

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

**SIMULAÇÃO DE SECAGEM DE SEMENTES DE CANOLA  
(*Brassica napus*) COM PREVISÃO DE GERMINAÇÃO**

**ARMANDO KAZUO FUJII**

CAMPINAS  
Setembro de 2007

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

**SIMULAÇÃO DE SECAGEM DE SEMENTES DE CANOLA  
(*Brassica napus*) COM PREVISÃO DE GERMINAÇÃO**

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação  
da Faculdade de Engenharia Agrícola - UNICAMP  
como parte dos requisitos necessários para  
obtenção do título de Doutor em Engenharia  
Agrícola, na Área de Tecnologia Pós-Colheita

**ARMANDO KAZUO FUJII**

**ORIENTADOR: Prof. Dr. JOSÉ TADEU JORGE**

CAMPINAS  
Setembro de 2007

CHAMADA: \_\_\_\_\_  
T/UNICAMP: F955s  
EX \_\_\_\_\_  
OMBO BCCL: 75.106  
ROC: 06.145.07  
REÇO: 11.09.07  
ATA: 27.11.07  
IB-ID: 447636

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

F955s Fujii, Armando Kazuo  
Simulação de secagem de sementes de canola  
(*Brassica napus*) com previsão de germinação. /  
Armando Kazuo Fujii.--Campinas, SP: [s.n.], 2007.

Orientadores: José Tadeu Jorge  
Tese (Doutorado) - Universidade Estadual de  
Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola.

1. Sementes - Armazenamento. 2. Sementes -  
Secagem. 3. Canola. I. Jorge, José Tadeu. II.  
Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de  
Engenharia Agrícola. III. Título.

Título em Inglês: Drying simulation of canola seeds (*Brassica napus*) with prediction  
of germination

Palavras-chave em Inglês: Canola, Germination, simulation, drying

Área de concentração: Tecnologia Pós-Colheita

Titulação: Doutor em Engenharia Agrícola

Banca examinadora: João Domingos Biagi, Antonio Augusto do Lago, Fernanda  
Elizabeth Xidieh Murr, Benedito Carlos Benedetti

Data da defesa: 11/09/2007

Programa de Pós-Graduação: Engenharia Agrícola

## Citação Bíblica

### Mateus 13.

- 1** Tendo Jesus saído de casa, naquele dia, estava assentado junto ao mar;
- 2** E ajuntou-se muita gente ao pé dele, de sorte que, entrando num barco, se assentou; e toda a multidão estava em pé na praia.
- 3** E falou-lhe de muitas coisas por parábolas, dizendo: Eis que o semeador saiu a semear.
- 4** E, quando semeava, uma parte da semente caiu ao pé do caminho, e vieram as aves, e comeram-na;
- 5** E outra parte caiu em pedregais, onde não havia terra bastante, e logo nasceu, porque não tinha terra funda;
- 6** Mas, vindo o sol, queimou-se, e secou-se, porque não tinha raiz.
- 7** E outra caiu entre espinhos, e os espinhos cresceram e sufocaram-na.
- 8** E outra caiu em boa terra, e deu fruto: um a cem, outro a sessenta e outro a trinta.
- 9** Quem tem ouvidos para ouvir, ouça.

### Lucas 14

- 28** Pois qual de vós, querendo edificar uma torre, não se assenta primeiro a fazer as contas dos gastos, para ver se tem com que a acabar?
- 29** Para que não aconteça que, depois de haver posto os alicerces, e não a podendo acabar, todos os que a virem comecem a escarnecer dele,
- 30** Dizendo: Este homem começou a edificar e não pôde acabar.
- 31** Ou qual é o rei que, indo à guerra a pelejar contra outro rei, não se assenta primeiro a tomar conselho sobre se com dez mil pode sair ao encontro do que vem contra ele com vinte mil?
- 32** De outra maneira, estando o outro ainda longe, manda embaixadores, e pede condições de paz.
- 33** Assim, pois, qualquer de vós, que não renuncia a tudo quanto tem, não pode ser meu discípulo.
- 34** Bom é o sal; mas, se o sal degenerar, com que se há de salgar?
- 35** Nem presta para a terra, nem para o monturo; lançam-no fora. Quem tem ouvidos para ouvir, ouça.

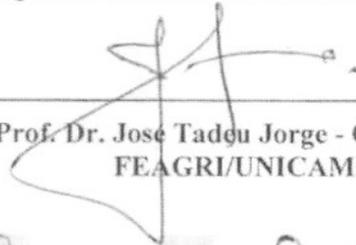
## Dedicatórias

A Deus  
Sem Ele nada somos.  
Sem Ele nada podemos fazer.

À minha querida esposa Creuza, ao meu filho Guilherme e ao meu sobrinho Rafael.  
Pelo carinho, incentivo e apoio para superar todos os obstáculos.  
Perdão pelas falhas como esposo e pai.

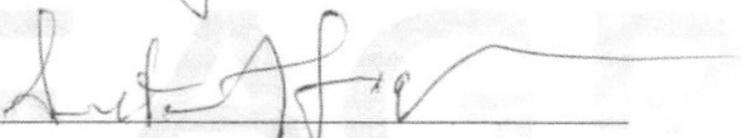
Em memória de minha sogra Crildes, que sempre almejou por este momento.  
Em memória de minha cunhada Cleide que sempre orou ao Senhor por esta vitória.

