valores de umidade de equilíbrio encontradas por outros autores, para os tres tipos de arroz e para vários valores de umidade

TABELA 4.8 - CONSTANTES DAS EQUAÇÕES DE GAB, HALSEY E HENDERSON PARA ARROZ EM CASCA (C), INTEGRAL (I) E BRUNIDO (B) SEGUNDO VÁRIOS AUTORES EM PROCESSOS DE ADSORÇÃO (A) E DESORÇÃO (D)

A) EQUAÇÃO DE HALSEY

Tipo	Variedade	pro- cesso	Temp °C	constantes C r		REFERÊNCIA
C	Itape'	D	40	0,0064	2,0044	Aguerre e col., 1983
	N.C.	D	25	0,0025	2,6753	Lomauro e col., 1985 ¹
	IAC-25	D/A	30	0,0081	1,8666	*
	IAC-165	D/A	30	0,0042	2,1793	*
I	N.C.	D/A	27	0,0015	2,9753	Lomauro e col., 1985 ²
	IAC-25	D/A	30	0,0067	2,0920	*
	IAC-165	D/A	30	0,0070	2,1285	*
	IAC-25	D	30	0,0023	2,7353	*
B	IAC-165	A	30	0,0014	2,8730	*
		D	30	0,0031	2,6126	*
		A	30	0,0024	2,6278	*

B) EQUAÇÃO DE HENDERSON

Tipo	Varie- dade	Pro- cesso	Temp °C	Constantes k n		REFERÊNCIA
C	Itape'	D	40	65,694	2,061	Aguerre e col., 1983
	IAC-25	A/D	30	50,103	1,8552	*
	IAC-165	A/D	30	85,124	2,1111	*
I	IAC-25	A/D	30	43,335	1,9115	*
	IAC-165	A/D	30	42,005	1,9479	*
B	IAC-25	D	30	59,201	2,1832	*
		A	30	23,284	1,5451	*
	IAC-165	D	30	41,888	2,0251	*
		A	30	17,606	1,4103	*

C) EQUAÇÃO DE GAB

Tipo	Varie- dade	Pro- cesso	Temp °C	Constantes X ₀ C k			REFERÊNCIA
C	N.C.	D	25	0,1003	17,5744	0,6275	Lomauro e col., 1985 ¹
	IAC-25	A/D	30	0,0930	6,6463	0,6122	*
	IAC-165	A/D	30	0,0898	9,3544	0,5979	*
I	N.C.	A/D	27	0,0973	16,6735	0,6535	Lomauro e col., 1985 ²
	IAC-25	A/D	30	0,0887	10,5393	0,6823	*
	IAC-165	A/D	30	0,0908	12,3483	0,6886	*
B	IAC-25	A	30	0,0825	6,9413	0,7405	*
		D	30	0,1176	9,1093	0,5875	*
	IAC-165	A/D	30	0,0843	51,4783	0,7186	*

* Resultados obtidos com os dados do presente trabalho

¹ Resultados obtidos com os dados de Zuritz et al (1979)

² Resultados obtidos com os dados de Gough et al (1980)

TABELA 4.9 - UMIDADE (em g água/100 g massa seca) DE VÁRIOS TIPOS DE ARROZ EM EQUILÍBRIO COM AR A DIFERENTES UMIDADES RELATIVAS (%)

arroz em casca (cv. Inga) - desorção - 30°C - Putranon e col., 1979									
UR	22,20	25,10	26,20	30,80	36,60	53,30	72,10	86,60	
X _e	7,26	8,07	8,31	9,18	9,87	12,18	16,74	20,70	
arroz em casca (cv. Inga) - adsorção - 30°C - Putranon e col., 1979									
UR	29,10	40,40	54,60	60,60	72,70	76,50	89,40		
X _e	8,32	10,08	12,25	13,33	16,74	17,38	21,49		
arroz em casca (cv. CSM5) - desorção - 30°C - Zuritz e col., 1979									
UR	11,20	22,00	32,80	43,60	52,00	63,30	75,60	86,30	
X _e	5,64	8,08	10,01	11,31	12,80	15,05	17,10	20,22	
	5,44	8,39	10,16	11,32	12,91	14,44	16,71	20,00	
	5,84	8,34	9,96	11,59	12,94	14,69	17,29	20,38	
em casca (cv. Starbonnett) - desorção - 32°C - Kachru e Mathes, 1976									
UR	7	22	36	52	76	88			
X _e	6,70	9,20	10,80	12,31	14,61	16,22			
arroz integral (cv. Caloro) - ads/des - 25°C - Houston, 1952									
UR	10	20	30	40	50	60	70	80	90
X _e	6,61	8,70	10,50	12,23	14,02	15,61	17,37	19,33	23,61
arroz brunido - ads/des - 25°C - Karon e Adams, 1949									
UR	10	20	30	40	50	60	70	80	90
X _e	5,48	8,23	10,13	11,73	13,64	15,47	17,37	19,62	23,15

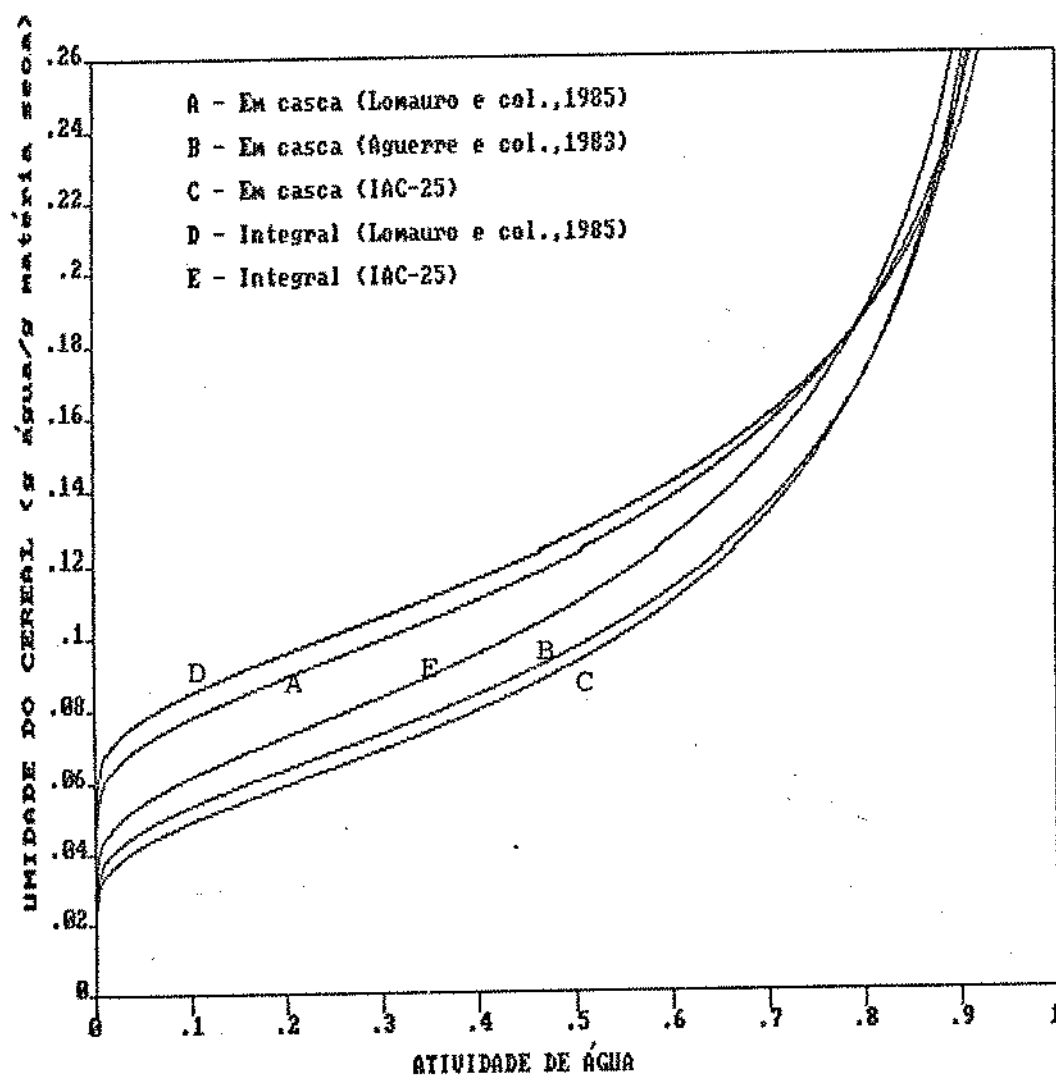


FIGURA 4.20 - Isotermas de sorção para arroz em casca e arroz integral de acordo com a equação de Halsey, segundo vários autores (Tabela 4.8)

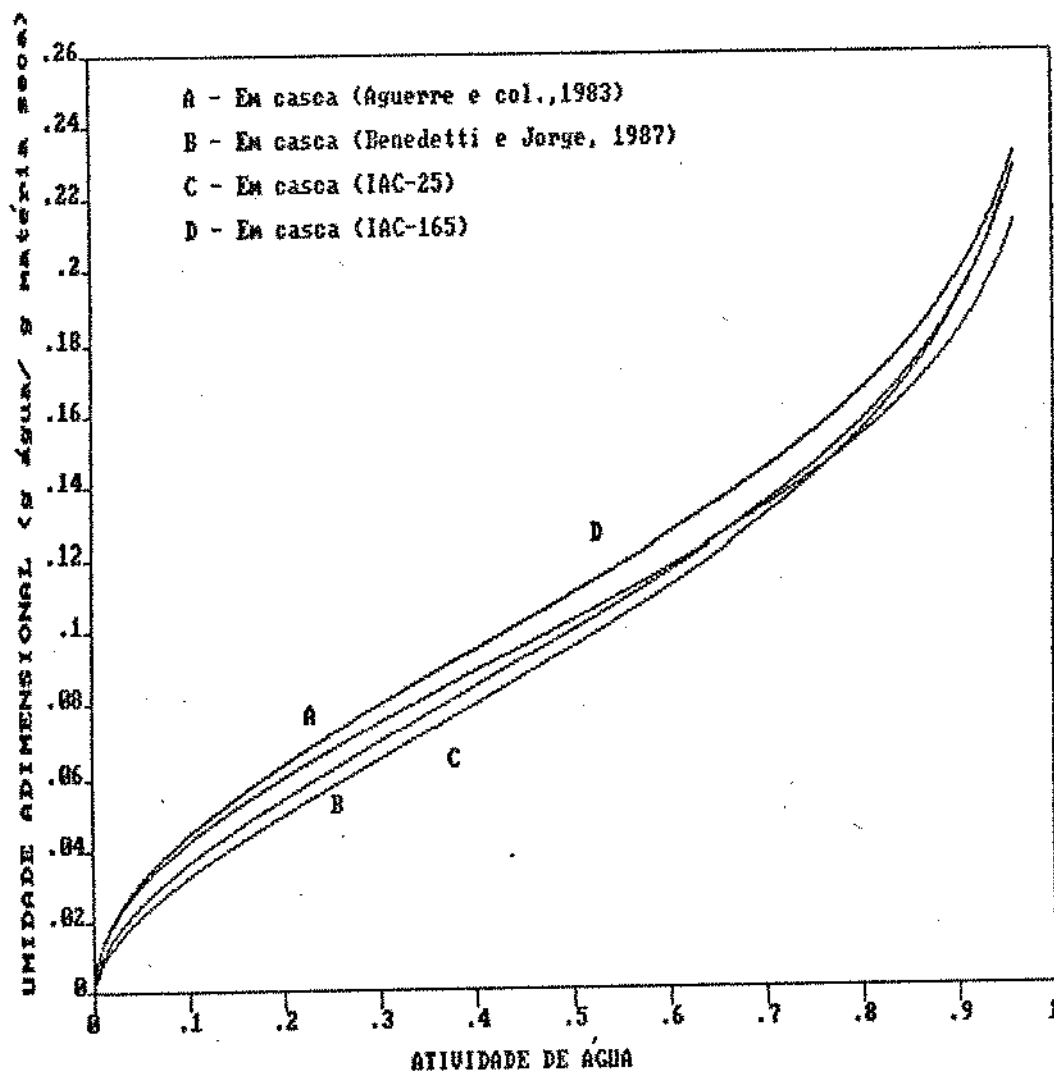


FIGURA 4.21 - Isotermas de sorção para arroz em casca de acordo com a equação de Henderson, segundo vários autores (Tabela 4.8).

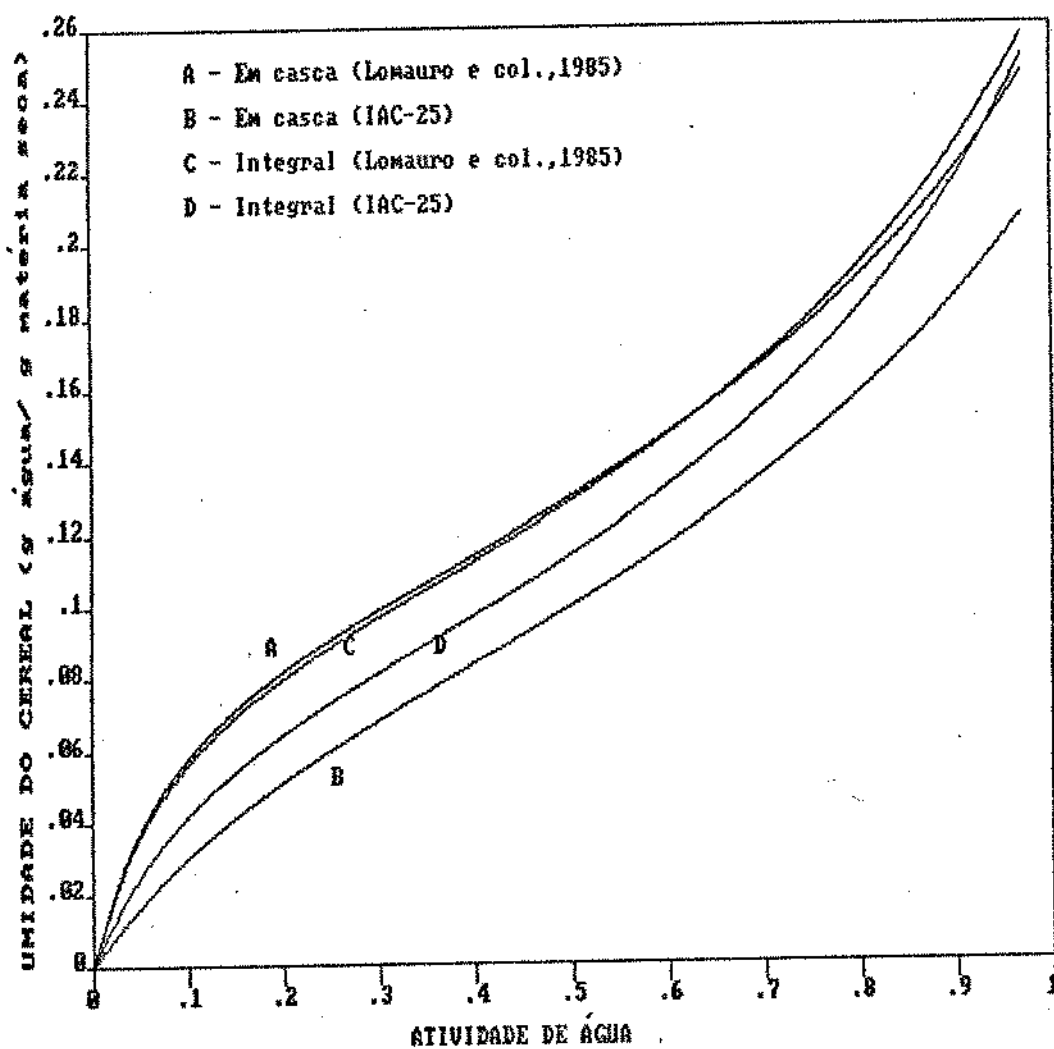


FIGURA 4.22 - Isotermas de sorção para arroz em casca e arroz integral de acordo com a equação de GAB, segundo vários autores (Tabela 4.8).

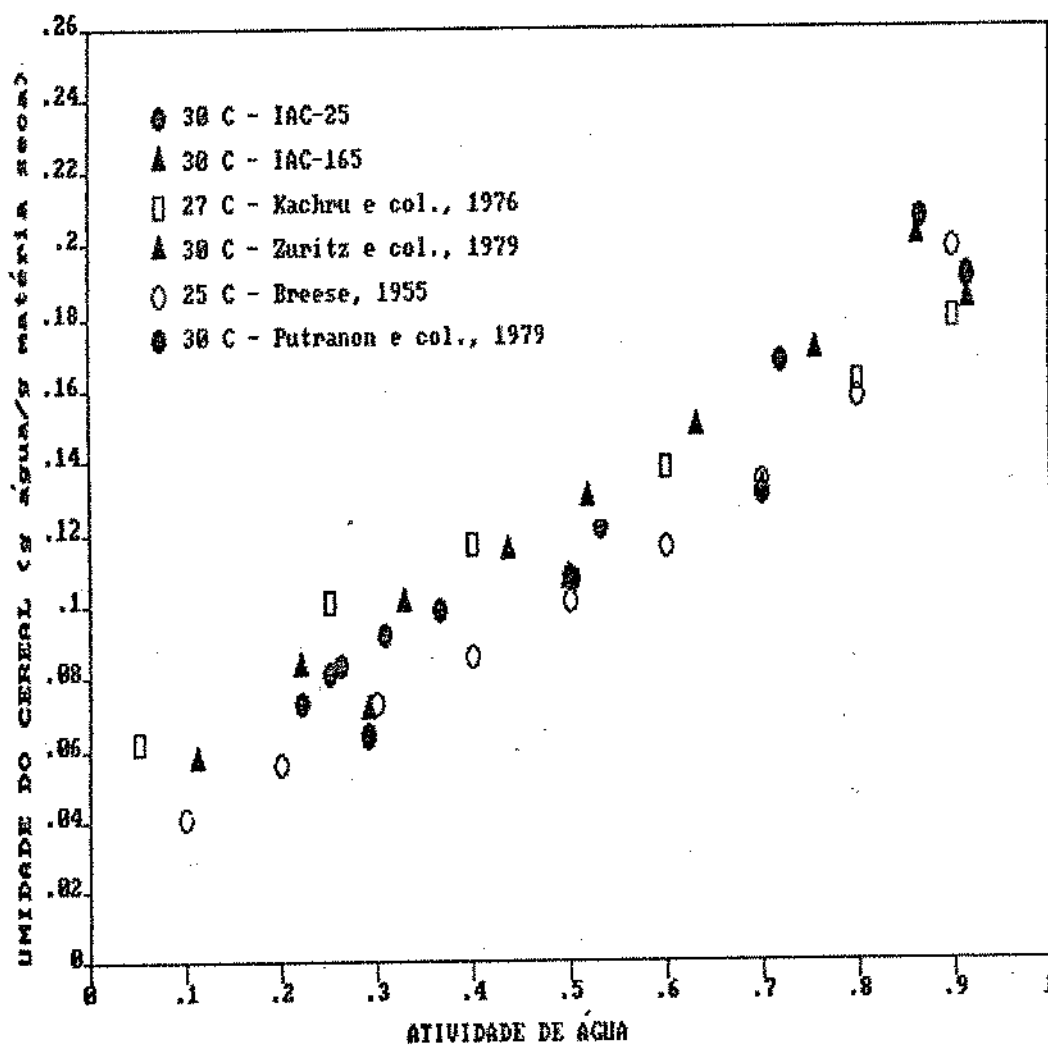


FIGURA 4.23 - Umidade de equilíbrio para arroz em casca.

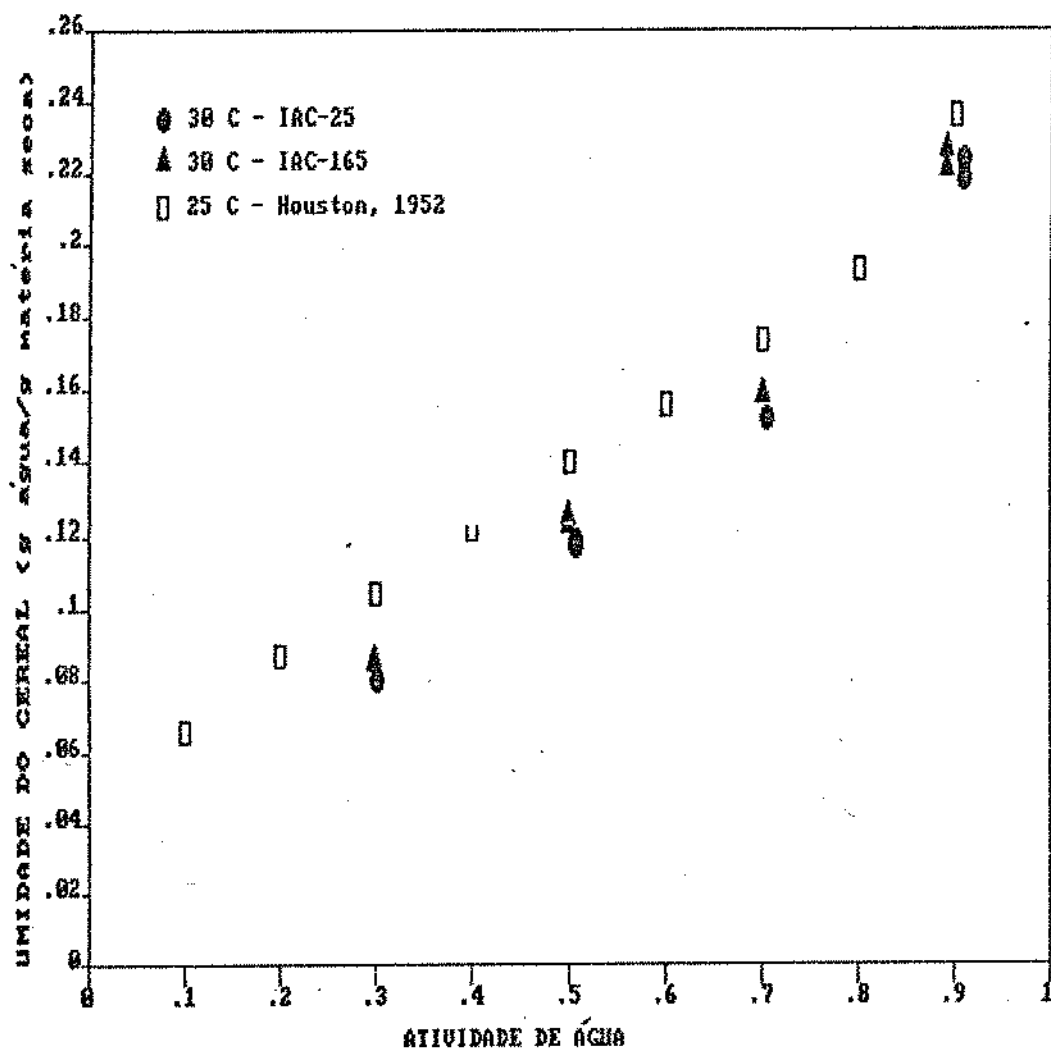


FIGURA 4.24 - Umidade de equilíbrio para arroz integral.

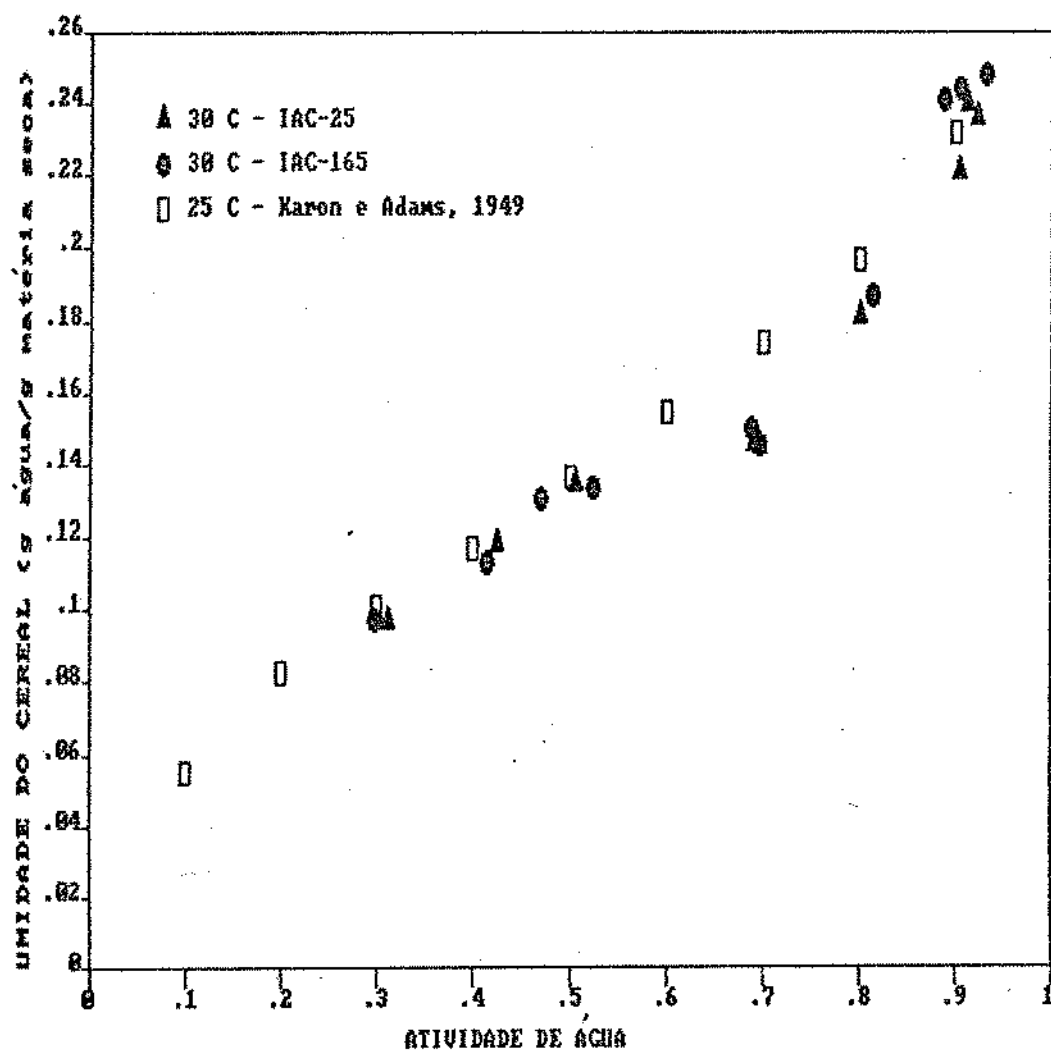


FIGURA 4.25 - Umidade de equilíbrio para arroz brunido.

relativa. As Figuras 4.23 a 4.25 mostram estas unidades graficadas em função da atividade de água. Pela Figura 4.23, observa-se uma grande dispersão nos valores de equilíbrio obtidos para o arroz em casca e que os dados levantados nesta pesquisa se colocam na faixa desta dispersão. No caso do arroz integral, Figura 4.24, os valores obtidos com o IAC-25 e o IAC-165 se colocam abaixo daqueles obtidos por Houston (1952). A comparação mais contundente é obtida na figura 4.25, aonde se observa que os valores obtidos por Karon e Adams (1949) coincidem para umidades relativas inferiores a 60% e para o valor de 90% de UR, mas há considerável desvio para os valores entre 70% e 80% de UR, justamente na região inicial de adsorção, nos experimentos deste trabalho. Isto não chega a confirmar a histerese mas é, certamente, um indício de que um equilíbrio meta-estável pode ter sido produzido ao se partir de um produto com umidade intermediária.

4.4 - FISSURAS -

As fissuras foram observadas somente para o "arroz brunido" e sua ocorrência nos grãos foi verificada utilizando-se a técnica descrita na Seção 3.3.3, durante o período em que os 100 grãos ficaram expostos às distintas condições de ar controlado.

4.4.1 - Caracterização do processo de fissuramento -

Devido ao impedimento de se usar o método fotográfico, como já esclarecido na Secção 3.3.3, observou-se as características morfológicas dos grãos fissurados, de forma a relacioná-las qualitativamente com as características do ar, com o tempo de tratamento e com a variedade do arroz.

Foi anotado o número inicial de grãos fissurados bem como o número de grãos que fissuravam ao longo do tempo de exposição. De posse destes valores, podemos relacionar quantitativamente a ocorrência das fissuras com o tempo de exposição, com as características do ar controlado e com as características do grão.

4.4.2 - Resultados qualitativos -

Os grãos apresentaram-se fissurados de distintas maneiras, de acordo com a umidade relativa do ar ao qual estavam expostos. Nos processos de desorção, as fissuras iniciaram-se longitudinalmente, sendo menor a quantidade de fissuras transversais. Nos processos de adsorção, as fissuras transversais foram mais numerosas.

Ao final dos ensaios a 30% de umidade relativa, para as duas variedades, os grãos fissurados apresentavam-se totalmente danificados, sendo que todo o volume do grão se encontrava percorrido por pequenas e múltiplas fissuras

longitudinais e transversais.

Ao final dos ensaios a 90% de umidade relativa, os grãos fissurados apresentavam-se atravessados por múltiplas fissuras radiais e por poucas fissuras longitudinais.

Nos ensaios realizados com as demais condições do ar (40%, 50%, 70% e 80% de umidade relativa), não foi possível estabelecer um padrão morfológico para os grãos fissurados.

4.4.3 - Resultados quantitativos -

Para uma análise quantitativa, as Figuras 4.26 e 4.27 apresentam os valores experimentais da porcentagem de grãos fissurados após o início do processo de desorção/adsorção em função do tempo de exposição, para cada variedade e para cada umidade relativa do ar.

Estas figuras sugerem uma dependência da porcentagem de grãos fissurados com o tempo de exposição, com a umidade relativa do ar com a variedade de arroz. Observamos também que a desorção aparenta ter um efeito mais significativo sobre o desenvolvimento das fissuras em termos da porcentagem final de grãos fissurados e em termos da taxa de fissuramento, ou seja, da velocidade com que se atinge a porcentagem final de grãos fissurados. O aumento da porcentagem de grãos fissurados ocorreu a diferentes velocidades, em função do tempo de exposição e da umidade relativa do ar. A variedade do arroz mostrou-se um parâmetro não significativo na velocidade (ou

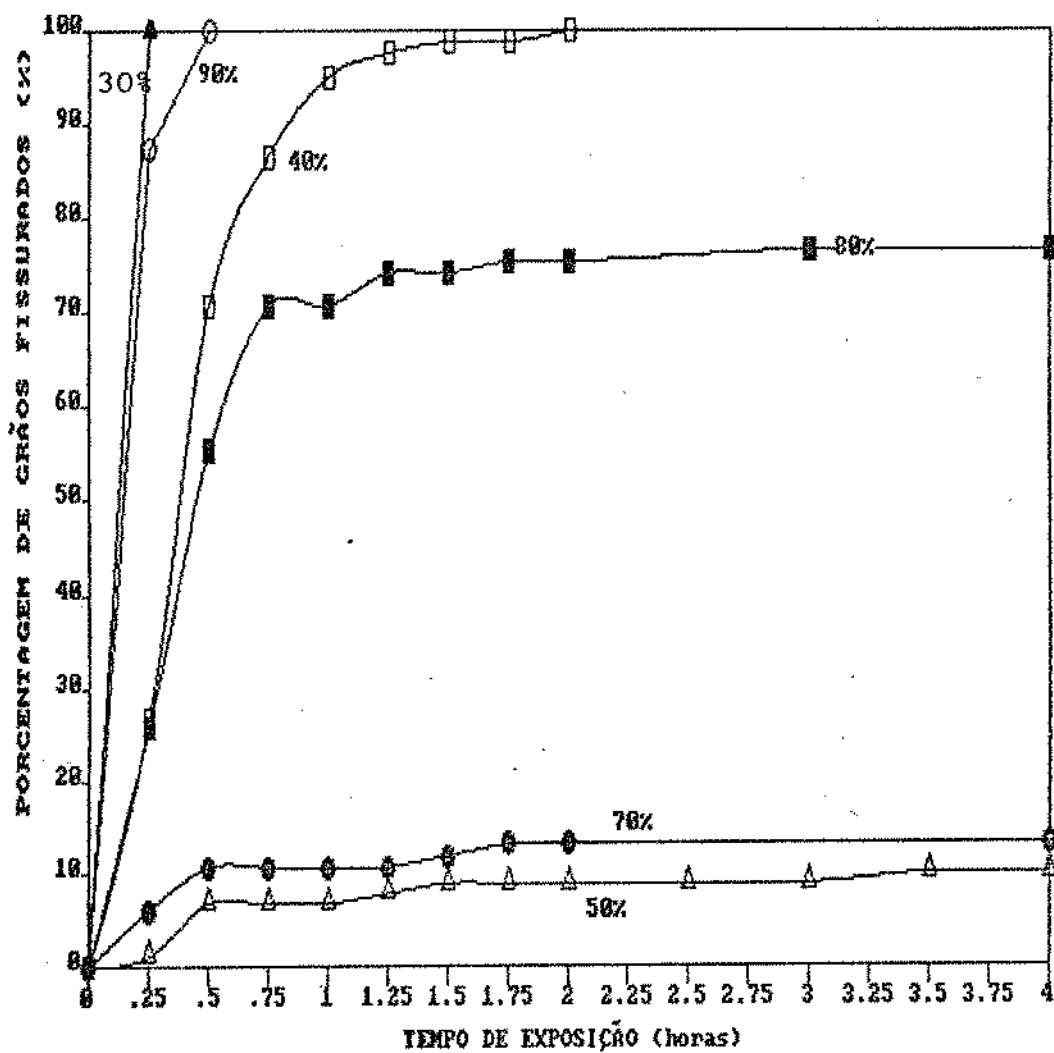


FIGURA 4.26 - Variação da porcentagem de grãos de arroz fissurados com o tempo de exposição a ar a 30°C e umidade relativa entre 30% e 90%. Variedade IAC-25, brunido

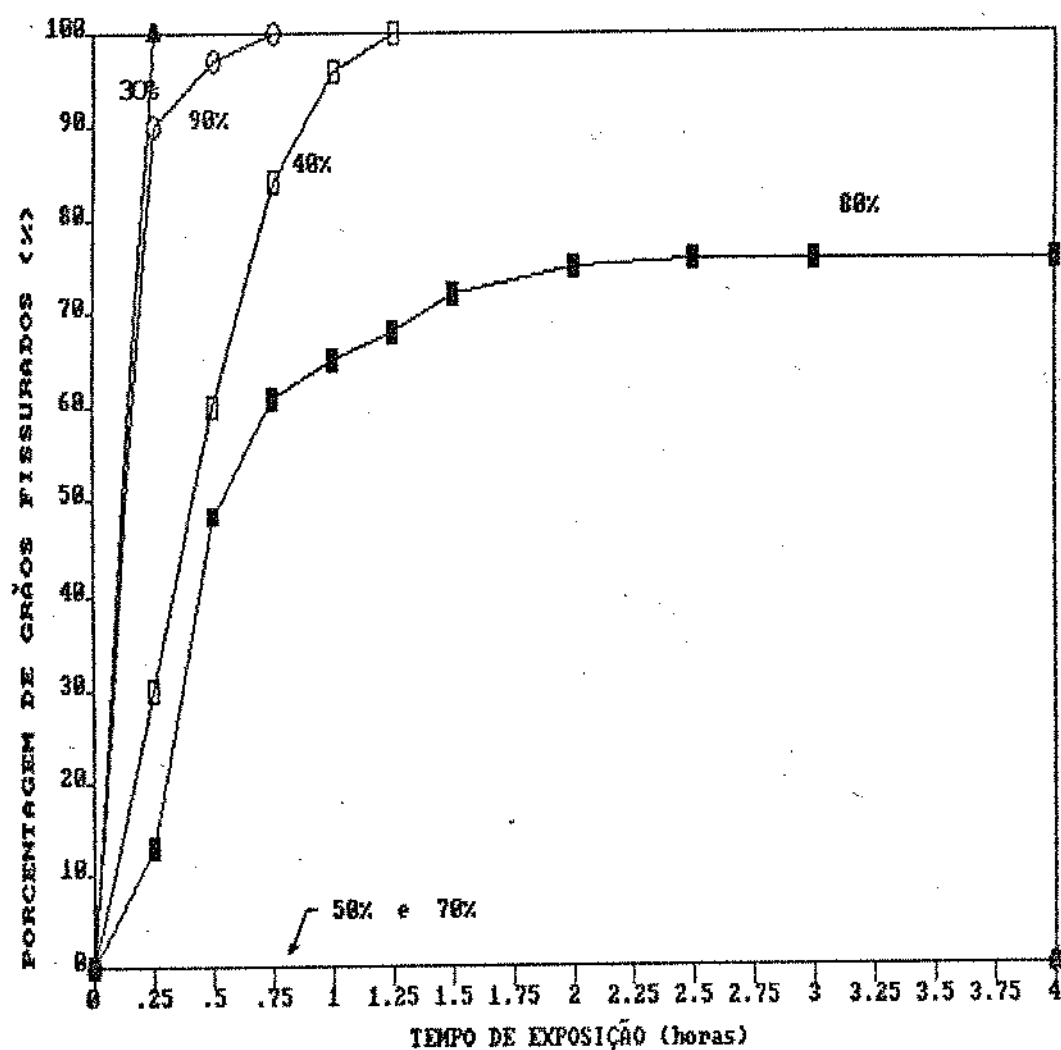


FIGURA 4.27 - Variação da porcentagem de grãos de arroz fissurados com o tempo de exposição a ar a 30°C e umidade relativa entre 30% e 90%. Variedade IAC-165, brunido.

taxa) de fissuramento.