Este exemplar corresponde à redação final da Tese Doutorado defendida por Armando Kazuo Fujii, aprovada pela Comissão Julgadora em 11 de outubro de 2007, na Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas.



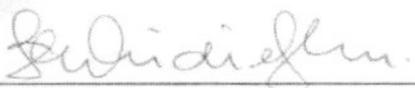
---

Prof. Dr. José Tadeu Jorge - Orientador  
FEAGRI/UNICAMP



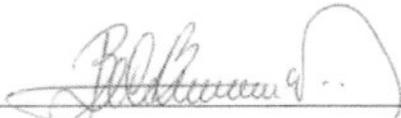
---

Prof. Dr. Antonio Augusto do Lago - Membro Titular  
IAC/Campinas



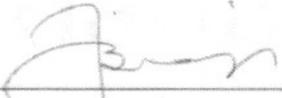
---

Profª Drª Fernanda Elizabeth Xidieh Murr - Membro Titular  
FEA/UNICAMP



---

Prof. Dr. Benedito Carlos Benedetti - Membro Titular  
FEAGRI/UNICAMP



---

Prof. Dr. João Domingos Biagi - Membro Titular  
FEAGRI/UNICAMP

## Agradecimentos

A todos que contribuíram para esta conquista.

À UNICAMP, FEAGRI, CPG, FAEPEX

À CAPES

Ao orientador, Prof. Dr. José Tadeu Jorge,  
Pela amizade, incentivo e dedicação por esta vitória.

À Banca,  
Pela participação e colaboração nesta publicação.

Ao Pr. Jorge e aos irmãos em Cristo, pelas orações.

À família: minha mãe e irmãos  
Aos cunhados, sobrinhos, primos e tios, pelo apoio.

A Michigan State University e Michigan Seed Foundation,  
onde foram realizados os experimentos.

Ao CENAPAD,  
onde foi realizada a simulação matemática, com apoio constante no ambiente computacional e  
corpo técnico capacitado.

A Inácio Maria dal Fabbro, Maria. Ângela Fagnani, Marcelo Colet e Anderson Souza  
pela amizade, revisão e suporte.

## SUMÁRIO

SUMÁRIO.....	vi
LISTA DE TABELAS .....	viii
LISTA DE FIGURAS .....	x
RESUMO .....	xi
ABSTRACT .....	xii
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. OBJETIVOS.....	3
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
3.1. Aspectos gerais.....	4
3.1.1. Histórico .....	4
3.1.2. A importância da canola .....	5
3.2. Acondicionamento hermético.....	8
3.3. Ensaio de secagem .....	14
3.4. Simulação de secagem de sementes.....	18
3.5. Propriedades físicas .....	21
3.5.1. Peso específico aparente .....	22
3.5.2. Umidade de equilíbrio .....	23
3.5.3. Perda de carga.....	25
3.5.4. Razão de secagem.....	27
4.1. Material utilizado.....	30
4.2. Métodos .....	31
4.2.1. Características da Matéria-Prima.....	31
4.2.2. Acondicionamento hermético – Testes preliminares .....	31
4.2.3. Determinação de temperatura real da semente .....	33
4.3. Testes definitivos de acondicionamento hermético.....	35
4.3.1. Acondicionamento hermético.....	35
4.3.2. Determinação experimental de SIGMA .....	36
4.3.3. Determinação dos parâmetros da função SIGMA .....	36
4.4. Simulação e experimento de secagem.....	36
4.4.1. Simulação .....	36
4.4.2. Particularidades do modelo utilizado.....	39
4.4.2.1. Modelo de simulação .....	39
4.4.2.2. Programa utilizado .....	39
4.4.3 Modificações no programa.....	42
4.4.4. Parâmetros da espécie canola .....	42
4.4.4.1. Umidade de equilíbrio.....	42
4.4.4.2. Resistência ao fluxo de ar.....	43

4.4.4.3	Peso específico aparente.....	43
4.4.4.4	Calor específico.....	43
4.4.4.5	Equação de calor latente.....	43
4.4.5	Secagem experimental para validação dos coeficientes de SIGMA.....	44
4.5	Metodologia analítica.....	45
4.5.1	Determinação de germinação:.....	45
4.5.2	Determinação de umidade:.....	45
4.5.3	Determinação de dimensões.....	45
4.5.4	Determinação de peso específico aparente.....	45
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	46
5.1	Características da matéria-prima.....	46
5.1.1	Germinação.....	46
5.1.2	Dimensões.....	46
5.1.3	Peso específico aparente.....	47
5.2	Acondicionamento hermético – Testes preliminares.....	48
5.2.1	Germinação inicial.....	48
5.2.2	Determinação de temperatura real da semente.....	49
5.3	Acondicionamento hermético definitivo.....	52
5.4	Determinação de SIGMA.....	53
5.4.1	Determinação dos parâmetros de SIGMA.....	54
5.4.2	SIGMA Experimental e Estimado.....	55
5.5	Secagem experimental e simulação.....	56
5.5.1	Simulação.....	56
5.5.2	Secagem experimental.....	56
5.5.3	Discussão sobre os resultados de secagem.....	61
5.5.4	Modificações no programa de secagem.....	62
5.5.4.1	Parâmetro FAKTOR.....	62
5.5.4.2	Umidade de Equilíbrio.....	62
5.5.5	Análise das curvas de secagem.....	63
5.5.6	Tempo de secagem.....	65
5.6	Considerações sobre a simulação.....	66
5.6.1	Parâmetros AHFG e BHFG.....	66
5.6.2	Análise estatística.....	66
5.7	Discussão sobre os experimentos.....	66
6	CONCLUSÕES.....	68
7	REFERÊNCIAS.....	69