Analisando as Figuras 4.26 a 4.27, podemos notar que, para uma dada condição do ar (umidade relativa), a porcentagem de grãos fissurados aumenta exponencialmente a uma taxa decrescente até determinado tempo de exposição, quando atinge e permanece em uma dada porcentagem final de grãos fissurados. São exceção a este comportamento os grãos da variedade IAC-165 submetidos às umidades relativas de 50% e 70% que, como indicado na Figura 4.27, não fissuraram nestas condições. Na condição de 30% UR, com as duas variedades, o processo de fissuramento foi tão rápido que, devido ao intervalo definido para a visualização das fissuras, só nos foi possível obter os valores inicial e final da porcentagem de grãos fissurados.

A taxa inicial de fissuramento dependeu da variedade e da umidade relativa do ar. Foi a maior taxa encontrada ao longo do tratamento, para as duas variedades e para todas as condições do ar. Pudemos encontrar desde taxas iniciais nulas (como é o caso da variedade IAC-165 a 50% e 70% UR) até altíssimas taxas iniciais (ensaios a 30% UR, para ambas variedades). O valor da taxa inicial de fissuramento foi obtido realizando-se a regressão linear para os dois primeiros pontos experimentais de cada uma das curvas das Figuras 4.26 e 4.27, uma vez que nenhuma função foi ajustada para estas. A Tabela 4.10 apresenta os valores obtidos. A taxa de fissuramento é decrescente, ou seja, diminui com o tempo de exposição até tornar-se nula não sofrendo mais alterações. O processo de fissuramento se interrompe, nesse instante.

TABELA 4.10 - Taxa inicial de fissuramento de grãos
 brunidos de arroz (variação da porcentagem de grãos
 fissurados por hora) em função da umidade relativa do
 ar a 30 C..

umidade relativa	Taxa inicial de fissuramento	
	IAC-25	IAC-165
30	400	400
40	141	120
50	13	não fissurou
70	24	não fissurou
80	104	96
90	350	360

O tempo necessário para se atingir a porcentagem final de grãos fissurados dependeu da umidade relativa do ar e da variedade. O processo de fissuramento se interrompeu no tempo mínimo de 15 minutos (a 30% UR, ambas variedades) e no tempo máximo de 3,5 horas (IAC-25 a 50% UR). No entanto, com 45 minutos de tratamento já se apresentavam fissurados, no mínimo, 85% dos grãos, independentemente da variedade e umidade relativa. A Tabela 4.11 mostra, para cada condição do ar, o tempo necessário para que os grãos interrompessem o processo de fissuramento. Só foi possível observar uma relação deste parâmetro com as condições do ar para a variedade IAC-165.

A porcentagem final de grãos fissurados dependeu da variedade e da umidade relativa e variou de 0% (IAC-165 a 50% e 70% UR) até 100% (30%, 40% e 90% UR, ambas variedades), como pode ser visto na Tabela 4.12. A variedade do arroz não influenciou significativamente no valor da porcentagem final de grãos fissurados. Os processos de desorção de umidade aparentam ter um efeito mais significativo nessa porcentagem final, comparados com os processos de adsorção.

4.4.4 - A influência do processo: adsorção e desorção -

Na secção precedente, ficou evidente a dificuldade de se relacionar os parâmetros do processo de fissuramento para o arroz brunido com a umidade relativa do ar, uma vez que estes parâmetros se modificam de acordo com o processo, ou seja, adsorção ou desorção.

TABELA 4.11 - Tempo máximo do processo de fissuramento de grãos brunidos de arroz, em função da umidade relativa do ar a 30 C.

umidade relativa	Tempo (hora)	
	IAC-25	IAC-165
30	< 0,25	< 0,25
40	2,0	1,25
50	3,5	não fissurou
70	1,75	não fissurou
80	3,0	2,5
90	0,5	0,75

TABELA 4.12 - Porcentagem final de grãos (brunidos) fissurados a diversas umidades relativas de ar a 30oC.

umidade relativa	Porcentagem final de grãos fissurados	
	IAC-25	IAC-165
30	100	100
40	100	100
50	10	não fissurou
70	13	não fissurou
80	77	76
90	100	100

Podemos observar que existem, independentemente das variedades estudadas, muitas semelhanças entre os processos de desorção e os de adsorção no que diz respeito ao comportamento da porcentagem de grãos fissurados em função do tempo. Assemelham-se os resultados obtidos para 30% e 90% UR, respectivamente as condições mais drásticas de desorção e adsorção. Os resultados com 50% UR (desorção) são muito semelhantes àqueles obtidos a 70% UR (adsorção). A 40% UR os grãos apresentaram taxas iniciais de fissuramento semelhantes às obtidas a 80% UR.

Desta forma, julgamos adequado analisar o desenvolvimento das fissuras no grão de arroz em função da diferença do conteúdo de umidade (ΔX), definida como:

$$\Delta X = X_e - X_0 \dots\dots\dots [4.9]$$

onde os valores de X_e (conteúdo de umidade no equilíbrio) podem ser calculados pelas isotermas de sorção com base na umidade relativa do ar ao qual o grão é submetido. Os processos de desorção apresentam ΔX negativo enquanto que os processos de adsorção apresentam valores positivos para este parâmetro.

A utilização do parâmetro ΔX mostra-se mais interessante quando levamos em conta que ele representa o gradiente interno de umidade que se forma inicialmente no grão e, portanto, dá uma idéia do grau de contração ou expansão volumétrica que o grão pode atingir.

A Tabela 4.13 apresenta os valores de ΔX para cada um dos ensaios realizados com o tipo brunido, para as duas variedades. Para o cálculo do conteúdo de umidade de equilíbrio X_e , utilizamos a equação de Henderson, com os parâmetros ajustados no presente trabalho (Secção 4.3), aplicada ao valor da umidade relativa nominal.

4.4.5 - Influência da variação do conteúdo de umidade -

Aplicando-se este conceito de diferença de conteúdo de umidade nas Figuras 4.26 e 4.27, observa-se que a porcentagem final de grãos fissurados e a taxa inicial de fissuramento crescem com o aumento do valor absoluto de ΔX . Para um mesmo valor de ΔX , os processos de desorção apresentam uma taxa inicial de fissuramento mais alta, bem como maiores porcentagens finais de grãos fissurados. Exceção a este comportamento é observada para IAC-25 nas condições de 50% e 70% UR, nas quais o grão mostrou comportamento praticamente igual.

A influência de ΔX na porcentagem final de grãos fissurados pode ser vista na Figura 4.28. Observa-se nessa figura que a porcentagem final de grãos fissurados apresenta-se menor quanto mais próximo de zero se torna o potencial em ΔX , ou seja, existe uma região em torno de $\Delta X=0$ na qual a porcentagem final de grãos fissurados é baixa ou até mesmo nula. Os processos de desorção estão colocados no quadrante esquerdo já que correspondem a valores negativos de ΔX , enquanto que os processos de adsorções situam-se no quadrante direito. A uma

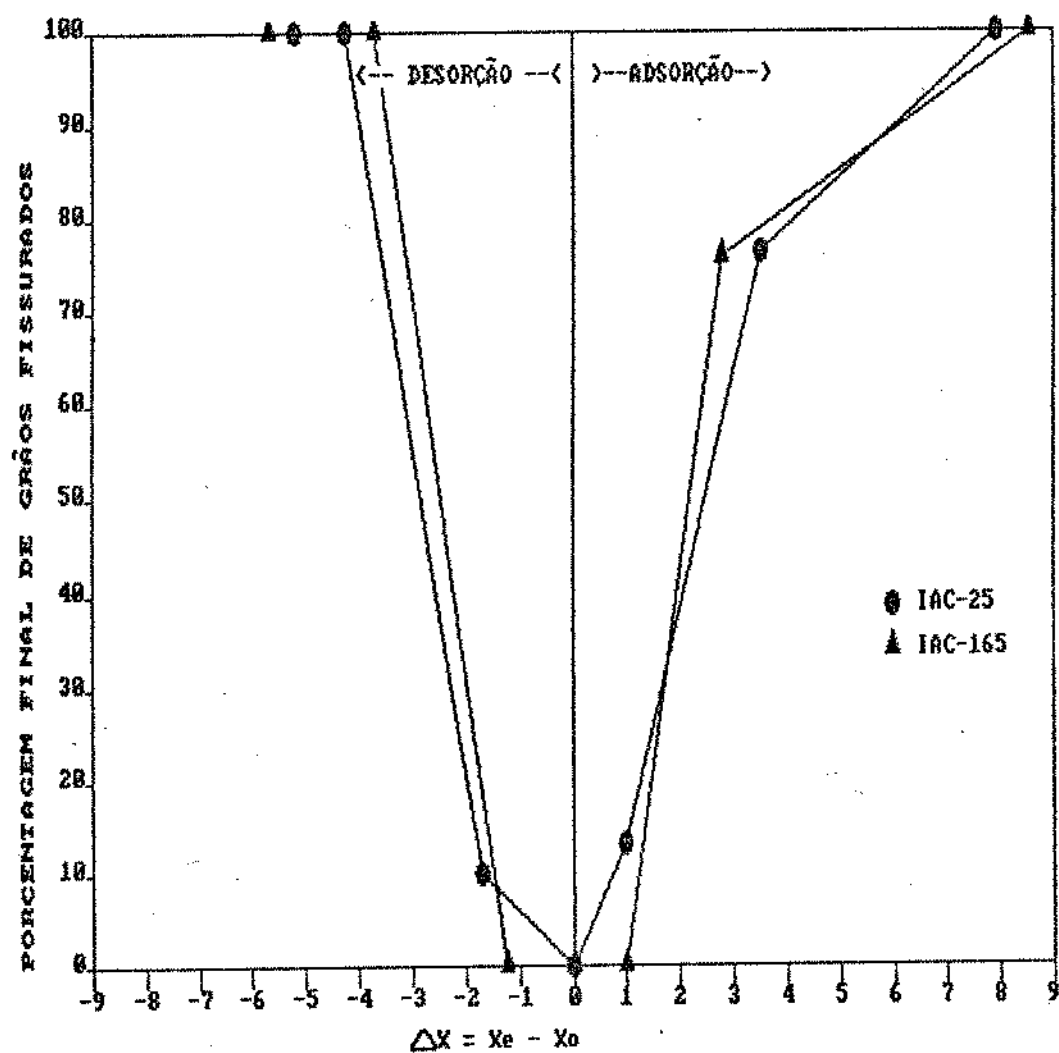


FIGURA 4.28 - Influência da variação de umidade (ΔX) do arroz brunido na porcentagem final de grãos fissurados. Temperatura 30°C.

mesma variação do conteúdo de umidade, as duas variedades estudadas não apresentaram diferenças significativas na porcentagem final de grãos fissurados.

A taxa inicial de fissuramento também mostrou uma relação direta com a variação do conteúdo de umidade ao qual foi submetido o grão de arroz, como pode ser observado na Figura 4.29. As menores variações do conteúdo de umidade correspondem as menores taxas iniciais de fissuramento sendo que esta cresce rapidamente com o aumento do valor absoluto de ΔX , tanto para o processo de desorção como de adsorção.

4.4.6 - Visão geral do processo de fissuramento em grãos de arroz

Como foi visto nas seções precedentes deste Capítulo, alguns parâmetros do processo de fissuramento (taxa inicial, tempo final e porcentagem final) mostram-se relacionados com a variação do conteúdo de umidade que ocorre no grão brunido de arroz. Uma visão mais geral da questão é fornecida pela Tabela 4.14 aonde acrescentamos, aos demais parâmetros, a taxa inicial de sorção. Os valores experimentais da umidade do grão (g água/100 g de matéria seca) das primeiras 2 horas de tratamento foram ajustados por um polinômio de 4o grau em função do tempo de exposição. O valor da derivada da função no tempo = 0 é a taxa inicial de sorção e fornece uma indicação da tendência do processo de transferencia de umidade.

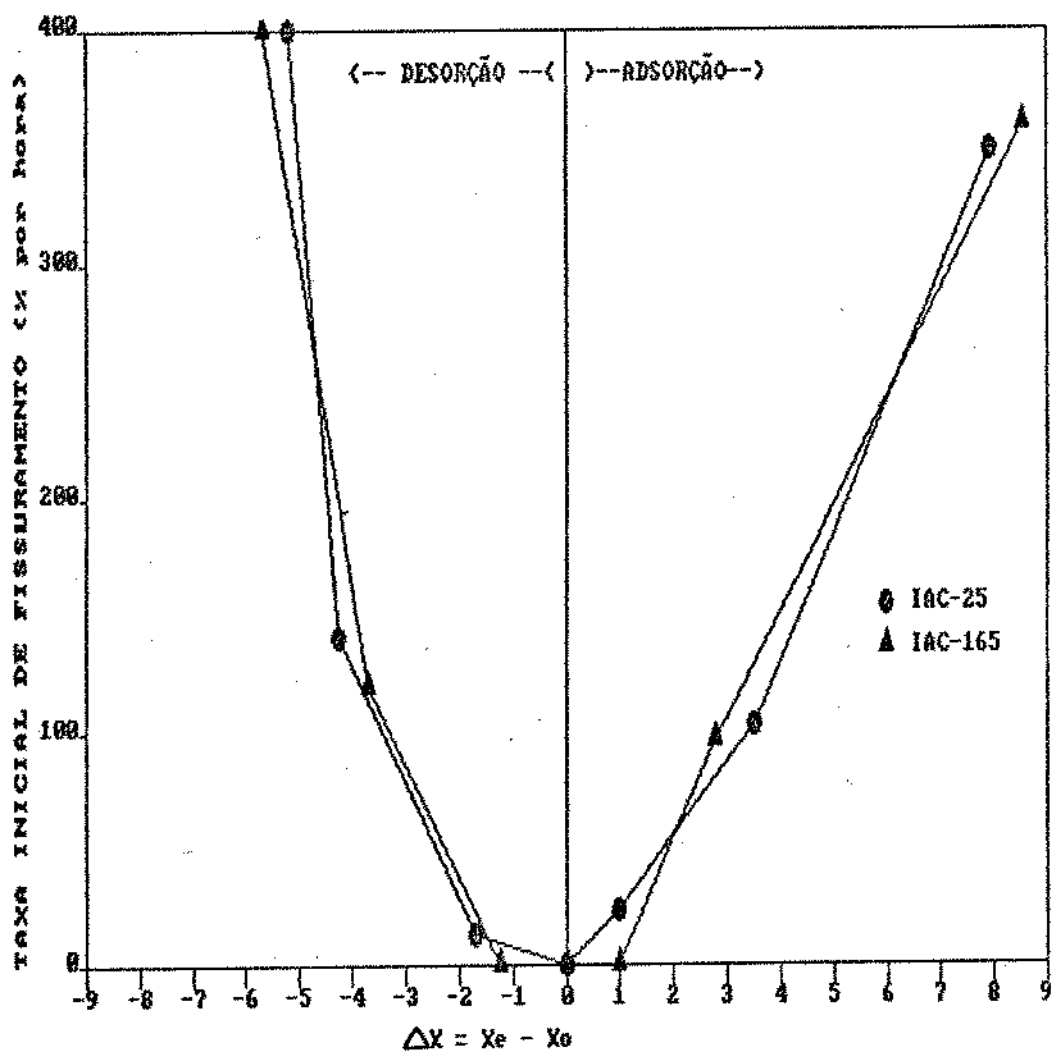


FIGURA 4.29 - Influência da variação de umidade (ΔX) do arroz brunido na taxa inicial de fissuramento. Temperatura 30°C.

**TABELA 4.13 - Variação do conteúdo de umidade no grão
brunido de arroz, segundo a equação [4.8]**

umidade relativa	variação do conteúdo de umidade	
	IAC-25	IAC-165
30	-5,19	-5,67
40	-4,25	-3,71
50	-1,68	-1,23
70	1,00	1,00
80	3,53	2,78
90	7,94	8,54

A taxa inicial de fissuramento mantém uma boa correlação com a variação do conteúdo de umidade no grão e com a taxa inicial de variação de umidade, como pode ser observado pela Tabela 4.14 . As duas variedades se apresentaram da mesma forma quanto à porcentagem final de grãos fissurados e quanto à taxa de fissuramento (ao menos quanto à tendência inicial) com exceção dos ensaios aonde não ocorreu fissuramento. Podemos dizer que existe um potencial mínimo ao qual o grão deve ser exposto para que ele fissure. As duas variedades estudadas, tendo sido submetidas a um potencial acima deste "potencial mínimo", mostraram a mesma tendência inicial ao fissuramento para uma mesma condição do ar.

Pela Tabela 4.14, observamos que às maiores taxas iniciais de sorção (adsorção ou desorção) correspondem as maiores taxas iniciais de fissuramento. Notamos também que, embora os processos de adsorção tenham apresentado as maiores taxas iniciais de variação absoluta de umidade e as maiores variações no conteúdo de umidade, foram os processos de desorção que apresentaram as maiores taxas iniciais de fissuramento.

4.4.7 - Uma análise final -

O objetivo inicial do presente trabalho era o de formular um modelo físico-matemático para o processo de fissura no grão de arroz, que levasse em conta a taxa de transferência de umidade entre o cereal e o ambiente, bem como as condições externas do ar. Confirmamos que a fissura depende da diferença

TABELA 4.14 -Resultados gerais do processo de fissuramento em grãos brunidos de arroz, submetidos a corrente de ar com 30 C a diversas umidades relativas.

Taxa inicial de sorção em [g água/100 g de matéria seca.hora]

Taxa inicial de fissuramento em [% de grãos fissurados/hora]

variedade	UR (%)	ΔX	taxa inicial		condições finais	
			sorção	fissuramento	tempo(h)	porcentagem de fissuramento
25	30	-5,19	-14,07	400,0	< 0,25	100
	40	-4,25	-10,88	141,5	2,00	100
	50	-1,68	- 4,33	13,3	3,50	10
	70	+1,00	+ 2,15	23,8	1,75	13
	80	+3,52	+ 9,61	103,5	3,0	77
	90	+7,94	+22,39	350,0	0,5	100
165	30	-5,67	-15,97	400,0	< 0,25	100
	40	-3,71	- 9,42	120,0	1,25	100
	50	-1,23	- 4,25	-----	não fissurou	-----
	70	+1,00	+ 1,69	-----	não fissurou	-----
	80	+2,78	+ 7,01	96,0	2,5	76
	90	+8,54	+25,33	360,0	0,5	100

do potencial (expresso em termos de variação do conteúdo de umidade no grão) ao qual o grão é inicialmente sujeito, bem como da variedade do arroz.

O processo de fissuramento no grão de arroz submetido a uma variação de seu conteúdo de umidade está diretamente relacionado com o gradiente interno de umidade. Decorridos os primeiros minutos de exposição ao ar mais seco ou mais úmido, a frente de umidade atinge o eixo central do arroz e ocorre um amortecimento do gradiente. Os grãos inteiros que, por determinados fatores estruturais, mostraram-se mais resistentes não rompendo-se até este momento, estarão agora sob tensões que tendem a diminuir e desaparecer quando da equilibração completa da umidade. Desta forma, estes grãos não mais romperão e o processo de fissuramento se finda.

Por outro lado, quando o arroz é submetido a condições muito drásticas de adsorção ou desorção, o gradiente interno de umidade é inicialmente suficiente para provocar fissuras em todos os grãos. Assim, quando este gradiente vai diminuindo, todos os grãos (inclusive os mais resistentes) já se encontram fissurados. Este comportamento pode ser verificado nos ensaios realizados com as duas variedades a 90% umidade relativa (adsorção) e a 30% e 40% de umidade relativa (desorção).

Observa-se que a porcentagem final de grãos fissurados depende da variedade estudada e das condições do ar. É visível que a porcentagem final de grãos fissurados é maior quanto maior a diferença absoluta entre a umidade relativa do ar e a umidade

relativa do ar em equilíbrio com as condições iniciais do grão (em outras palavras, com ΔX). Ora, quanto maior esta diferença, maior é o gradiente interno de umidade, uma vez que a superfície externa do grão está em equilíbrio com o ambiente devido a inexistência de resistência externa à transferência de umidade. Assim, sendo o gradiente interno de umidade um parâmetro que afeta o processo de fissura, podemos dizer que a ocorrência de fissuras no grão de arroz é função da diferença de umidade de equilíbrio à qual o grão é submetido quando da alteração das condições ambientais.

A afirmação acima estende-se aos processos de sorção que ocorrem com uma resistência externa que afete a transferência de umidade, desde que seja observado o valor da umidade superficial do grão. A incidência de fissuras será atenuada pois não se verificará o mesmo gradiente inicial de umidade no interior do grão.

No caso de grãos integrais ou em casca, a tendência ao fissuramento será menor ainda. O endosperma está agora protegido pelos tecidos celulares externos (camada de aleurona e/ou casca) que podem ser considerados como parte da resistência externa à transferência de massa ao grão. A equação [2.3] deverá ser resolvida agora com um número de Biot efetivo muito menor, o que implica em menor velocidade de sorção, como pôde ser visto na Secção 4.1. Mais importante do que isto, soluções numéricas da 2ª Lei de Fick, para o caso de superfícies compostas como essas, indicam que nesse caso os gradientes dentro do grão (endosperma) serão muito reduzidos, minimizando-se assim a principal causa de fissuramento. Desta forma espera-se para

estes dois tipos de grãos de arroz que, para uma dada variação de atividade de água, o processo de fissuramento seja mais lento e a porcentagem final de grãos fissurados seja menor do que os valores encontrados para os grãos brunidos.

A análise dos dados de fissuramento do arroz brunido indicam que, pelo menos em termos quantitativos, não existe diferença entre adsorção e desorção no fenômeno de fissura e quebra. Mas os resultados experimentais com arroz em casca, discutidos na Secção 4.1, indicam claramente que a casca é mais permeável quanto mais úmida e nesses casos, de acordo com o raciocínio acima, aumentam os gradientes dentro do grão (endosperma). Como consequência o arroz com casca deverá ser mais susceptível à quebras no processo de adsorção de umidade do que na desorção.

Pelo estudo aqui realizado, a variedade de arroz que produz grãos mais espessos e mais higroscópicos será mais susceptível às fissuras. Uma generalização destes resultados pode não ser válida, uma vez que a Natureza pode dotar esses grãos com uma casca mais impermeável e de um endosperma mais elástico.

5 - CONCLUSÕES

1 - A câmara de ensaios construída para fins desta pesquisa atendeu plenamente o objetivo proposto: o de fornecer dados para a análise de processos de sorção e de fissuramento em grãos de arroz.

2 - O arroz brunido fissurou mais rápido e apresentou as maiores porcentagens finais de grãos fissurados para os processos de desorção de umidade.

3 - A velocidade de fissuramento é função da taxa inicial de sorção, seja um processo de adsorção, seja um processo de desorção.

4 - O Modelo Difusional descreveu o comportamento experimental para valores de umidade adimensional maior que 0,3 tanto para os processos de adsorção quanto para os processos de desorção.

5 - A equação de Page ajustou-se melhor que o modelo difusional para todo o intervalo de tempo considerado.

6 - A porcentagem final de grãos fissurados pode ser expressa como uma função da variação do conteúdo de umidade ao qual o grão é submetido, ou seja, em função da diferença entre a umidade inicial e a umidade de equilíbrio com o ar ambiente.

7 - Existe um limite de variação do conteúdo de umidade no grão para o qual não ocorrem fissuras ou então estas ocorrem em poucos grãos. Acima de determinado valor de variação do conteúdo de umidade nos grãos, a porcentagem final de grãos fissurados é máxima (100%).

8 - Para a descrição das isotermas de sorção de arroz brunido, integral e em casca, a equação de GAB ofereceu os menores desvios em relação aos pontos experimentais. A equação de Henderson oferece boa descrição da umidade de equilíbrio para valores de atividade de água entre 0,3 e 0,9. A equação de Halsey não ofereceu bom ajuste.

9 - Foi observado pronunciado efeito de histerese somente para o arroz brunido.

10 - Observou-se uma variação da resistência à transferência de umidade na casca do arroz, em função da umidade relativa do ar. Esta variação foi menor para o arroz integral e praticamente inexistente para o arroz brunido (endosperma).

6 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGRAWAL, K.K., CLARY, B.L. e NELSON, G.L. (1971), "Investigation into the Theories of Desorption Isotherms for Rough Rice and Peanuts", Journal of Food Science, 36(6):919-924.
- AGUERRE, R., SUÁREZ, C. e VIOLLAZ, P.E. (1982), "Drying Kinetics of Rough Rice Grain", Journal of Food Technology 17(6):679-686.
- AGUERRE, R., SUÁREZ, C. e VIOLLAZ, P.E. (1983), "Moisture Desorption Isotherms of Rough Rice", Journal of Food Technology, 18(3):345-351.
- AGUERRE, R., SUÁREZ, C. e VIOLLAZ, P.E. (1984), "Analysis of the Interface Conditions during Drying of Rice", Journal of Food Technology, 19(3):315-323.
- AGUERRE, R., GABITTO, J.F. e CHIRIFE, J. (1985), "Utilization of Fick's Second Law for the Evaluation of Diffusion Coefficients in Food Processes Controlled by Internal Diffusion", Journal of Food Technology 20(5):623-629.
- ARORA, V.K., HENDERSON, S.M. e BURKHARDT, T.H. (1973), "Rice Drying Cracking versus Thermal and Mechanical Properties", Transactions of the ASAE, 320-327.

- AUTREY, H.S., ALTSCHUL, A.M. e HOGAN, J.T. (1955), "Effects of Milling Conditions on Breakage of Rice Grains", *Agricultural and Food Chemistry* 3(7):593-599.
- BAN, T. (1971), "Rice Cracking in High Rate Drying", *JARQ* 6(2):113-116.
- BATCHER, O.M., LITTLE, R.R., DAWSON, E.H. e HOGAN, J.T. (1958), "Cooking Quality of White Rice milling from Rough Rice Dried at different temperatures", *Cereal Chemistry*, 35(6):428-434.
- BENEDETTI, B.C. e JORGE, J.T. (1987), "Curvas de Umidade de Equilíbrio de Vários Grãos", *Ciencia e Tecnologia de Alimentos*, 7(2):172-188.
- BHASHYAM, M.K., RAJU, G.N., SRINIVAS, T. e NAIDU, B.S. (1984), "Physico-chemical Studies in Relation to Cracking Properties in Rice Using Isogenic Lines", *Journal of Food Science and Technology*, 21:272-277.
- BIZOT, H. (1983), "Using the 'GAB' Model to Construct Sorption Isotherms". In: *Physical Properties of Foods*, Jonnit, R., Fischer, F.E., Hallstrom, B., Meffert, H.F.T., Spiess, W.E. and Voss, G. (eds), Applied Science Publishers, London, pp.43-54.
- BOQUET, R., CHIRIFE, J. e IGLESIAS, H.A. (1978), "Equations for fitting Water Sorption Isotherms of Foods", *Journal of Food Technology*, 13:319-327.

- BRANDÃO, S.S., GALVÃO, J.D. e OLIVEIRA, L.M. (1970), "Relação entre umidade dos Grãos na Colheita do Arroz e o Rendimento Total e de Grãos Inteiros", Revista Ceres 91(17):35-46.
- BREESE, M.H. (1955), "Hysteresis in the Hygroscopic Equilibria of Rough Rice at 25°C", Cereal Chemistry, 32(6):481-487.
- CHATTOPADHYAY, P.K., HAMMERLE, J.R. e HAMANN, D.D. (1979), "Time, Temperature and Moisture Effects on the Failure Strength of Rice", Cereal Foods World 24(10):514-516.
- CHEN, Yi-luen e KUNZE, O.R. (1979), "Effect of Heating without Drying on the Brown Rice Kernel", presented at the 1979 Southwest Region Meeting American Society of Agricultural Engineers, Hot Springs, Arkansas.
- CHITTENDEN, D.H. e HUSTRULID, A. (1966), "Determining Drying Constants for Shelled Corn", Transactions of the ASAE 9(1):52-55.
- CHU, Shu-Tung e HUSTRULID, A. (1968a), "Numerical Solution of Diffusion Equations", Transactions of the ASAE 11(5):705-708.
- CHU, Shu-Tung e HUSTRULID, A. (1968b), "General Characteristics of Variable Diffusivity Process and the Dynamic Equilibrium Moisture Content", Transactions of the ASAE 11(5):709-710, 715.

- CRANK, J. (1967), *Mathematics of Diffusion*, Clarendon Press, Oxford, 347p.
- GODOY, O.P. (1963), "Rendimento em Grãos Inteiros no Beneficiamento do Arroz", *Revista Agricultura*, 38:39-46.
- HENDERSON, S.M. (1958), "The Causes and Characteristics of Rice Checking", *Rice Journal* 57(5):16 e 18.
- HOUSTON, D.F. (1952), "Hygroscopic Equilibria of Brown Rice", *Cereal Chemistry*, 29(1):71-76
- HOGAN, J.T. e PLANK, R.W. (1958), "Hydration Characteristics of Rice as influenciad by Variety and Drying Method", *Cereal Chemistry*, 35(6):469-482.
- HUSTRULID, A. (1962), "Comparative Drying Rates of Naturally Moist, Remoistened and Frozen Shelled Corn", *Transactions of the ASAE* 5(1):64-67.
- HUSTRULID, A. e FLIKKE, A.M. (1959), "Theoretical Drying Curve for Shelled Corn", *Transactions of the ASAE* 2(1):112-114.
- IGLESIAS, H.A. e CHIRIFE, J. (1976a), "Equilibrium Moisture Contents of air dried Beef. Dependence on drying temperature", *Journal of Food Technology*, 11:565-573.
- IGLESIAS, H.A. e CHIRIFE, J. (1976b), "A Model for Describing the Water Sorption Behavior of Foods", *Journal Food Science*, 41:984-992.

- IGLESIAS, H.A., CHIRIFE, J. e LOMBARDI, J.L. (1975), "An Equation for Correlating equilibrium Moisture Contents in Foods", *Journal of Food Technology*, 10:289-297.
- JULIANO, B.O. (1964), "Hygroscopic Equilibria of Rough Rice", *Cereal Chemistry*, 41(3):191-197.
- JULIANO, B.O. (1972), "The Rice Caryopsis and its composition", in *Rice, Chemistry and Technology*, D.F. Houston (ed.), American Association of Cereal Chemists, St. Paul, Minnesota
- KACHRU, R.P. e MATHES, R.K. (1976), "The Behaviour of Rough Rice in Sorption", *Journal of Agricultural Engineering Research*, 21:405-416.
- KARON, M.L. e ADAMS, M.E. (1949), "Hygroscopic Equilibrium of Rice and Rice Fractions", *Cereal Chemistry* 26(1):1-12.
- KUNZE, O.R. (1977), "Moisture Adsorption Influences on Rice", *Journal of Food Process Engineering* 1(2):167-181.
- KUNZE, O.R. (1979), "Fissuring of the Rice Grain After Heated Air Drying", *Transactions of the ASAE* 22(5):1197-1201, 1207
- KUNZE, O.R. and CHOUDHURY, M.S.U. (1972), "Moisture Adsorption Related to the Tensile Strength of Rice", *Cereal Chemistry* 49(6):684-696.

KUNZE, O.R. e HALL, C.W. (1965), "Relative Humidity Changes that cause Brown Rice to Crack", Transactions of the ASAE, 8(3):396-399.

KUNZE, O.R. e HALL, C.W. (1967), "Moisture Adsorption Characteristics of Brown Rice", Transactions of the ASAE, 10(4):448-450, 453.

KUNZE, O.R. e PRASAD, S. (1978), "Grain Fissuring Potentials in Harvesting and Drying of Rice", Transactions of the ASAE 21(2):361-366.

LOMAURO, C.J., BAKSHI, A.S. e LABUZA, T.P. (1985), "Evaluation of Food Moisture Sorption Isotherm Equation. Part II: Milk, Coffee, Tea, Oilseeds, Spices and Starchy Foods", Lebensmittel-Wissenschaft-u-Technologie, 18(2):118-124.

MAROULIS, Z.B., TSAMI, E., MARINOS-KOURIS, D. e SARAVACOS, G.D. (1988), "Applications of the GAB Model to the Moisture Sorption Isotherms for Dried Fruits", Journal of Food Engineering, 7(1):63-78.

McEWEN, E. e O'CALLAGHAN, J.R. (1955), "The effect of Air Humidity on through Drying of Wheat Grain", Transactions of Institution of Chemical Engineers, 33(3):135.

McNEAL, X. (1961), "Drying Techniques and temperatures On Head Rice Yields", Agricultural Experiment Station, University of Arkansas, Bulletin 640.

- MISRA, M.K. e BROOKER, D.B. (1980), "Thin Layer Drying and re-wetting equations for Shelled Yellow Corn", Transactions of the ASAE, 23(5):1254-1260.
- MISRA, R.N e YOUNG, J.H. (1980), "Numerical Solution of Simultaneous Moisture Diffusion and Shrinkage During Soybean Drying", Transactions of the ASAE 23(5):1277-1282.
- NISHIYAMA, Y., SATOH, M. e SHIMIZU, H. (1979), "Crack Generation of Rough Rice after Drying", Journal of the Faculty of Agriculture, Iwate University, 14(3):277-288.
- NGUYEN, C.N. e KUNZE, O.R. (1984), "Fissures Related to Post-Drying Treatments in Rough Rice", Cereal Chemistry 61(1):63-68.
- PUTRANON, R., BOWREY, R.G. e ECCLESTON, J. (1979), "Sorption Isotherms for two Cultivars of Paddy Rice Grown in Australia", Food Technology in Australia, 31(12):510-515.
- RHIND, D. (1962), "The Breakage of Rice in Milling: A Review", Tropical Agriculture Trin., 39(1):19-28.
- SHARMA, A.D. e KUNZE, O.R. (1982), "Post-Drying Fissure Developments in Rough Rice", Transactions of the ASAE 25(2):465-468, 474.

SHARMA,A.D., KUNZE,O.R. e TOLLEY,H.D. (1982), "Rough Rice Drying as a Two-Compartment Model", Transactions of the ASAE, 25(1):221-224.

SHERWOOD,T.K. (1929), "The Drying of Solids I", Industrial and Engineering Chemistry, 21(1):12-16.

SMITH,W.D. e McCREA Jr.,W. (1951), "Where Breakage Occurs in the Milling of Rice", Rice Journal 54(2):14-15.

STEFFE,J.F. e SINGH,R.P. (1980), "Liquid Diffusivity of Rough Rice Components", Transactions of the ASAE 23(3):767-774.

STEFFE,J.F e SINGH,R.P. (1982), "Diffusion Coefficients for Predicting Rice Drying Behaviour", Journal agricultural Engineering Research 27():489-493.

STERMER,R.A. (1968), "Environmental Conditions and Stress Cracks in Milled Rice", Cereal Chemistry 45(4):365-373.

WASSERMAN,T. e CALDERWOOD,D.L. (1972), "Rough Rice Drying", in Rice, Chemistry and Technology, D.F.Houston (ed), American Association of Cereal Chemists, St. Paul, Minnesota, p.140-165.