## LISTA DE TABELAS

Tabela 01. Produção mundial de colza/canola em 2005 .....	6
Tabela 02. Evolução mundial de colza/canola a partir de 1965 .....	6
Tabela 03. Germinação após armazenagem hermética de colza .....	13
Tabela 04. Experimentos de acondicionamento hermético.....	13
Tabela 05. Temperatura máxima recomendada para secagem de sementes, de acordo com a umidade inicial.....	15
Tabela 06. Germinação de colza na camada inferior e amostra de mistura após secagem a três temperaturas e três valores de umidade inicial .....	16
Tabela 07. Valores de parâmetros para equação modificada de HENDERSON de umidade de equilíbrio.....	25
Tabela 08. Valores de parâmetros para equação de CHUNG de umidade de equilíbrio. ....	25
Tabela 09. Parâmetros para resistência ao fluxo de ar. ....	26
Tabela 10. Razão de secagem para colza e outros produtos.....	28
Tabela 11. Secagem natural de matéria prima.....	31
Tabela 12. Tempo de acondicionamento preliminar em banho-maria, a 50°C de embalagens de alumínio contendo sementes de canola.....	32
Tabela 13. Tempo de acondicionamento preliminar em banho-maria, a 60°C de embalagens de alumínio contendo sementes de canola.....	32
Tabela 14. Tempo de acondicionamento preliminar em banho-maria, a 70°C de embalagens de alumínio contendo sementes de canola.....	33
Tabela 15. Tempo de acondicionamento hermético a 50°C .....	35
Tabela 16. Tempo de acondicionamento hermético a 60°C .....	35
Tabela 17. Tempo de acondicionamento hermético a 70°C .....	36
Tabela 18. Parâmetros de equação de umidade de equilíbrio.....	42
Tabela 19. Germinação inicial de sementes de canola a diversas umidades.....	46

Tabela 20 - Dimensões de sementes de canola com 8 e 21% de umidade.....	47
Tabela 21 - Peso específico de sementes de canola a 8 e 21% de umidade. ....	47
Tabela 22. Germinação de teste preliminar de acondicionamento a 50°C. ....	48
Tabela 23. Germinação de teste preliminar de acondicionamento a 60°C. ....	49
Tabela 24. Germinação de teste preliminar de acondicionamento a 70°C. ....	49
Tabela 25. Tempo para a semente atingir a temperatura do banho. ....	51
Tabela 26. Germinação após acondicionamento hermético a 50°C. ....	52
Tabela 27. Germinação após acondicionamento hermético a 60°C. ....	53
Tabela 28. Germinação após acondicionamento hermético a 70°C. ....	53
Tabela 29. Valores de $\sigma$ para cada condição de Temperatura e Umidade.....	54
Tabela 30. Avaliação de erro absoluto e quadrático nas curvas de temperatura, durante a secagem. ....	63
Tabela 31. Avaliação de erro absoluto e quadrático nas curvas de umidade, durante a secagem. ....	64
Tabela 32. Avaliação de erro absoluto e quadrático nas curvas de germinação, durante a secagem. ....	64

## LISTA DE FIGURAS

Figura 01. Distribuição de mortes de sementes, em função do tempo (ROBERTS, 1960) .....	10
Figura 02. Germinação em Probit (X) para duas espécies (Linearização da equação 01 através da mudança de variável).....	11
Figura 03. Efeito da umidade inicial e temperatura de secagem, na germinação de sementes de colza. (Fonte: NELLIST, REES & ABRAHAMMS, 1970).....	15
Figura 04. Secagem de colza com três níveis de umidade inicial e duas temperaturas (SUTHERLAND & GHALY, 1982).....	17
Figura 05. Unidade do volume de controle. ....	21
Figura 06. Disposição de sementes no interior de pouche. ....	34
Figura 07. Detalhes do pouche e termopares.....	34
Figura 08. Etapas da rotina de avaliação de germinação.....	38
Figura 09. Secador intermitente.....	44
Figura 10. Perfil de temperatura da semente de canola, localizada dentro das embalagens herméticas.....	50
Figura 11. SIGMA experimental e estimado, de acordo com Equação 33. ....	55
Figura 12. Curvas de temperatura da semente de canola durante secagem a 51°C .....	57
Figura 13. Curvas de umidade da semente de canola durante secagem a 51°C .....	57
Figura 14. Curvas de germinação da semente de canola durante secagem a 51°C .....	58
Figura 15. Curvas de temperatura da semente de canola durante secagem a 61°C.....	58
Figura 16. Curvas de umidade da semente de canola durante secagem a 61°C .....	59
Figura 17. Curvas de germinação da semente de canola durante secagem a 61°C .....	59
Figura 18. Curvas de temperatura da semente de canola durante secagem a 67°C.....	60
Figura 19. Curvas de umidade da semente de canola durante secagem a 67°C .....	60
Figura 20. Curvas de germinação da semente de canola durante secagem a 67°C .....	61