ZURITZ,C., SINGH,R.P., MOINI,S.M. e HENDERSON,S.M. (1979), "Desorption Isotherms of Rough Rice from 10°C to 40°C", Transaction of the ASAE, 433-436.

APENDICE

TABELA A.1 - Valores de Atividade de Água e Umidade de Equilíbrio por variedade e tipo de arroz.

TABELA A.2 - Valores de umidade do grão, umidade adimensional, número de grãos fissurados, temperatura e umidade relativa do ar em função do tempo de exposição.

TABELA A.9 - Resultados do ajuste da equação de Lewis aos dados experimentais

LEGENDA

AV	- atividade de água
ENS	- n° do ensaio
NF	- número de grãos fissurados a cada tempo
X*	- umidade adimensional = $(UBS - UEQS) / (UIBS - UEQS)$
T	- temperatura do ar (°C)
TIP	- tipo do arroz
UBS	- umidade média do grão a cada tempo (g água/100g MS)
UEQS	- umidade de equilíbrio do grão (g água/100g MS)
UIBS	- umidade inicial do grão (g água / 100g matéria seca)
UR	- umidade relativa do ar (%) calculada
URF	- umidade relativa de referência (nominal)
VAR	- variedade do arroz

TABELA A.1 - VALORES EXPERIMENTAIS DE ATIVIDADE DE AGUA (a_w) E UMIDADE DE EQUILIBRIO (UEQ). TEMPERATURA 30°C.

VARIEDADE IAC-25			
Tipo	URF	a_w	UEQ
B	30	0,3120	0,0963
	40	0,4240	0,1174
	50	0,5060	0,1340
	70	0,6900	0,1452
		0,6970	0,1449
	80	0,8010	0,1802
	90	0,9120	0,2395
		0,9230	0,2352
		0,9030	0,2199
I	30	0,3010	0,0803
		0,3010	0,0803
	50	0,5080	0,1180
		0,5080	0,1193
	70	0,7050	0,1521
		0,7050	0,1525
	90	0,9090	0,2187
		0,9090	0,2238
C	30	0,2910	0,0639
		0,2910	0,0638
	50	0,5000	0,1077
		0,5040	0,1068
	70	0,7000	0,1300
		0,7000	0,1305
	90	0,9160	0,1901
		0,9160	0,1909

VARIEDADE IAC-165			
Tipo	URF	a_w	UEQ
B	30	0,2980	0,0972
	40	0,4150	0,1135
	50	0,4700	0,1299
		0,5240	0,1330
	70	0,6880	0,1497
		0,6970	0,1454
	80	0,8140	0,1864
	90	0,8890	0,2410
		0,9330	0,2481
		0,9060	0,2440
I	30	0,2980	0,0858
		0,2980	0,0852
	50	0,4990	0,1230
		0,4990	0,1244
	70	0,7010	0,1584
		0,7010	0,1584
	90	0,8900	0,2212
		0,8900	0,2265
C	30	0,2910	0,0701
		0,2910	0,0706
	50	0,4990	0,1066
		0,4990	0,1073
	70	0,7000	0,1308
		0,7000	0,1308
	90	0,9160	0,1833
		0,9160	0,1833

----- VAR=25 TIP=B URF=30 ENS=85 UIBS=14.61 UEQS=9.63 -----

TEMPO	X*	UBS	T	UR	NF
0.00	1.00000	14.61	30.0	30.2	0
0.25	0.80321	13.63	29.7	30.5	100
0.50	0.70080	13.12	29.6	30.3	100
0.75	0.62249	12.73	30.0	29.9	100
1.00	0.56426	12.44	30.0	29.9	100
1.25	0.51406	12.19	30.2	29.5	100
1.50	0.46787	11.96	30.4	29.3	100
1.75	0.43574	11.80	30.1	29.6	100
2.00	0.40161	11.63	29.9	30.0	100
2.50	0.35341	11.39	30.0	30.2	100
3.50	0.29518	11.10	29.8	30.4	100
4.00	0.26908	10.97	29.9	30.0	100
5.00	0.22088	10.73	30.5	29.6	100
6.00	0.20080	10.63	29.6	30.8	100
7.00	0.17470	10.50	30.0	30.4	100
8.00	0.15663	10.41	29.9	30.7	100
24.00	0.04016	9.83	30.1	29.9	100
48.00	0.00000	9.63	29.6	31.2	100

----- VAR=25 TIP=B URF=40 ENS=92 UIBS=15.59 UEQS=11.74 -----

TEMPO	X*	UBS	T	UR	NF
0.00	1.00000	15.59	30.1	40.5	18
0.25	0.78961	14.78	30.2	40.3	40
0.50	0.71688	14.50	30.1	40.5	76
0.75	0.65974	14.28	30.1	40.5	89
1.00	0.61558	14.11	30.1	40.5	96
1.25	0.57143	13.94	30.0	41.1	98
1.50	0.53766	13.81	30.0	40.9	99
1.75	0.50649	13.69	30.0	40.9	99
2.00	0.48312	13.60	30.0	41.6	100
2.50	0.43896	13.43	30.1	41.2	100
3.00	0.37662	13.19	30.1	41.2	100
3.50	0.29870	12.89	30.1	41.2	100
4.00	0.27532	12.80	30.1	41.2	100
5.25	0.15325	12.33	30.3	40.9	100
5.50	0.14545	12.30	29.9	41.5	100
6.00	0.13247	12.25	30.1	41.2	100
6.50	0.11169	12.17	30.4	40.7	100
7.00	0.10390	12.14	30.0	41.3	100
7.50	0.08831	12.08	30.0	41.6	100
8.00	0.08312	12.06	30.0	41.8	100
8.50	0.07792	12.04	30.1	41.2	100
9.00	0.06753	12.00	30.1	41.2	100
9.50	0.05455	11.95	30.3	41.1	100
10.00	0.05455	11.95	29.8	41.8	100
10.50	0.04416	11.91	30.0	41.1	100
11.00	0.03636	11.88	30.0	41.4	100
11.50	0.03636	11.88	30.2	40.6	100
21.50	0.00000	11.74	29.4	42.4	100

----- VAR=25 TIP=B URF=50 ENS=83 UIBS=14.61 UEQS=13.4 -----

TEMPO	X*	UBS	T	UR	NF
0.00	1.000000	14.61	30.0	49.9	0
0.25	0.75207	14.31	30.2	49.8	0
0.50	0.75207	14.31	29.9	50.5	0
0.75	0.67769	14.22	30.1	50.0	0
1.00	0.64463	14.18	30.1	50.2	0
1.50	0.57851	14.10	30.0	50.1	0
2.00	0.54545	14.06	30.0	50.1	0
2.50	0.54545	14.06	30.0	50.1	0
3.00	0.48760	13.99	30.0	50.3	0
3.50	0.51240	14.02	30.0	50.6	0
4.00	0.48760	13.99	29.7	50.9	0
5.00	0.45455	13.95	29.9	50.5	0
6.00	0.45455	13.95	29.8	50.4	0
7.00	0.47107	13.97	30.0	51.9	0
8.00	0.42975	13.92	30.0	50.3	0
24.00	0.000000	13.40	30.5	50.3	0

----- VAR=25 TIP=B URF=50 ENS=89 UIBS=14.72 UEQS=13.4 -----

TEMPO	X*	UBS	T	UR	NF
0.00	1.000000	14.72	30.3	50.1	10
0.25	0.79545	14.45	30.1	50.2	11
0.50	0.71212	14.34	30.0	50.4	16
0.75	0.56061	14.14	30.2	50.3	16
1.00	0.53030	14.10	30.3	50.1	16
1.25	0.49242	14.05	29.9	51.1	17
1.50	0.46212	14.01	30.0	50.9	18
1.75	0.42424	13.96	30.1	50.5	18
2.00	0.40909	13.94	30.1	50.0	18
2.50	0.37121	13.89	30.1	50.3	18
3.00	0.34091	13.85	30.0	50.6	18
3.50	0.31818	13.82	29.9	50.8	19
4.00	0.31061	13.81	29.9	50.5	19
4.50	0.28788	13.78	30.0	50.9	19
5.00	0.28788	13.78	30.0	50.6	19
5.50	0.27273	13.76	30.0	50.6	19
6.00	0.28030	13.77	29.4	51.9	19
6.50	0.26515	13.75	30.0	50.4	19
7.00	0.22727	13.70	30.3	49.9	19
7.50	0.21212	13.68	30.4	50.0	19
8.00	0.19697	13.66	30.3	50.1	19
8.50	0.18182	13.64	30.7	48.7	19

----- VAR=25 TIP=B URF=70 ENS=78 UIBS=13.38 UEQS=14.52 -----

TEMPO	X*	UBS	T	UR	NF
0.00	1.00000	13.38	30.3	68.3	0
0.25	0.79825	13.61	30.0	69.9	0
0.50	0.69298	13.73	30.1	68.8	0
0.75	0.63158	13.80	30.1	68.8	0
1.00	0.55263	13.89	30.1	69.1	0
1.25	0.46491	13.99	30.1	68.8	0
1.52	0.42105	14.04	30.0	69.3	0
1.75	0.38596	14.08	30.0	69.3	0
2.00	0.34211	14.13	30.0	69.3	0
2.50	0.29825	14.18	30.2	68.5	0
3.00	0.25439	14.23	30.1	68.8	0
3.50	0.18421	14.31	29.9	69.6	0
3.75	0.15789	14.34	30.0	69.9	0
5.00	0.05263	14.46	0.0	0.0	0
5.50	0.03509	14.48	29.8	70.1	0
6.00	0.01754	14.50	0.0	0.0	0
7.00	-0.00877	14.53	0.0	0.0	0
8.00	-0.02632	14.55	0.0	0.0	0
10.00	0.07895	14.43	30.5	67.5	0
25.50	0.00000	14.52	30.0	69.0	0

----- VAR=25 TIP=B URF=70 ENS=96 UIBS=13.7 UEQS=14.49 -----

TEMPO	X*	UBS	T	UR	NF
0.00	1.00000	13.70	30.2	69.7	16
0.25	0.82278	13.84	30.0	69.6	21
0.50	0.72152	13.92	30.1	69.4	25
0.75	0.64557	13.98	30.0	70.2	25
1.00	0.58228	14.03	30.0	69.9	25
1.25	0.53165	14.07	30.0	69.6	25
1.50	0.49367	14.10	30.0	69.9	26
1.75	0.45570	14.13	30.0	70.2	27
2.00	0.40506	14.17	30.0	70.2	27
2.50	0.34177	14.22	29.9	70.8	27
3.00	0.26582	14.28	29.9	71.0	27
3.50	0.22785	14.31	29.9	70.8	27
4.00	0.20253	14.33	29.9	70.8	27
4.50	0.16456	14.36	29.8	70.7	27
5.00	0.12658	14.39	29.8	70.7	27
6.00	0.10127	14.41	29.8	70.7	27
23.00	0.00000	14.49	30.1	69.7	27

----- VAR=25 TIP=B URF=80 ENS=98 UIBS=14.22 UEQS=18.02 -----

TEMPO	X*	UBS	T	UR	NF
0.00	1.00000	14.22	30.2	79.2	15
0.25	0.83158	14.86	30.2	78.9	37
0.50	0.73947	15.21	30.2	78.9	62
0.75	0.66842	15.48	30.2	78.9	75
1.00	0.61316	15.69	30.2	78.9	75
1.25	0.55263	15.92	30.1	79.5	78
1.50	0.50000	16.12	30.0	80.1	78
1.75	0.45263	16.30	29.9	80.4	79
2.00	0.41579	16.44	30.0	80.1	79
3.00	0.24737	17.08	29.8	80.9	80
4.00	0.16842	17.38	29.9	80.7	80
5.00	0.12105	17.56	30.0	79.8	80
6.00	0.07368	17.74	29.9	81.0	80
7.00	0.05526	17.81	30.0	80.4	80
8.00	0.04211	17.86	29.9	80.4	80
9.00	0.03421	17.89	29.9	81.7	80
10.00	0.02895	17.91	30.0	80.4	80
25.00	0.00000	18.02	30.0	80.1	80

----- VAR=25 TIP=B URF=90 ENS=80 UIBS=14.46 UEQS=23.95 -----

TEMPO	X*	UBS	T	UR	NF
0.00	1.00000	14.46	30.0	89.9	0
0.25	0.83772	16.00	30.3	89.0	0
0.50	0.80295	16.33	30.4	88.3	0
0.75	0.64700	17.81	30.0	89.9	0
1.00	0.57429	18.50	30.0	89.9	0
1.25	0.50896	19.12	29.9	90.6	0
1.50	0.44995	19.68	29.9	90.6	0
1.75	0.40991	20.06	30.0	89.6	0
2.00	0.37302	20.41	29.9	90.6	0
2.50	0.32561	20.86	30.0	90.3	0
3.00	0.28451	21.25	30.0	90.6	0
3.50	0.25711	21.51	29.9	90.9	0
4.00	0.23709	21.70	29.9	90.9	0
5.00	0.18967	22.15	29.8	91.2	0
6.00	0.17597	22.28	29.8	91.2	0
10.00	0.04320	23.54	29.6	91.9	0
24.00	0.00000	23.95	29.7	91.2	0

----- VAR=25 TIP=B URF=90 ENS=88 UIBS=14.86 UEQS=23.52 -----

TEMPO	X*	UBS	T	UR	NF
0.00	1.00000	14.86	30.0	89.9	0
0.25	0.80600	16.54	30.0	89.2	0
0.50	0.68129	17.62	29.9	90.6	0
0.75	0.56351	18.64	30.0	90.3	0
1.00	0.49423	19.24	30.1	89.9	0
1.25	0.40878	19.98	29.8	91.2	0
1.50	0.34527	20.53	29.9	91.3	0
2.00	0.25520	21.31	29.5	92.2	0
2.50	0.19284	21.85	29.8	90.9	0
3.75	0.07044	22.91	29.8	91.2	0
4.50	0.02194	23.33	29.9	91.3	0
5.00	0.01270	23.41	29.7	91.9	0
8.00	0.00924	23.44	30.2	89.9	0
24.00	0.00000	23.52	29.6	92.3	0

----- VAR=25 TIP=B URF=90 ENS=95 UIBS=14.66 UEQS=21.99 -----

TEMPO	X*	UBS	T	UR	NF
0.00	0.998636	14.67	30.0	90.3	12
0.25	0.766712	16.37	30.0	90.3	89
0.50	0.646658	17.25	30.1	89.3	100
0.75	0.547067	17.98	30.0	90.3	100
1.00	0.472033	18.53	30.1	89.6	100
1.25	0.407913	19.00	30.2	89.3	100
1.50	0.354707	19.39	30.2	89.6	100
1.75	0.308322	19.73	30.2	89.6	100
2.00	0.274216	19.98	30.2	89.6	100
2.50	0.158254	20.83	30.2	89.6	100
3.00	0.155525	20.85	30.2	89.6	100
3.50	0.154161	20.86	30.1	89.9	100
4.50	0.124147	21.08	30.3	89.3	100
5.00	0.122783	21.09	30.4	89.0	100
5.50	0.100955	21.25	29.9	91.3	100
6.00	0.102319	21.24	30.2	89.6	100
6.50	0.107776	21.20	30.3	89.6	100
7.00	0.098226	21.27	30.3	89.6	100
7.50	0.105048	21.22	30.3	89.3	100
8.00	0.068213	21.49	29.9	90.9	100
21.50	0.000000	21.99	30.0	90.3	100

----- VAR=25 TIP=C URF=30 ENS=70A UBS=12.71 UEQS=6.39 -----

TEMPO	X*	UBS	T	UR	NF
0.00	1.000000	12.71	29.9	30.5	0
0.25	0.86392	11.85	30.2	29.5	0
0.50	0.83228	11.65	30.2	29.5	0
0.75	0.81013	11.51	30.2	29.5	0
1.25	0.77373	11.28	30.3	29.0	0
1.50	0.75791	11.18	30.2	29.1	0
1.75	0.74525	11.10	30.1	29.4	0
2.00	0.72943	11.00	30.1	29.4	0
2.50	0.70095	10.82	30.0	29.7	0
3.00	0.67880	10.68	29.9	29.6	0
4.25	0.62658	10.35	29.8	29.9	0
4.50	0.61867	10.30	29.7	30.2	0
5.00	0.60443	10.21	30.1	29.3	0
5.50	0.56329	9.95	30.0	30.0	0
7.17	0.48892	9.48	30.0	29.7	0
8.00	0.47152	9.37	0.0	0.0	0
9.00	0.42247	9.06	30.0	30.0	0
10.00	0.37500	8.76	30.3	29.4	0
25.00	0.19462	7.62	30.4	0.0	0
27.00	0.18196	7.54	30.1	29.3	0
32.50	0.15506	7.37	29.6	30.5	0
48.00	0.09335	6.98	30.5	28.8	0
50.00	0.08703	6.94	30.0	29.6	0
53.00	0.08386	6.92	29.5	30.1	0
55.50	0.07753	6.88	29.8	30.5	0
120.00	0.00000	6.39	30.5	29.1	0

----- VAR=25 TIP=C URF=30 ENS=70B UBS=11.92 UEQS=6.38 -----

TEMPO	X*	UBS	T	UR	NF
0.00	1.00000	11.92	29.9	30.5	0
0.25	0.86101	11.15	30.2	29.5	0
0.50	0.82310	10.94	30.2	29.5	0
0.75	0.79603	10.79	30.2	29.5	0
1.25	0.75632	10.57	30.3	29.0	0
1.50	0.73827	10.47	30.2	29.1	0
1.75	0.72022	10.37	30.1	29.4	0
2.00	0.70758	10.30	30.1	29.4	0
2.50	0.67509	10.12	30.0	29.7	0
3.00	0.65343	10.00	29.9	29.6	0
4.25	0.59206	9.66	29.8	29.9	0
4.50	0.58303	9.61	29.7	30.2	0
5.00	0.56498	9.51	30.1	29.3	0
5.50	0.54513	9.40	30.0	30.0	0
7.17	0.49819	9.14	30.0	29.7	0
8.00	0.48014	9.04	0.0	0.0	0
9.00	0.45487	8.90	30.0	30.2	0
10.00	0.42780	8.75	30.3	29.4	0
25.00	0.22022	7.60	30.4	0.0	0
27.00	0.21119	7.55	30.1	29.3	0
32.50	0.18592	7.41	29.6	30.5	0
48.00	0.11191	7.00	30.5	28.8	0
50.00	0.10289	6.95	30.0	29.7	0
53.00	0.09747	6.92	29.5	30.1	0
55.50	0.09747	6.92	29.8	30.5	0
120.00	0.00000	6.38	30.5	29.1	0

----- VAR=25 TIP=C URF=50 ENS=66A UIBS=13.03 UEQS=10.77 -----

TEMPO	X*	UBS	T	UR	NF
0.00	1.000000	13.03	0.0	0.0	0
0.25	0.85841	12.71	30.0	49.3	0
0.50	0.81416	12.61	30.0	49.9	0
0.75	0.76549	12.50	30.0	49.3	0
1.00	0.73451	12.43	30.0	49.3	0
1.25	0.71239	12.38	30.0	49.3	0
1.75	0.66372	12.27	30.0	49.3	0
2.50	0.60177	12.13	30.0	49.3	0
3.00	0.61062	12.15	0.0	0.0	0
3.50	0.54425	12.00	30.0	49.3	0
4.00	0.52212	11.95	30.0	49.3	0
4.50	0.50442	11.91	29.9	50.3	0
5.00	0.48673	11.87	30.0	49.9	0
5.50	0.46018	11.81	30.0	49.3	0
6.00	0.43805	11.76	30.0	49.3	0
7.00	0.42035	11.72	30.0	49.3	0
8.00	0.37168	11.61	30.1	49.2	0
22.50	0.07080	10.93	30.3	48.6	0
25.00	0.07522	10.94	29.9	50.0	0
29.00	0.11504	11.03	29.5	51.0	0
70.00	0.000000	10.77	29.9	50.0	0

----- VAR=25 TIP=C URF=50 ENS=66B UIBS=12.91 UEQS=10.68 -----

TEMPO	X*	UBS	T	UR	NF
0.00	1.000000	12.91	0.0	0.0	0
0.25	0.85202	12.58	30.0	49.1	0
0.50	0.79821	12.46	30.0	49.9	0
0.75	0.77130	12.40	30.0	49.3	0
1.00	0.74439	12.34	30.0	49.3	0
1.25	0.71749	12.28	30.0	49.3	0
1.75	0.68161	12.20	30.0	49.3	0
2.50	0.59641	12.01	30.0	49.3	0
3.00	0.59193	12.00	0.0	0.0	0
3.50	0.54709	11.90	30.0	49.3	0
4.00	0.51570	11.83	30.0	49.3	0
4.50	0.50673	11.81	29.9	50.3	0
5.00	0.49327	11.78	30.0	49.9	0
5.50	0.45740	11.70	30.0	49.3	0
6.00	0.43946	11.66	30.0	49.3	0
7.00	0.40359	11.58	30.0	49.3	0
8.00	0.38565	11.54	30.1	49.4	0
22.50	0.07175	10.84	30.3	48.6	0
25.00	0.08072	10.86	29.9	50.0	0
29.00	0.09865	10.90	29.5	51.0	0
70.00	0.000000	10.68	29.8	50.4	0

----- VAR=25 TIP=C URF=70 ENS=63A UIBS=12.84 UEQS=13 -----

TEMPO	X*	UBS	T	UR	NF
0.00	1.00000	12.84	30.2	68.2	0
0.75	0.9375	12.85	30.1	70.0	0
1.00	1.00000	12.84	30.1	70.0	0
1.25	1.0625	12.83	30.2	69.4	0
1.50	0.8750	12.86	30.1	70.0	0
1.75	0.9375	12.85	30.2	69.4	0
2.00	0.7500	12.88	30.2	69.4	0
6.50	0.0625	12.99	30.0	69.9	0
24.00	-0.1250	13.02	30.2	70.0	0
26.00	0.00000	13.00	30.2	70.0	0

----- VAR=25 TIP=C URF=70 ENS=63B UIBS=12.83 UEQS=13.05 -----

TEMPO	X*	UBS	T	UR	NF
0.00	1.000000	12.83	30.2	68.2	0
1.00	0.95455	12.84	30.1	70.0	0
1.25	1.04545	12.82	30.2	69.4	0
1.50	0.90909	12.85	30.1	70.0	0
1.75	1.00000	12.83	30.1	70.0	0
2.00	0.81818	12.87	30.1	70.0	0
6.50	0.13636	13.02	30.0	69.9	0
24.00	0.00000	13.05	30.2	70.0	0
26.00	0.00000	13.05	30.2	70.0	0

----- VAR=25 TIP=C URF=90 ENS=76A UIBS=13.58 UEQS=19.01 -----

TEMPO	X*	UBS	T	UR	NF
0.00	1.000000	13.58	30.0	91.3	0
0.25	0.87477	14.26	30.0	90.9	0
0.50	0.82136	14.55	30.0	90.6	0
0.75	0.78453	14.75	0.0	0.0	0
1.00	0.74401	14.97	0.0	0.0	0
1.25	0.71087	15.15	0.0	0.0	0
1.50	0.68508	15.29	29.9	90.9	0
1.75	0.65562	15.45	29.8	92.3	0
2.00	0.62799	15.60	30.0	90.3	0
2.50	0.57090	15.91	29.9	91.3	0
3.12	0.46409	16.49	29.9	90.9	0
4.00	0.41989	16.73	0.0	0.0	0
4.50	0.37569	16.97	29.8	91.6	0
5.50	0.28361	17.47	29.9	91.9	0
6.25	0.22652	17.78	0.0	0.0	0
6.75	0.19521	17.95	30.0	90.9	0
7.00	0.16759	18.10	29.9	90.9	0
7.50	0.15285	18.18	29.9	91.9	0
8.00	0.13628	18.27	0.0	0.0	0
10.00	0.10866	18.42	30.5	89.7	0
25.00	0.00000	19.01	29.9	91.6	0

----- VAR=25 TIP=C URF=90 ENS=76B UIBS=13.4 UEQS=19.09 -----

TEMPO	X*	UBS	T	UR	NF
0.00	1.000000	13.40	29.9	91.6	0
0.25	0.88225	14.07	30.0	90.9	0
0.50	0.83480	14.34	30.0	90.6	0
0.75	0.80141	14.53	0.0	0.0	0
1.00	0.76274	14.75	0.0	0.0	0
1.25	0.73286	14.92	0.0	0.0	0
1.50	0.70299	15.09	29.9	90.9	0
1.75	0.67487	15.25	29.8	92.3	0
2.00	0.64675	15.41	30.0	90.3	0
2.50	0.59402	15.71	29.9	91.3	0
3.12	0.49033	16.30	29.9	90.9	0
4.00	0.45518	16.50	0.0	0.0	0
4.50	0.41476	16.73	29.8	91.6	0
5.50	0.32689	17.23	29.9	91.9	0
6.25	0.26714	17.57	0.0	0.0	0
6.75	0.24077	17.72	29.9	91.6	0
7.00	0.23023	17.70	29.9	90.9	0
7.50	0.19859	17.96	29.9	91.9	0
8.00	0.18805	18.02	0.0	0.0	0
10.00	0.13181	18.34	30.5	89.7	0
25.00	0.000000	19.09	29.9	91.6	0

----- VAR=25 TIP=I URF=30 ENS=72A UIBS=13.12 UEQS=8.03 -----

TEMPO	X*	UBS	T	UR	NF
0.00	1.000000	13.12	0.0	0.0	0
0.25	0.90963	12.66	30.4	30.0	0
0.50	0.86444	12.43	30.4	30.0	0
0.75	0.83301	12.27	30.3	29.8	0
1.00	0.80157	12.11	30.3	29.8	0
1.25	0.77407	11.97	30.0	30.0	0
1.50	0.75049	11.85	30.0	30.0	0
1.75	0.72692	11.73	30.0	30.0	0
2.00	0.69941	11.59	30.0	30.0	0
3.00	0.62868	11.23	29.8	30.8	0
3.50	0.59528	11.06	29.8	30.5	0
4.00	0.56974	10.93	29.8	30.5	0
5.50	0.50491	10.60	29.8	30.5	0
6.00	0.47741	10.46	29.8	30.5	0
7.50	0.42829	10.21	29.5	30.7	0
8.50	0.39686	10.05	29.5	31.5	0
9.00	0.38114	9.97	29.5	31.5	0
9.50	0.37525	9.94	29.5	31.2	0
24.00	0.15128	8.80	0.0	0.0	0
25.00	0.13949	8.74	30.0	30.0	0
26.00	0.13752	8.73	30.0	30.0	0
30.00	0.11788	8.63	29.5	31.2	0
48.00	0.000000	8.03	30.1	30.1	0

----- VAR=25 TIP=I URF=30 ENS=728 UIBS=12.93 UEQS=8.03 -----

TEMPO	X*	UBS	T	UR	NF
0.00	1.000000	12.93	0.0	0.0	0
0.25	0.91224	12.50	30.4	30.0	0
0.50	0.86122	12.25	30.4	30.0	0
0.75	0.83265	12.11	30.3	29.8	0
1.00	0.80612	11.98	0.0	0.0	0
1.25	0.77959	11.85	0.0	0.0	0
1.50	0.75102	11.71	30.0	30.0	0
1.75	0.72041	11.56	30.0	30.0	0
2.00	0.69184	11.42	30.0	30.0	0
3.00	0.62449	11.09	29.9	30.5	0
3.50	0.58571	10.90	29.8	30.5	0
4.00	0.56122	10.78	29.8	30.5	0
5.50	0.48980	10.43	29.8	30.5	0
6.00	0.46939	10.33	29.8	30.5	0
7.50	0.41224	10.05	29.5	30.7	0
8.50	0.37959	9.89	29.5	31.5	0
9.00	0.36122	9.80	0.0	0.0	0
9.50	0.35714	9.78	29.5	31.2	0
24.00	0.13265	8.68	0.0	0.0	0
25.00	0.11429	8.59	30.0	30.0	0
26.00	0.11224	8.58	29.9	30.2	0
30.00	0.09388	8.49	29.5	31.2	0
48.00	0.000000	8.03	30.1	30.1	0

----- VAR=25 TIP=I URF=50 ENS=68A UIBS=14.42 UEQS=11.8 -----

TEMPO	X*	UBS	T	UR	NF
0.00	1.000000	14.42	0.0	0.0	0
0.25	0.88931	14.13	30.4	48.2	0
0.50	0.83206	13.98	30.3	48.6	0
0.75	0.78244	13.85	30.3	48.6	0
1.00	0.74427	13.75	30.4	48.4	0
1.25	0.70992	13.66	30.2	49.0	0
1.50	0.68702	13.60	30.2	49.0	0
2.00	0.63740	13.47	30.1	49.4	0
2.50	0.58015	13.32	30.0	49.9	0
3.00	0.56489	13.28	29.9	49.8	0
3.50	0.52290	13.17	30.1	48.9	0
4.50	0.48473	13.07	30.0	49.5	0
5.50	0.45802	13.00	29.9	49.8	0
6.00	0.44656	12.97	30.0	49.9	0
7.17	0.41603	12.89	30.0	49.9	0
8.00	0.38931	12.82	30.0	49.9	0
25.00	0.09542	12.05	30.5	48.5	0
28.17	0.11832	12.11	30.0	49.3	0
48.00	0.000000	11.80	30.6	47.8	0
51.00	0.000000	11.80	29.5	50.8	0

----- VAR=25 TIP=I URF=50 ENS=688 UIBS=14.09 UEQS=11.93 -----

TEMPO	X*	UBS	T	UR	NF
0.00	1.00000	14.09	0.0	0.0	0
0.25	0.86574	13.80	30.4	48.2	0
0.50	0.79630	13.65	30.3	48.6	0
0.75	0.74537	13.54	30.3	48.6	0
1.00	0.69444	13.43	30.4	48.4	0
1.25	0.66667	13.37	30.2	49.0	0
1.50	0.62500	13.28	30.2	49.0	0
2.00	0.58796	13.20	30.1	49.4	0
2.50	0.52778	13.07	30.0	49.9	0
3.00	0.50000	13.01	29.9	49.8	0
3.50	0.46759	12.94	30.1	48.9	0
4.50	0.40741	12.81	30.0	49.5	0
5.50	0.38889	12.77	29.9	49.8	0
6.00	0.37037	12.73	30.0	49.9	0
7.17	0.34722	12.68	30.0	49.9	0
8.00	0.32407	12.63	30.0	49.9	0
25.00	0.04167	12.02	30.5	48.5	0
28.17	0.07407	12.09	30.0	49.3	0
48.00	0.00000	11.93	30.6	47.8	0
51.00	0.00000	11.93	29.5	50.8	0

----- VAR=25 TIP=I URF=70 ENS=64A UIBS=14.76 UEQS=15.21 -----

TEMPO	X*	UBS	T	UR	NF
0.00	1.00000	14.76	30.2	69.4	0
0.25	0.97778	14.77	30.2	70.0	0
0.50	0.93333	14.79	30.1	70.0	0
1.00	0.80000	14.85	30.0	70.5	0
1.25	0.75556	14.87	30.0	70.5	0
1.50	0.71111	14.89	30.0	70.5	0
2.00	0.71111	14.89	30.0	69.9	0
5.00	0.11111	15.16	29.8	74.7	0
7.00	0.17778	15.13	29.7	72.2	0
28.00	0.06667	15.18	29.5	0.0	0
49.00	0.00000	15.21	30.0	70.5	0

----- VAR=25 TIP=I URF=70 ENS=64B UIBS=14.82 UEQS=15.25 -----

TEMPO	X*	UBS	T	UR	NF
0.00	1.00000	14.82	30.2	69.4	0
0.25	0.97674	14.83	30.2	70.0	0
0.50	0.83721	14.89	30.1	70.0	0
1.00	0.76744	14.92	30.0	70.5	0
1.25	0.72093	14.94	30.0	70.5	0
1.50	0.65116	14.97	30.0	70.5	0
2.00	0.65116	14.97	30.0	69.9	0
5.00	0.11628	15.20	29.8	74.7	0
7.00	0.13953	15.19	29.7	72.2	0
28.00	0.09302	15.21	29.6	0.0	0
49.00	0.00000	15.25	30.0	70.5	0

----- VAR=25 TIP=I URF=90 ENS=74A UIBS=14.38 UEQS=21.27 -----

TEMPO	X*	UBS	T	UR	NF
0.00	1.00000	14.38	30.2	88.9	0
0.25	0.88117	15.27	30.3	89.0	0
0.50	0.78772	15.97	0.0	0.0	0
0.75	0.71429	16.52	30.2	89.6	0
1.00	0.65421	16.97	30.2	89.6	0
1.50	0.54206	17.81	30.3	89.3	0
1.75	0.48999	18.20	30.1	89.9	0
2.00	0.44726	18.52	30.2	90.3	0
2.50	0.36849	19.11	30.2	88.9	0
3.00	0.30841	19.56	30.2	89.6	0
4.08	0.21495	20.26	0.0	0.0	0
5.00	0.15754	20.69	30.2	88.9	0
6.25	0.10547	21.08	30.2	89.6	0
6.50	0.09613	21.15	30.2	90.3	0
7.25	0.08411	21.24	30.2	89.6	0
8.00	0.07477	21.31	30.3	89.6	0
8.50	0.07744	21.29	30.3	89.6	0
9.00	0.07477	21.31	30.3	89.6	0
10.00	0.08545	21.23	30.3	90.0	0
28.00	0.03338	21.62	30.0	90.9	0
31.00	0.00000	21.87	30.0	90.9	0

----- VAR=25 TIP=I URF=90 ENS=74B UIBS=14.34 UEQS=22.38 -----

TEMPO	X*	UBS	T	UR	NF
0.00	1.00000	14.34	30.2	88.9	0
0.25	0.87189	15.37	30.3	89.0	0
0.50	0.77488	16.15	0.0	0.0	0
0.75	0.70398	16.72	30.2	89.6	0
1.00	0.63682	17.26	30.2	89.6	0
1.50	0.52861	18.13	30.3	89.3	0
1.75	0.48134	18.51	30.1	89.9	0
2.00	0.43781	18.86	30.2	90.3	0
2.50	0.36318	19.46	30.2	88.9	0
3.00	0.30224	19.95	30.2	89.6	0
4.08	0.21766	20.63	0.0	0.0	0
5.00	0.16915	21.02	30.2	88.9	0
6.25	0.12189	21.40	30.2	89.6	0
6.50	0.11194	21.48	30.2	90.3	0
7.25	0.09701	21.60	30.2	89.6	0
8.00	0.08955	21.66	30.3	89.6	0
8.50	0.08955	21.66	30.3	89.6	0
9.00	0.08582	21.69	30.3	89.3	0
10.00	0.07090	21.81	30.3	90.0	0
28.00	0.02363	22.19	30.0	90.9	0
31.00	0.00000	22.38	30.0	90.9	0

----- VAR=165 TIP=B URF=30 ENS=84 UIBS=15.17 UEQS=9.72 -----

TEMPO	X*	UBS	T	UR	NF
0.00	1.00000	15.17	30.1	29.6	0
0.25	0.82018	14.19	30.1	29.6	0
0.50	0.69908	13.53	30.2	29.5	0
0.75	0.60917	13.04	30.3	29.2	0
1.00	0.54862	12.71	30.0	30.0	0
1.25	0.49358	12.41	30.1	29.9	0
1.50	0.45138	12.18	30.3	29.6	0
1.75	0.42018	12.01	30.1	29.7	0
2.00	0.38899	11.84	30.3	30.5	0
2.75	0.34862	11.62	29.8	31.5	0
3.00	0.33028	11.52	30.1	30.5	0
3.50	0.31009	11.41	29.9	30.5	0
4.00	0.28807	11.29	30.0	31.1	0
5.00	0.25321	11.10	29.7	31.1	0
6.00	0.22936	10.97	29.7	31.1	0
12.50	0.15046	10.54	30.1	31.2	0
24.00	0.06055	10.05	30.1	30.1	0
48.00	-0.00367	9.70	30.7	29.1	0
72.00	0.00000	9.72	30.2	29.8	0