## RESUMO

O principal objetivo deste trabalho é a obtenção de sementes de canola com menor redução de germinação, devido às injúrias térmicas, durante a secagem. Foi aplicado o método de acondicionamento hermético de sementes de canola em embalagens de alumínio imersas em banho-maria a 50, 60 e 70°C para determinar o modelo matemático da redução de germinação (SIGMA) de acordo com as condições de umidade e temperatura de secagem. O modelo é baseado na dispersão de mortes de sementes acondicionadas a condições constantes de umidade e temperatura, durante determinado período de tempo. Os valores experimentais de SIGMA foram obtidos através dos resultados de germinação durante o acondicionamento hermético que validaram o modelo proposto, com elevado coeficiente de correlação. Esses valores de SIGMA foram inseridos em um programa de secagem disponível em linguagem FORTRAN, que fornece os valores estimados de germinação simulando-se a secagem sob condições conhecidas. Sementes de canola a 21% de umidade foram submetidas à secagem sob três temperaturas: 51, 61 e 67°C para validar o modelo matemático de simulação, de acordo com as condições de umidade e temperatura dos grãos durante o processo de secagem. Temperaturas maiores resultaram em maiores perdas de germinação, principalmente a 61 e 67°C, sendo que a 51°C, a mudança da declividade não é tão visível. O modelo utilizado representa bem os dados experimentais e são compatíveis com os dados das referências bibliográficas. O modelo representou significativamente os experimentos de secagem processados a 61 e 67°C, sendo que a 51°C, a germinação experimental apresentou valores acima dos valores estimados, o que não inviabiliza a análise dos resultados. Este trabalho fornece subsídios para definir o período necessário para efetuar a secagem visando preservar a germinação das sementes.

**Palavras-chave:** canola, germinação, secagem, simulação.

## **Drying simulation of canola seeds (*Brassica napus*) with prediction of germination**

### **ABSTRACT**

The main objective of this research work is to study of the reduction of germination loss in canola seeds after drying. The experimental procedure based on hermetic storage was used to determine the mathematical model of the germination reduction (SIGMA) for the actual drying conditions. The procedure consists in storing canola seeds hermetically in aluminum pouches, and immersed in water-bath at temperatures of 50°C, 60°C and 70°C, for a range of time periods, and the germination were determined. These data were used to determinate the experimental values of SIGMA function resulted from the multiple regression, presenting high correlation coefficient, and the parameters of this model were applied for the model of equation for canola seeds. This model was included in an existing drying simulation program. Canola seeds, with 21% of moisture content, were dried at 51°C, 61°C and 67 °C, to validate the mathematical model of simulation, as function of the drying conditions. Higher drying temperatures resulted in higher losses of viability, however, the germination losses were slight lower for 61°C and 67°C. For drying at 51°C, the slope of the canola seeds were not perceptible. The values of germination of canola seeds during drying at 51°C, were higher than estimated germination at the same conditions, however this is not bad, because the simulation presents lower output than the actual germination. Drying temperature of 61°C and 67°C presented high correlation between the experimental points and the drying model. This publication present results to define the time for the drying process to preserve the seed germination.

**Key-words:** canola, germination, simulation

## 1. INTRODUÇÃO

A canola é a terceira oleaginosa mais importante no agronegócio mundial. Em 2004, a produção mundial de canola e colza foi de 46 milhões de toneladas (FAO, 2005). A canola (*Brassica napus*) é resultado do melhoramento genético da colza pertencente à família Brassicaceae, cuja característica principal, é exibir baixo teor de ácidos graxos saturados, precursores de LDL, que é o colesterol nocivo. Compostos como ácido erúico e glicosinolatos, os quais exibem reconhecida toxidez para a digestão animal, foram reduzidos no melhoramento. O óleo de canola representa atualmente uma ótima alternativa para a produção de biodiesel, e na Alemanha a totalidade de biodiesel é produzida a partir desta fonte de matéria prima (TOMM, 2005).

No Brasil, a canola chegou ainda em 1974 e lentamente vem conquistando espaço na rotação de culturas de inverno. Somente no período 2002/2003, a produção cresceu em 42%, passando de 14.633 para 20.826 toneladas. Em 2004, a área plantada foi de 15 mil hectares, com uma produção estimada de 18 mil toneladas (TOMM, 2005). A partir de 2004, Goiás tem se destacado pela produção de canola com elevada produtividade (2400 kg/ha).

A necessidade de se manter um alto índice de germinação das sementes de canola após a colheita é bastante clara nesse ramo de atividade agrícola de produção de sementes.

Assim, justifica-se o estudo do comportamento da germinação, durante a secagem, pois as condições de umidade e temperatura utilizadas tradicionalmente podem ser otimizadas, portanto, estabelecer condições que assegurem alto teor de germinação após a secagem é essencial para o produtor de sementes.

Os principais problemas relativos à perda de qualidade em germinação de sementes são causados por mudanças de temperatura e umidade durante a secagem e armazenagem nos processos de manuseio pós-colheita. O conhecimento dos efeitos das variações de umidade e de temperatura sobre a germinação de sementes de canola visa contribuir para melhorar o

manuseio dos equipamentos de secagem e armazenagem, através do conhecimento da secagem.

Neste trabalho, um modelo matemático para previsão de germinação foi aplicado a um programa de secagem de grãos, com o objetivo de fornecer a viabilidade final, de acordo com as condições iniciais (umidade e germinação) da semente, e sob determinadas condições de secagem (temperatura e umidade relativa). Os dados experimentais foram comparados com resultados de simulação para validar o modelo matemático.

## **2. OBJETIVOS**

### **Gerais**

Propiciar as melhores condições de secagem aos produtores de sementes de canola para reduzir as perdas de germinação.

### **Específicos**

Desenvolver um modelo matemático que represente a variação da germinação de acordo com as condições de temperatura e umidade das sementes.

Avaliar a influência das condições de secagem na germinação de sementes de canola.

### **3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.**

#### **3.1. Aspectos gerais**

##### **3.1.1. Histórico**

A colza já era conhecida na Índia há 3000 anos. No século XIII, óleo de colza foi utilizado na Europa como combustível para iluminação nas grandes cidades e lubrificação de navios de guerra durante os conflitos armados. Apenas recentemente, após a II Guerra Mundial, foi utilizado como óleo comestível (SHAHIDI, 1990).

Os principais problemas da utilização da colza como alimento são o alto teor de glucosinolatos e ácido erúcido, tóxicos aos organismos animais.

Os glucosinolatos são os principais fatores antinutricionais do farelo de colza. Apresenta-se na forma de diversos compostos secundários oriundos da transformação de aminoácidos como metionina e triptofano, podendo ocasionar mal funcionamento da tiróide, interferindo na reprodução dos animais (LAGE, 2002), ou provocar rejeição em crianças e animais, devido às características organolépticas como amargor.

Ácido erúcido é um ácido graxo mono-insaturado, conhecido também por ácido cis-13-docosenoico. O principal motivo que torna este componente indesejável para consumo humano, é o fato de poder se acumular no miocárdio, ocasionando problemas cardíacos, característica de ácidos graxos saturados ou mono-insaturados de cadeia longa. Testes em ratos alimentados com ração contendo farelo de colza apresentaram lesões no coração. Além disso, o trato digestivo tem dificuldade de quebrar as cadeias deste ácido graxo, dificultando o metabolismo (FIGUEIREDO et al., 2003).

Apesar de indesejável como alimento, o ácido erúcido possui diversas aplicações industriais, como óleos lubrificantes, componentes de tintas e filmes fotográficos com a

vantagem de ser biodegradável, ao contrário dos óleos minerais (JOHNSON & CROISSANT, 2007).

A partir da década de 70 diversos pesquisadores canadenses, principalmente da Universidade de Manitoba, têm se dedicado à obtenção de novas variedades híbridas de colza, com o objetivo de reduzir o teor de componentes antinutricionais (ALLEN & MORGAN, 1975). Canola Tower foi a primeira variedade “double low” (composição reduzida de glucosinolato e ácido erúcido).

Nesta época surgiram as seguintes nomenclaturas de colza: HEAR (elevada concentração ácido erúcido – até 50%) e LEAR (inferior a 2% de ácido erúcido). Canola, inicialmente uma marca registrada, expressão adotada em 1979 no Canadá, tornou-se nome conhecido popularmente, contém teor inferior a 2% de ácido erúcido e máximo de 30 micromoles de glucosinolato (CANOLA COUNCIL OF CANADA, 2007). É fruto de melhoramento dos cultivares de *Brassica napus* e *Brassica campestris*. O óleo de canola tem em sua composição natural, a menor concentração de gorduras saturadas entre os óleos comestíveis conhecidos. De acordo com a FDA, (MORE, 1992), somente o óleo de canola pode conter no rótulo “baixo teor de gordura saturada”, e alcançou grande aceitação nos EUA, sendo reconhecido pela FDA constando da lista de alimentos seguros – GRAS (“Generally Recognized As Safe”). Devido ao alto conteúdo de ácidos graxos insaturados, evita formação de colesterol LDL, que pode se sedimentar nas vias sanguíneas.

O óleo de canola é uma das mais saudáveis fontes de lipídeos, com elevado teor de Ômega-3 (controlador da arteriosclerose), vitamina E (antioxidante natural), e gorduras mono-insaturadas, que é fator de preservação de HDL, colesterol desejável (TOMM, 2005).

### **3.1.2. A importância da canola.**

A canola pertence à família Brassicaceae (anteriormente Cruciferae), gênero Brassica. As espécies mais conhecidas são mostarda, repolho, nabo, couve-flor. Há mais de 100 espécies do gênero Brassica, e uma das espécies de maior destaque econômico é a canola pela extensão de terras ocupada pela espécie.