----- VAR=165 TIP=B URF=40 ENS=93 UIBS=15.06 UEQS=11.35 -----

TEMPO	X*	UBS	T	UR	NF
0.00	1.00000	15.06	29.7	41.7	0
0.25	0.81132	14.36	29.7	41.7	30
0.50	0.72237	14.03	30.1	40.8	60
0.75	0.64960	13.76	29.9	41.2	84
1.00	0.58491	13.52	30.0	40.6	96
1.25	0.53639	13.34	30.0	40.9	100
1.50	0.49865	13.20	30.0	41.1	100
1.75	0.45822	13.05	30.0	40.8	100
2.00	0.42857	12.94	30.0	40.8	100
2.50	0.38005	12.76	29.6	41.4	100
3.00	0.33962	12.61	30.0	41.3	100
3.50	0.30728	12.49	29.7	41.7	100
4.00	0.27224	12.36	30.0	41.6	100
4.50	0.25606	12.30	30.0	41.3	100
5.00	0.22911	12.20	29.8	41.3	100
5.50	0.21563	12.15	29.8	41.8	100
6.00	0.19677	12.08	29.7	42.2	100
6.50	0.17520	12.00	30.2	40.8	100
7.00	0.15903	11.94	30.0	41.1	100
7.50	0.14825	11.90	30.3	40.9	100
8.00	0.13208	11.84	30.4	40.7	100
9.00	0.11321	11.77	30.1	40.9	100
9.50	0.10512	11.74	30.0	40.9	100
10.00	0.09704	11.71	30.1	40.7	100
10.50	0.08625	11.67	30.1	40.7	100
11.00	0.08356	11.66	29.9	41.7	100
11.50	0.07817	11.64	30.1	41.2	100
12.00	0.07278	11.62	30.0	41.6	100
24.00	0.00000	11.35	30.0	41.5	100

----- VAR=165 TIP=B URF=50 ENS=82 UIBS=14.71 UEQS=12.99 -----

TEMPO	X*	UBS	T	UR	NF
0.00	1.00000	14.71	30.3	50.9	0
0.25	0.76744	14.31	30.3	50.9	0
0.50	0.72093	14.23	30.1	50.5	0
0.75	0.63372	14.08	29.9	51.0	0
1.00	0.61047	14.04	29.9	50.8	0
1.50	0.56395	13.96	30.0	50.9	0
1.75	0.52907	13.90	30.0	50.3	0
2.00	0.52326	13.89	29.9	50.5	0
2.50	0.51163	13.87	29.8	51.5	0
3.50	0.45930	13.78	30.0	50.6	0
4.00	0.43605	13.74	30.0	50.4	0
5.00	0.43023	13.73	29.9	50.5	0
6.00	0.41279	13.70	30.0	50.9	0
7.00	0.38372	13.65	29.8	51.5	0
24.00	0.00000	12.99	31.0	47.0	0

----- VAR=165 TIP=B URF=50 ENS=90 UIBS=14.55 UEQS=13.3 -----

TEMPO	X*	UBS	T	UR	NF
0.00	1.000	14.55	30.1	50.5	1
0.25	0.768	14.26	30.3	50.6	1
0.50	0.664	14.13	30.1	51.3	1
0.75	0.592	14.04	0.0	0.0	1
1.00	0.512	13.94	30.3	50.6	1
1.25	0.480	13.90	30.1	51.0	1
1.50	0.448	13.86	30.1	50.5	1
1.75	0.408	13.81	30.1	51.0	1
2.00	0.416	13.82	30.1	51.0	1
2.50	0.328	13.71	0.0	0.0	1
3.00	0.296	13.67	30.1	51.0	1
3.50	0.224	13.58	30.1	51.0	1
4.00	0.168	13.51	30.0	50.9	1
4.50	0.176	13.52	30.0	50.9	1
6.00	0.120	13.45	30.0	51.4	1
6.50	0.104	13.43	30.0	51.2	1
7.00	0.104	13.43	30.0	51.2	1
7.50	0.104	13.43	30.0	51.4	1
8.00	0.080	13.40	30.0	50.9	1
8.50	0.072	13.39	30.0	51.4	1
9.00	0.056	13.37	30.1	51.0	1
9.50	0.048	13.36	30.0	50.9	1
21.00	0.088	13.41	29.6	52.4	1

----- VAR=165 TIP=B URF=70 ENS=77 UIBS=13.71 UEQS=14.97 -----

TEMPO	X*	UBS	T	UR	NF
0.00	1.00000	13.71	30.2	67.9	0
0.25	0.76984	14.00	0.0	0.0	0
0.50	0.71429	14.07	0.0	0.0	0
0.75	0.61905	14.19	30.1	0.0	0
1.00	0.55556	14.27	0.0	0.0	0
1.28	0.48413	14.36	0.0	0.0	0
1.50	0.43651	14.42	29.9	69.6	0
1.83	0.39683	14.47	29.8	70.7	0
2.00	0.36508	14.51	29.9	0.0	0
2.50	0.33333	14.55	0.0	0.0	0
3.00	0.23016	14.68	29.7	71.3	0
3.50	0.15873	14.77	29.7	0.0	0
4.00	0.10317	14.84	29.6	0.0	0
4.50	0.09524	14.85	29.8	71.3	0
5.00	0.07143	14.88	29.9	0.0	0
6.00	0.00000	14.97	29.8	71.0	0
7.00	-0.00794	14.98	29.8	70.7	0
8.00	0.02381	14.94	29.8	70.1	0
24.00	0.00000	14.97	30.2	68.8	0

----- VAR=165 TIP=B URF=70 ENS=97 UIBS=13.92 UEQS=14.54 -----

TEMPO	X*	UBS	T	UR	NF
0.00	1.00000	13.92	30.1	69.7	0
0.25	0.82258	14.03	30.0	69.9	0
0.50	0.72581	14.09	30.1	70.3	0
0.75	0.64516	14.14	30.1	70.0	0
1.00	0.59677	14.17	30.1	70.0	0
1.50	0.50000	14.23	30.0	70.2	0
2.00	0.45161	14.26	30.0	70.2	0
2.50	0.38710	14.30	0.0	0.0	0
3.00	0.35484	14.32	30.0	70.2	0
4.00	0.27419	14.37	30.0	70.2	0
5.00	0.16129	14.44	29.8	71.3	0
7.00	0.14516	14.45	29.9	70.8	0
24.00	0.00000	14.54	30.2	69.7	0

----- VAR=165 TIP=B URF=80 ENS=99 UIBS=15.55 UEQS=18.64 -----

TEMPO	X*	UBS	T	UR	NF
0.00	1.00000	15.55	30.0	80.1	0
0.25	0.83819	16.05	29.9	80.7	13
0.50	0.74110	16.35	30.0	80.4	48
0.75	0.63430	16.68	29.8	81.0	61
1.00	0.56311	16.90	30.0	80.1	65
1.25	0.48867	17.13	30.0	80.1	68
1.50	0.40777	17.38	29.9	82.9	72
2.00	0.33333	17.61	29.9	80.4	75
2.50	0.31392	17.67	29.8	81.3	76
3.00	0.27832	17.78	30.0	80.4	76
4.00	0.18770	18.06	30.0	80.4	76
5.00	0.12621	18.25	29.9	80.7	76
6.00	0.08091	18.39	29.9	81.0	76
8.00	0.01294	18.60	29.8	81.3	76
24.00	0.00971	18.61	30.2	79.8	76
30.00	0.00000	18.64	30.0	81.4	76

----- VAR=165 TIP=B URF=90 ENS=81 UIBS=14.39 UEQS=24.1 -----

TEMPO	X*	UBS	T	UR	NF
0.00	1.00000	14.39	30.6	88.0	0
0.25	0.82698	16.07	30.1	89.3	0
0.50	0.73120	17.00	30.0	89.9	0
0.75	0.63852	17.90	30.0	90.6	0
1.00	0.56231	18.64	29.8	91.6	0
1.50	0.46653	19.57	29.9	90.6	0
1.75	0.42327	19.99	29.9	90.2	0
2.00	0.38929	20.32	29.8	90.6	0
2.50	0.31411	21.05	29.8	90.6	0
3.00	0.30896	21.10	30.0	89.9	0
3.50	0.28424	21.34	30.0	89.9	0
4.00	0.27085	21.47	30.1	89.6	0
5.00	0.22657	21.90	29.9	90.6	0
6.00	0.22245	21.94	29.9	91.3	0
7.00	0.21009	22.06	30.0	89.6	0
8.00	0.20391	22.12	30.0	90.6	0
11.00	0.19156	22.24	30.1	89.6	0
24.00	0.00000	24.10	30.2	88.9	0

----- VAR=165 TIP=B URF=90 ENS=87 UIBS=14.98 UEQS=24.81 -----

TEMPO	X*	UBS	T	UR	NF
0.00	1.00000	14.98	30.0	89.9	0
0.25	0.78535	17.09	30.0	90.3	0
0.50	0.68667	18.06	30.1	88.9	0
0.75	0.60224	18.89	30.1	89.6	0
1.25	0.49949	19.90	30.3	89.0	0
1.50	0.44761	20.41	30.0	89.9	0
1.75	0.40387	20.84	30.0	89.9	0
2.00	0.37538	21.12	30.1	89.3	0
2.50	0.31434	21.72	29.8	91.2	0
3.00	0.27976	22.06	30.1	89.9	0
4.00	0.21261	22.72	30.1	89.6	0
5.00	0.20651	22.78	30.2	89.3	0
6.00	0.16989	23.14	30.0	90.3	0
12.00	0.07935	24.03	30.1	88.9	0
25.00	0.09359	23.89	29.8	91.2	0
31.00	0.00000	24.81	29.5	93.3	0

----- VAR=165 TIP=B URF=90 ENS=94 UBS=15.33 UEQS=24.4 -----

TEMPO	X*	UBS	T	UR	NF
0.00	1.00000	15.33	30.0	89.6	0
0.25	0.83572	16.82	30.1	89.3	90
0.50	0.75193	17.58	30.2	89.3	97
0.75	0.68247	18.21	30.1	89.6	100
1.00	0.62404	18.74	30.2	88.9	100
1.25	0.57111	19.22	30.2	89.3	100
1.50	0.55127	19.40	30.3	89.0	100
1.75	0.51268	19.75	30.2	89.3	100
2.00	0.49504	19.91	30.1	89.3	100
3.00	0.42889	20.51	30.3	89.3	100
3.50	0.39912	20.78	30.2	89.3	100
4.00	0.34730	21.25	30.0	90.3	100
4.50	0.32304	21.47	30.0	89.9	100
5.00	0.29658	21.71	29.9	90.6	100
6.00	0.25579	22.08	29.8	91.2	100
7.00	0.24697	22.16	29.8	91.2	100
7.50	0.23815	22.24	29.8	91.2	100
8.00	0.23264	22.29	29.8	91.2	100
8.50	0.22933	22.32	29.9	90.6	100
9.00	0.22271	22.38	29.8	91.2	100
12.00	0.22161	22.39	29.9	90.6	100
26.00	0.01654	24.25	29.9	90.6	100

----- VAR=165 TIP=C URF=30 ENS=69A UIBS=12.71 UEQS=7.01 -----

TEMPO	X*	UBS	T	UR	NF
0.00	1.000000	12.71	30.3	29.0	0
0.25	0.84561	11.83	30.3	29.0	0
0.50	0.80526	11.60	30.2	29.1	0
0.75	0.78070	11.46	30.2	29.1	0
1.00	0.75965	11.34	30.1	29.4	0
1.25	0.73509	11.20	30.0	29.3	0
1.50	0.72105	11.12	0.0	0.0	0
2.00	0.69474	10.97	30.0	29.7	0
2.50	0.66667	10.81	30.0	30.2	0
3.00	0.64386	10.68	30.0	29.6	0
4.17	0.59649	10.41	29.9	29.8	0
4.50	0.57544	10.29	30.0	29.9	0
5.00	0.56140	10.21	29.9	29.8	0
6.00	0.52632	10.01	29.9	29.8	0
7.00	0.49825	9.85	29.8	29.9	0
8.00	0.46842	9.68	30.0	29.6	0
24.00	0.20175	8.16	30.1	29.4	0
25.00	0.18947	8.09	30.1	29.4	0
26.00	0.18772	8.08	30.1	29.0	0
27.00	0.17895	8.03	29.9	29.8	0
28.00	0.17368	8.00	29.8	29.9	0
29.00	0.16491	7.95	29.6	29.9	0
31.00	0.15439	7.89	29.7	30.2	0
48.00	0.05439	7.32	30.8	28.7	0
52.00	0.04386	7.26	30.0	29.3	0
55.00	0.04561	7.27	29.8	29.9	0
70.00	0.00000	7.01	30.5	29.1	0

9

----- VAR=165 TIP=C URF=30 ENS=698 UIBS=12.74 UEQS=7.06 -----

TEMPO	X*	UBS	T	UR	NF
0.00	1.000000	12.74	30.3	29.0	0
0.25	0.84859	11.88	30.3	29.0	0
0.50	0.80986	11.66	30.2	29.1	0
0.75	0.78697	11.53	30.2	29.1	0
1.00	0.76937	11.43	30.1	29.4	0
1.25	0.74472	11.29	30.0	29.3	0
1.50	0.72887	11.20	0.0	0.0	0
2.00	0.70599	11.07	30.0	29.7	0
2.50	0.67254	10.88	30.0	30.2	0
3.00	0.65317	10.77	30.0	29.6	0
4.17	0.60211	10.48	29.9	29.8	0
4.50	0.58803	10.40	30.0	29.9	0
5.00	0.57394	10.32	29.9	29.8	0
6.00	0.53521	10.10	29.9	29.8	0
7.00	0.51056	9.96	29.8	29.9	0
8.00	0.47887	9.78	30.0	29.6	0
24.00	0.21479	8.28	30.0	29.6	0
25.00	0.20775	8.24	30.0	29.6	0
26.00	0.19894	8.19	30.1	29.4	0
27.00	0.18838	8.13	29.9	29.8	0
28.00	0.18486	8.11	29.8	29.9	0
29.00	0.18134	8.09	29.6	29.9	0
31.00	0.15669	7.95	29.7	30.2	0
48.00	0.06514	7.43	30.8	28.7	0
52.00	0.05986	7.40	30.0	29.3	0
55.00	0.05986	7.40	29.8	29.9	0
70.00	0.00000	7.06	30.5	29.1	0

0:39 SATURDAY, MARCH 18, 1989

---- VAR=165 TIP=C URF=50 ENS=65A UIBS=13.48 UEQS=10.66 ----

TEMPO	X*	UBS	T	UR	NF
0.00	1.000000	13.48	30.3	48.1	0
0.25	0.86170	13.09	0.0	0.0	0
0.50	0.80142	12.92	30.4	48.4	0
0.75	0.77660	12.85	30.4	48.2	0
1.00	0.75887	12.80	30.3	48.6	0
1.25	0.73759	12.74	0.0	0.0	0
1.50	0.71986	12.69	0.0	0.0	0
1.75	0.70567	12.65	0.0	0.0	0
2.00	0.68440	12.59	30.1	48.9	0
2.50	0.65603	12.51	0.0	0.0	0
3.00	0.65248	12.50	30.1	48.9	0
4.00	0.59929	12.35	30.0	49.3	0
4.50	0.57447	12.28	0.0	0.0	0
5.00	0.56383	12.25	0.0	0.0	0
5.50	0.55319	12.22	29.9	50.3	0
6.00	0.53901	12.18	29.9	50.3	0
6.50	0.52837	12.15	30.0	49.9	0
7.00	0.51418	12.11	30.0	49.3	0
7.50	0.48936	12.04	30.1	49.4	0
22.50	0.19858	11.22	30.5	47.8	0
23.50	0.18085	11.17	30.4	48.2	0
24.50	0.17730	11.16	30.1	48.9	0
25.50	0.16667	11.13	30.0	49.3	0
26.50	0.17021	11.14	29.8	50.2	0
27.50	0.16667	11.13	30.0	49.3	0
30.50	0.14894	11.08	29.8	50.2	0
72.00	0.000000	10.66	30.0	49.9	0

----- VAR=165 TIP=C URF=50 ENS=65B UIBS=13.42 UEQS=10.73 -----

TEMPO	X*	UBS	T	UR	NF
0.00	1.000000	13.42	30.3	48.1	0
0.25	0.88476	13.11	0.0	0.0	0
0.50	0.84387	13.00	30.4	48.4	0
0.75	0.82156	12.94	30.4	48.2	0
1.00	0.79554	12.87	30.3	48.6	0
1.25	0.77695	12.82	0.0	0.0	0
1.50	0.75465	12.76	0.0	0.0	0
1.75	0.74721	12.74	0.0	0.0	0
2.00	0.72119	12.67	30.1	48.9	0
2.50	0.69145	12.59	0.0	0.0	0
3.00	0.68401	12.57	30.0	49.3	0
4.00	0.63197	12.43	30.0	49.3	0
4.50	0.60223	12.35	0.0	0.0	0
5.00	0.59480	12.33	0.0	0.0	0
5.50	0.58736	12.31	29.9	50.3	0
6.00	0.56506	12.25	29.9	50.3	0
6.50	0.55762	12.23	30.0	49.9	0
7.00	0.54275	12.19	30.0	49.3	0
7.50	0.51301	12.11	30.1	49.4	0
22.50	0.21190	11.30	30.5	0.0	0
23.50	0.20446	11.28	30.4	48.2	0
24.50	0.20074	11.27	30.1	48.9	0
25.50	0.19703	11.26	30.0	49.3	0
26.50	0.18216	11.22	29.8	50.2	0
27.50	0.18587	11.23	29.9	49.8	0
30.50	0.17472	11.20	29.8	0.0	0
72.00	0.000000	10.73	30.0	49.9	0