O maior produtor mundial é a China (Tabela 01). Em 2005, houve a maior produção mundial de canola/colza, 46.4 milhões toneladas conforme Tabela 02.

Tabela 01. Produção mundial de colza/canola em 2005

<b>Produção mundial de colza/canola – 2005 (10<sup>6</sup> t)</b>	
 China	13,0
 Canadá	8,4
 Índia	6,4
 Alemanha	4,7
 França	4,4
 Grã-Bretanha	1,9
 Polônia	1,4
 Austrália	1,1
Outros	5,1
<b>Total</b>	<b>46.4</b>

Fonte: (FAO, 2005)

Tabela 02. Evolução mundial de colza/canola a partir de 1965

<b>Produção Mundial (10<sup>6</sup> t)</b>	
1965	5,2
1975	8,8
1985	19,2
1995	34,2
2005	46,4

Fonte: (FAO,2005)

A canola chegou ao Brasil em 1974 e vem conquistando espaço na rotação de culturas de inverno. Em 2004, a área plantada foi de 15.000 ha, com produção estimada em 18000 toneladas. (AGRONLINE, 2007).

O mercado se encontra em expansão e bons preços mínimos estão fazendo o plantio da canola no Rio Grande do Sul passar de 9.600 ha em 2002 para 13.500 ha em 2004 e uma estimativa de 20.000 ha em 2005. A produtividade tem progredido gradativamente, hoje na faixa de 2400 kg/ha, e o ciclo curto de cultivo apresenta ótima adequação para rotação com o trigo. Rio Grande do Sul, Paraná e Goiás são os principais produtores do grão, que tem entre 24% e 27% de proteína e entre 34% e 40% de óleo. A recente adesão da região centro-oeste para produção de canola tem apresentado potencial crescente de produção. A produção tende a ser crescente, a partir do interesse de utilização do óleo de colza para fins energéticos, principalmente biodiesel (TOMM, 2005). Conseqüentemente, o custo de produção se reduz e a

instalação de indústrias de moagem, próximos à região produtora resultará em preços mais competitivos com outros óleos vegetais.

No início do século XX surgiram os motores que utilizavam óleo diesel como combustível, podendo ser substituídos por óleos vegetais, e até óleo de peixe. Porém o derivado de petróleo apresentou rendimento muito maior. A partir da década de 70, novos combustíveis alternativos como o álcool, foram sendo introduzidos devido à crise do petróleo. O combustível derivado da cana de açúcar apresentou ótimos resultados. Na Europa, iniciou-se nesta época a pesquisa em biodiesel, tendo como principal matéria-prima, o óleo de colza.

No Brasil, a aplicação de biodiesel ocorreu com suporte dos EUA, para suprir frotas de ônibus, utilizando-se soja como matéria-prima (GAZZONI, 2007). Uma das metas de viabilizar a produção de biodiesel está na substituição de óleo diesel em 10% (conhecido como combustível B10). Os custos do processo ainda representam um dos principais obstáculos, devido à deficiência produtiva. Aliando-se à conscientização mundial sobre os riscos de utilização de combustíveis fósseis e sustentabilidade da energia, há esforços crescentes e irreversíveis da comunidade internacional para suprimento de biodiesel em tempo próximo.

A colza apresenta potencial real devido ao teor de lipídeos, reservando o crescimento de produção de canola para finalidades mais nobres de alimentação. Justifica-se pelas mesmas condições a pesquisa e produção de canola e colza.

A redução do teor de fatores antinutricionais torna o farelo de canola um ótimo insumo para alimentação animal. Diversos pesquisadores têm se dedicado ao aproveitamento deste ramo de utilização (LAGE, 2002). A substituição gradativa do farelo de soja pelo farelo de canola, na alimentação de coelhas não apresentou alteração no ovário, fato encontrado nas fêmeas alimentadas com ração tendo colza na composição.

Atualmente, o farelo de canola é adicionado com algumas restrições (máximo de 10% em peso de ração) em galinhas poedeiras, no Canadá, enquanto que para alimentação de frangos de corte tem sido utilizado sem restrições. CAMPBELL, SLOMINSKI & JENSEN. (1999) concluíram que a substituição gradativa de farelo de soja por farelo de canola não tem apresentado redução no tamanho ou número de ovos postos.

No Brasil, o farelo de canola tem sido empregado na alimentação de diversos animais, com ótima aceitação, como peixes curimatás (GALDIOLI et al., 2002) e tilápias (GAIOTTO & MACEDO, 2004), suínos (SCHERER, 2006) e aves (LAGE, 2002).

A semente atinge maturidade fisiológica quando alcança o máximo de matéria seca, e a partir deste momento, inicia-se o processo de deterioração (POPINIGIS, 1985). De acordo com BASRA et al. (2003), a deterioração de sementes devido às condições adversas pode ser causada pela desintegração da membrana, desativação de sistemas enzimáticos, peroxidação de lipídeos e aumento de acidez.

O conhecimento das condições ideais para a secagem e armazenamento de sementes, com a preservação da germinação da semente de uma determinada espécie é de fundamental importância, principalmente, pelas respostas diferenciadas que ela pode apresentar em condições adversas (CARVALHO & NAKAGAWA, 2000). Sementes de canola são colhidas a alta umidade (18-24%), para evitar perdas por deiscência, necessitando, porém, de secagem imediata para evitar deterioração por agentes microbiológicos e bioquímicos (COPELAND & MCDONALD, 1985).

A semente de canola se encontra no interior de um fruto capsulado, sílique, espécie de vagem. A sílique é constituída por dois carpelos que possuem camada delgada de células do parênquima que mantém os carpelos ligados. Quando a sílique atinge maturação completa, ocorre cerca de 20% de perdas de canola que caem no solo devido à deiscência. Tem se verificado que uma serie de reações culminando na queda de produção de etileno desencadeiam uma serie de alterações metabólicas nos vegetais iniciando o período de senescência e colheita natural. CHILD et al. (1998) estudaram a influência da deformação de etileno de deiscência de síliques de canola. A redução de velocidade de produção de etileno nas células próximas à divisão entre as duas metades de sílique contribuiu para desencadear a deiscência, ou seja, causou a separação de células na zona de deiscência. Quando o teor de IAA (Indole-3-acetic acid) é reduzido na zona de deiscência, muito pouco etileno é necessário para desencadear o processo de separação da sílique.

De acordo com TOMM (2005), após a colheita efetua-se o enleiramento, quando as síliques já estão em fase de secagem. Desta forma é necessário evitar a colheita sob forte insolação, pois as síliques têm tendência a abrir e perder os grãos.

### **3.2. Acondicionamento hermético**

Durante o armazenamento, a semente perde viabilidade como consequência natural de envelhecimento causado pelas condições normais de temperatura e umidade. De acordo

com NELLIST (1978), para uma determinada amostra de sementes, a germinação durante a decrece o com tempo de armazenagem, sendo essencialmente função da germinação inicial e das condições de armazenagem (temperatura e umidade da semente).

ROBERTS (1960) desenvolveu uma teoria considerando o comportamento da freqüência de mortes em uma população de sementes armazenadas durante um período de tempo, sob condições constantes de umidade e temperatura, pois as sementes perdem capacidade de germinação como conseqüência natural do envelhecimento. Portanto, a curva de variação de germinação com o tempo de armazenamento, tem formato sigmóide. A análise estatística denominada como “probit analysis” (FINNEY, 1951) deu origem ao termo “probit viability” (ELLIS & ROBERTS, 1980a). O desvio padrão  $\sigma$  é a medida da dispersão de morte das sementes a partir do tempo médio de secagem ou armazenagem.

ROBERTS (1960) e ELLIS & ROBERTS (1980a) analisaram a perda de germinação durante acondicionamento de sementes sob condições fixas de umidade e temperatura, enquanto que NELLIST (1980) apresentou uma simplificação para a avaliação de germinação durante a secagem, considerando a secagem como sendo sucessivas etapas de armazenagem sob condições constantes de umidade e temperatura. NELLIST (1980) manteve o tempo como única variável independente durante o processo de acondicionamento.

ELLIS & ROBERTS (1980b) e ELLIS, HONG & ROBERTS (1989) na tentativa de obter informações sobre a modelagem da perda de germinação causada pelo calor durante a secagem e armazenagem, desenvolveram experimentos utilizando latas herméticas em estufas, a temperatura controlada, como instrumento para predizer a queda na germinação de sementes após secagem ou armazenagem. O ensaio consistiu em acondicionar sementes em embalagem hermética, conservando-se constantes os níveis de umidade e temperatura, sem evaporação.

ROBERTS (1960) afirmou que as curvas de morte em uma amostra de sementes, após um determinado tempo ( $t$ ) de armazenamento, são normalmente distribuídas de acordo com a equação 01.

$$G = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_t^{+\infty} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{t-tm}{\sigma}\right)^2\right] dt \quad (01)$$

onde:

G índice de germinação (decimal)

- t tempo (s ou h)  
 tm Tempo para G=0,5 (s ou h)  
 $\sigma$  Desvio padrão da distribuição normal (s ou h)

Esta equação pode ser ilustrada pela Figura 1.

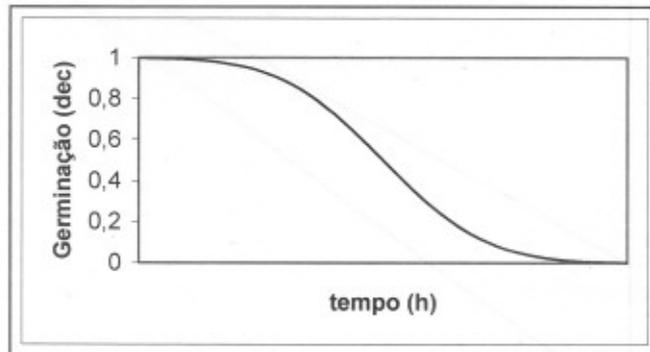


Figura 01. Distribuição de mortes de sementes, em função do tempo (ROBERTS, 1960)

Desta forma é possível definir-se uma variável X, sendo que:

$$X = \frac{(t - t_m)}{\sigma} \quad (02)$$

Onde  $1/\sigma$  é a declividade de uma reta da Figura 02.