----- VAR=165 TIP=C URF=70 ENS=61A UIBS=12.88 UEGS=13.08 -----

TEMPO	X*	UBS	T	UR	NF
0.00	1.00	12.88	0.0	0.0	0
0.25	0.75	12.93	29.9	69.8	0
0.50	0.70	12.94	0.0	0.0	0
0.75	0.70	12.94	30.0	72.3	0
1.00	0.65	12.95	29.8	61.6	0
1.25	0.55	12.97	30.3	70.7	0
1.50	0.35	13.01	30.0	70.5	0
2.00	0.25	13.03	30.0	70.5	0
2.50	0.10	13.06	30.0	69.9	0
4.00	-0.20	13.12	29.9	70.4	0
5.00	-0.40	13.16	30.1	69.4	0
24.50	0.70	12.94	31.0	67.5	0
25.00	0.55	12.97	30.0	70.5	0
25.50	0.45	12.99	30.2	70.0	0
26.00	0.40	13.00	29.9	71.1	0
27.00	0.25	13.03	29.9	71.1	0
48.50	0.65	12.95	30.5	68.4	0
49.00	0.50	12.98	30.5	68.4	0
49.50	0.50	12.98	30.4	68.9	0
54.00	0.15	13.05	30.0	71.1	0
73.00	0.65	12.95	30.5	68.4	0
76.00	0.50	12.98	30.2	70.0	0
168.00	0.00	13.08	30.2	70.0	0

---- VAR=165 TIP=C URF=70 ENS=61B UIBS=12.79 UEQS=13.08 ----

TEMPO	X*	UBS	T	UR	NF
0.00	1.000000	12.79	0.0	0.0	0
0.25	0.89655	12.82	29.9	69.8	0
0.50	0.93103	12.81	0.0	0.0	0
0.75	0.86207	12.83	30.0	72.3	0
1.00	0.82759	12.84	29.8	61.6	0
1.25	0.75862	12.86	30.3	70.7	0
1.50	0.55172	12.92	30.0	70.5	0
2.00	0.58621	12.91	30.0	70.5	0
2.50	0.48276	12.94	30.0	69.9	0
4.00	0.24138	13.01	29.9	70.4	0
5.00	0.06897	13.06	30.1	69.4	0
24.50	0.37931	12.97	30.0	71.1	0
25.00	0.27586	13.00	30.0	70.5	0
25.50	0.06897	13.06	30.2	70.0	0
26.00	0.10345	13.05	29.9	71.1	0
27.00	0.03448	13.07	29.9	71.1	0
48.50	0.31034	12.99	30.5	68.4	0
49.00	0.27586	13.00	0.0	0.0	0
49.50	0.24138	13.01	30.4	68.9	0
54.00	0.00000	13.08	30.0	71.1	0
73.00	0.06897	13.06	30.5	68.4	0
76.00	0.06897	13.06	30.2	70.0	0
168.00	0.00000	13.08	30.0	71.1	0

----- VAR=165 TIP=C URF=90 ENS=75A UIRS=11.99 UEQS=18.33 -----

TEMPO	X*	URS	T	UR	NF
0.00	1.00000	11.99	0.0	0.0	0
0.25	0.91167	12.55	30.4	89.7	0
0.50	0.88644	12.71	0.0	0.0	0
0.75	0.85174	12.93	0.0	0.0	0
1.00	0.82808	13.08	30.2	89.6	0
1.25	0.80915	13.20	30.2	89.6	0
1.50	0.78233	13.37	30.2	90.3	0
1.75	0.75710	13.53	30.1	90.3	0
2.00	0.74290	13.62	30.1	89.6	0
2.50	0.70820	13.84	30.0	90.3	0
3.00	0.67508	14.05	0.0	0.0	0
3.50	0.64038	14.27	0.0	0.0	0
4.00	0.60252	14.51	0.0	0.0	0
4.50	0.57571	14.68	29.9	90.9	0
6.00	0.49054	15.22	0.0	0.0	0
6.50	0.46530	15.38	0.0	0.0	0
7.00	0.44953	15.48	29.8	92.3	0
7.50	0.43060	15.60	0.0	0.0	0
8.00	0.40852	15.74	30.0	90.3	0
9.00	0.36593	16.01	30.0	90.3	0
10.00	0.26656	16.64	30.1	90.9	0
26.00	0.11356	17.61	30.0	90.9	0
27.00	0.09306	17.74	30.0	90.9	0
32.00	0.00000	18.33	29.9	91.6	0

----- VAR=165 TIP=C URF=90 ENS=75B UIBS=11.96 UEQS=18.33 -----

TEMPO	X*	UBS	T	UR	NF
0.00	1.000000	11.96	0.0	0.0	0
0.25	0.90267	12.58	30.4	89.7	0
0.50	0.87912	12.73	0.0	0.0	0
0.75	0.84301	12.96	0.0	0.0	0
1.00	0.82261	13.09	30.2	89.6	0
1.25	0.80063	13.23	30.2	89.6	0
1.50	0.77865	13.37	30.2	90.3	0
1.75	0.75510	13.52	30.1	90.3	0
2.00	0.73940	13.62	30.1	89.6	0
2.50	0.70487	13.84	30.0	90.3	0
3.00	0.66876	14.07	0.0	0.0	0
3.50	0.63736	14.27	0.0	0.0	0
4.00	0.59969	14.51	0.0	0.0	0
4.50	0.57457	14.67	29.9	90.9	0
6.00	0.48823	15.22	0.0	0.0	0
6.50	0.46468	15.37	0.0	0.0	0
7.00	0.43799	15.54	29.8	92.3	0
7.50	0.42072	15.65	0.0	0.0	0
8.00	0.39560	15.81	30.0	90.3	0
9.00	0.35322	16.08	30.0	90.3	0
10.00	0.26217	16.66	30.1	90.9	0
26.00	0.11460	17.60	0.0	0.0	0
27.00	0.09576	17.72	30.0	90.9	0
32.00	0.00000	18.33	29.9	91.6	0

---- VAR=165 TIP=I URF=30 ENS=71A UIBS=13.62 UEQS=8.58 ----

TEMPO	X*	UBS	T	UR	NF
0.00	1.00000	13.62	30.3	29.7	0
0.25	0.90079	13.12	30.3	29.7	0
0.50	0.85516	12.89	30.3	29.7	0
0.75	0.81746	12.70	30.3	29.7	0
1.00	0.78373	12.53	30.2	30.0	0
1.25	0.75397	12.38	30.1	30.1	0
1.50	0.73214	12.27	30.1	29.7	0
1.75	0.70040	12.11	30.1	29.9	0
2.00	0.68254	12.02	30.1	29.9	0
3.00	0.60516	11.63	30.0	29.7	0
4.00	0.54563	11.33	29.9	30.2	0
5.00	0.49206	11.06	29.9	30.5	0
7.00	0.40278	10.61	29.8	30.4	0
8.00	0.38095	10.50	29.9	30.2	0
23.00	0.10516	9.11	30.6	29.5	0
24.00	0.10714	9.12	30.2	29.5	0
25.00	0.09722	9.07	29.9	30.0	0
26.00	0.08333	9.00	29.9	30.5	0
27.50	0.08135	8.99	29.9	30.5	0
29.00	0.07143	8.94	29.7	30.7	0
47.00	0.00000	8.58	30.4	29.8	0

---- VAR=165 TIP=I URF=30 ENS=71B UIBS=13.49 UEQS=8.52 ----

TEMPO	X*	UBS	T	UR	NF
0.00	1.00000	13.49	30.3	29.7	0
0.25	0.91147	13.05	30.3	29.7	0
0.50	0.86922	12.84	30.3	29.7	0
0.75	0.82897	12.64	30.3	29.7	0
1.00	0.79477	12.47	30.2	30.0	0
1.25	0.76861	12.34	30.1	30.1	0
1.50	0.74245	12.21	30.1	29.7	0
1.75	0.71429	12.07	30.1	29.9	0
2.00	0.69416	11.97	30.1	29.9	0
3.00	0.61569	11.58	30.0	29.7	0
4.00	0.56137	11.31	29.9	30.2	0
5.00	0.49899	11.00	29.9	30.5	0
7.00	0.41247	10.57	29.8	30.4	0
8.00	0.38833	10.45	29.9	30.2	0
23.00	0.10865	9.06	30.4	30.4	0
24.00	0.10664	9.05	30.2	29.5	0
25.00	0.10060	9.02	30.0	29.9	0
26.00	0.09256	8.98	29.9	30.5	0
27.50	0.08451	8.94	29.9	30.5	0
29.00	0.07646	8.90	29.7	30.7	0
47.00	0.00000	8.52	30.4	29.8	0

----- VAR=165 TIP=I URF=50 ENS=67A UIBS=14.82 UEQS=12.3 -----

TEMPO	X*	UBS	T	UR	NF
0.00	1.000000	14.82	29.9	0.0	0
0.25	0.88095	14.52	29.9	49.5	0
0.50	0.82937	14.39	29.9	50.0	0
0.75	0.79365	14.30	29.8	49.9	0
1.00	0.76190	14.22	29.8	49.7	0
1.25	0.72619	14.13	29.8	49.9	0
1.50	0.69841	14.06	30.0	49.3	0
1.75	0.66667	13.98	30.0	49.3	0
2.00	0.65079	13.94	30.0	49.3	0
2.50	0.61508	13.85	30.0	49.3	0
4.00	0.55159	13.69	29.6	51.4	0
4.50	0.51984	13.61	29.7	50.6	0
5.00	0.49206	13.54	29.8	49.9	0
5.50	0.47222	13.49	29.8	50.4	0
6.00	0.46032	13.46	29.6	50.3	0
6.50	0.44841	13.43	29.6	50.3	0
7.00	0.42857	13.38	29.6	50.3	0
7.50	0.42460	13.37	29.6	50.3	0
8.00	0.40079	13.31	29.8	50.2	0
32.00	0.13889	12.65	29.5	56.9	0
49.00	0.06746	12.47	29.8	50.2	0
51.00	0.07937	12.50	29.6	50.5	0
53.00	0.07937	12.50	29.6	50.5	0
71.00	0.00000	12.30	30.0	49.9	0

---- VAR=165 TIP=I URF=50 ENS=67B UIBS=14.68 UEQS=12.44 ----

TEMPO	X*	UBS	T	UR	NF
0.00	1.000000	14.68	29.9	0.0	0
0.25	0.87946	14.41	29.9	49.5	0
0.50	0.82589	14.29	29.9	49.5	0
0.75	0.78125	14.19	29.8	49.9	0
1.00	0.75446	14.13	29.8	49.7	0
1.25	0.71875	14.05	29.8	49.9	0
1.50	0.68750	13.98	30.0	49.3	0
1.75	0.65179	13.90	30.0	49.3	0
2.00	0.64286	13.88	30.0	49.3	0
2.50	0.60268	13.79	30.0	49.3	0
4.00	0.53571	13.64	29.6	51.4	0
4.50	0.51786	13.60	29.7	50.6	0
5.00	0.48661	13.53	29.8	49.9	0
5.50	0.45982	13.47	29.8	50.4	0
6.00	0.42857	13.40	29.6	50.3	0
6.50	0.41518	13.37	29.6	50.3	0
7.00	0.40179	13.34	29.6	50.3	0
7.50	0.39286	13.32	29.6	50.3	0
8.00	0.36161	13.25	29.8	50.2	0
32.00	0.15625	12.79	29.5	51.5	0
49.00	0.07589	12.61	29.8	50.2	0
51.00	0.08036	12.62	29.6	50.5	0
53.00	0.09375	12.65	29.5	51.0	0
71.00	0.00000	12.44	30.0	49.9	0

----- VAR=165 TIP=I URF=70 ENS=62A UIBS=15.14 UEQS=15.84 -----

TEMPO	X*	UBS	T	UR	NF
0.00	1.000000	15.14	30.1	70.0	0
0.25	0.92857	15.19	30.1	70.0	0
0.50	0.84286	15.25	30.1	70.0	0
1.00	0.67143	15.37	30.0	71.1	0
1.25	0.58571	15.43	30.0	71.1	0
1.50	0.54286	15.46	30.0	70.5	0
1.75	0.50000	15.49	30.0	71.1	0
2.00	0.44286	15.53	30.0	71.1	0
3.00	0.28571	15.64	29.8	71.6	0
3.50	0.27143	15.65	29.8	71.6	0
4.50	0.17143	15.72	29.8	71.6	0
6.50	0.02857	15.82	29.6	73.3	0
7.50	0.01429	15.83	29.6	72.7	0
22.50	0.04286	15.81	30.3	70.1	0

----- VAR=165 TIP=I URF=70 ENS=62B UIBS=15.21 UEQS=15.84 -----

TEMPO	X*	UBS	T	UR	NF
0.00	1.000000	15.21	30.1	70.0	0
0.25	0.90476	15.27	30.1	70.0	0
0.50	0.79365	15.34	30.1	70.0	0
0.75	0.69841	15.40	30.1	70.0	0
1.00	0.65079	15.43	30.0	71.1	0
1.25	0.53968	15.50	30.0	71.1	0
1.50	0.47619	15.54	30.0	70.5	0
1.75	0.44444	15.56	30.0	71.1	0
2.00	0.38095	15.60	30.0	71.1	0
3.00	0.17460	15.73	29.8	71.6	0
3.50	0.00000	15.84	29.8	71.6	0
4.50	0.06349	15.80	29.8	71.6	0
6.50	0.01587	15.83	29.6	73.3	0
7.50	0.00000	15.84	29.6	72.7	0
22.50	0.01587	15.83	30.3	70.1	0

----- VAR=165 TIP=I URF=90 ENS=73A UIBS=14.61 UEGS=22.12 -----

TEMPO	X*	UBS	T	UR	NF
0.00	1.00000	14.61	30.3	87.6	0
0.25	0.87084	15.58	30.3	89.0	0
0.50	0.78562	16.22	30.3	89.0	0
0.75	0.72037	16.71	30.3	88.3	0
1.00	0.65246	17.22	30.3	89.0	0
1.25	0.59920	17.62	30.2	88.9	0
1.50	0.54328	18.04	30.2	88.9	0
1.75	0.49800	18.38	30.2	89.6	0
2.00	0.46072	18.66	30.3	88.6	0
2.50	0.48202	18.50	30.1	89.3	0
3.00	0.33156	19.63	30.2	88.9	0
3.50	0.28628	19.97	30.2	89.6	0
4.00	0.23569	20.35	30.2	88.3	0
4.50	0.20240	20.60	30.1	89.9	0
5.00	0.17577	20.80	30.1	89.3	0
6.00	0.12383	21.19	30.1	89.3	0
7.00	0.08655	21.47	0.0	0.0	0
8.00	0.09055	21.44	0.0	0.0	0
9.00	0.07989	21.52	0.0	0.0	0
10.00	0.07457	21.56	30.4	89.3	0
11.00	0.08256	21.50	0.0	0.0	0
12.00	0.08788	21.46	30.4	89.0	0
13.00	0.07190	21.58	29.9	91.6	0
24.00	0.01731	21.99	30.4	89.0	0
25.00	0.00000	22.12	0.0	0.0	0

---- VAR=165 TIP=I URF=90 ENS=73B UIBS=14.59 UEQS=22.65 ----

TEMPO	X*	UBS	T	UR	NF
0.00	1.00000	14.59	30.3	87.6	0
0.25	0.87717	15.58	30.3	89.0	0
0.50	0.79404	16.25	30.3	89.0	0
0.75	0.73325	16.74	30.3	88.3	0
1.00	0.66873	17.26	30.3	89.0	0
1.25	0.61414	17.70	30.2	88.9	0
1.50	0.56203	18.12	30.2	88.9	0
1.75	0.51489	18.50	30.2	89.6	0
2.00	0.47891	18.79	30.3	88.6	0
2.50	0.40819	19.36	30.1	89.3	0
3.00	0.35732	19.77	30.2	88.9	0
3.50	0.31390	20.12	30.2	89.6	0
4.00	0.26675	20.50	30.2	88.3	0
4.50	0.23821	20.73	30.1	89.9	0
5.00	0.21588	20.91	0.0	0.0	0
6.00	0.17246	21.26	0.0	0.0	0
7.00	0.13896	21.53	0.0	0.0	0
8.00	0.14392	21.49	0.0	0.0	0
9.00	0.12779	21.62	0.0	0.0	0
10.00	0.11414	21.73	30.4	89.3	0
11.00	0.11166	21.75	30.4	89.3	0
12.00	0.11166	21.75	30.4	89.0	0
13.00	0.09181	21.91	29.9	91.6	0
24.00	0.02109	22.48	30.4	89.0	0
25.00	0.00000	22.65	0.0	0.0	0

TABELA A.3 - RESULTADO DO AJUSTE DA EQUACAO DE LEWIS AOS DADOS EXPERIMENTAIS

VAR	TIP	URF	ENS	k	SQR
25	B	30	85	0,42877	0,12084
		40	92	0,36771	0,06405
		50	83	0,18435	0,30535
			89	0,34397	0,33492
		70	78	0,55301	0,30023
			96	0,45946	0,02464
		80	98	0,46641	0,01063
		90	80	0,45812	0,04987
			88	0,71789	0,00323
			95	0,67744	0,07828
25	C	30	70A	0,10356	0,15518
			70B	0,10473	0,23614
		50	66A	0,15668	0,11452
			66B	0,15695	0,11134
		70	63A	0,15797	0,53152
			63B	0,13713	0,18397
		90	76A	0,24189	0,18080
			76B	0,21475	0,01793
	I	30	72A	0,12309	0,10398
			72B	0,12961	0,08306
		50	68A	0,16405	0,12384
			68B	0,20901	0,12900
		70	64A	0,52577	0,05162
			64B	0,28836	0,03493
		90	74A	0,39028	0,01572
			74B	0,39355	0,02471

TABELA A.3 - RESULTADO DO AJUSTE DA EQUACAO DE LEWIS AOS DADOS EXPERIMENTAIS.
(continuacao)

VAR	TIP	URF	ENS	k	SQR
165	B	30	84	0,42983	0,15027
		40	93	0,35568	0,15352
		50	82	0,24080	0,26648
			90	0,48794	0,10490
		70	77	0,54164	0,02723
			97	0,40405	0,04853
		80	99	0,52008	0,02384
		90	81	0,40875	0,16704
			87	0,48767	0,08127
			94	0,26727	0,22387
	C	30	69A	0,10601	0,25932
			69B	0,09846	0,26465
		50	65A	0,10788	0,24890
			65B	0,09221	0,19031
		70	61A	0,69332	3,15449
			61B	0,30873	0,53401
		90	75A	0,12284	0,03717
			75B	0,12538	0,04085
	I	30	71A	0,14893	0,07847
			71B	0,14158	0,06943
		50	67A	0,14401	0,14825
			67B	0,15400	0,15193
		70	62A	0,40507	0,00758
			62B	0,52101	0,03757
		90	73A	0,36421	0,03784
			73B	0,33516	0,06143