Substituindo-se X da equação 02 em 01, tem-se:

$$G = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^X \exp\left[-\frac{1}{2} X^2\right] dX \quad (03)$$

Por outro lado, segundo PRESS et al. (1992), a função erro complementar (erfc) é um caso especial da função Gamma incompleta, onde:

$$\text{erfc}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_z^\infty e^{-t^2} dt \quad (04)$$

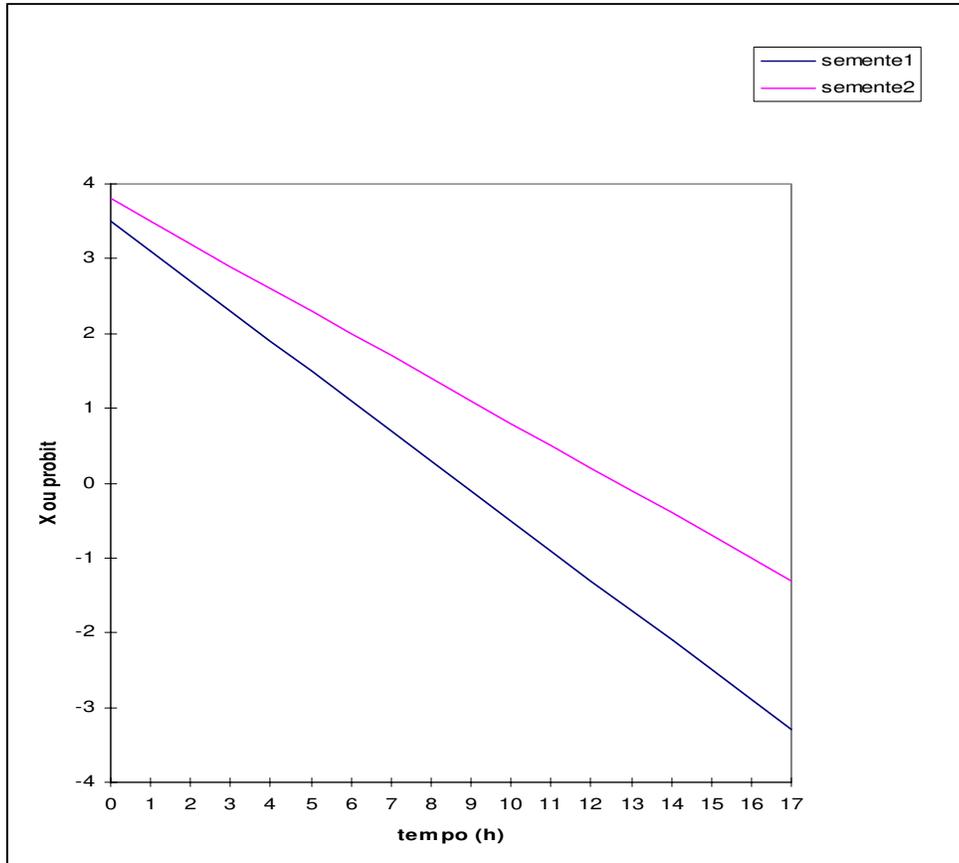


Figura 02. Germinação em Probit (X) para duas espécies (Linearização da equação 01 através da mudança de variável)

Na Figura 02, as duas retas apresentam diferentes declividades como consequência de valores distintos de  $\sigma$ , podendo ser diferentes espécies ou diferentes condições de umidade e temperatura.

Substituindo-se X da equação 02 em 01, tem-se:

$$G = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_X^{+\infty} \exp\left[-\frac{1}{2} X^2\right] dX \quad (03)$$

Por outro lado, segundo PRESS et al. (1992), a função erro complementar (erfc) é um caso especial da função Gama incompleta, onde:

$$erfc(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_z^{\infty} e^{-w^2} dw \quad (04)$$

Se:

$$w=(2^{-0.5})*X$$

E comparando-se as equações 03 e 04, obtém-se:

$$G = \frac{erfc(X)}{2} \quad (05)$$

Sabendo-se que  $G_0=erfc(X_0)/2$ , da equação 02, tem-se:

$$X = X_0 + \frac{t}{\sigma} \quad (06)$$

Assim, para a determinação de  $\sigma$ , os valores de  $G$  são convertidos na variável  $X$  da função *erfc*, e utilizando-se experimentos de acondicionamento em embalagens herméticas, esta mudança de variável apresenta melhor resposta para determinação de  $\sigma$ .

$$\sigma = e^{a-b*T_p-c*\ln(U)} \quad (07)$$

Onde:

$T_p$  temperatura da semente (°C)

$U$  umidade da semente (%)

A relação entre  $\sigma$  e as condições de acondicionamento hermético postuladas por ELLIS & ROBERTS (1980a) através da equação 07 foram utilizados em diversas espécies de sementes (ELLIS, HONG & ROBERTS, 1989; HONG & ELLIS, 1992).

HONG et al. (2005) testaram o mesmo modelo proposto (equação 07) por ROBERTS (1960), em sementes após dez anos de armazenagem e apresentaram ótima correlação dos coeficientes testados.

NELLIST & BRUCE (1987) utilizaram o modelo de ROBERTS (1960) e apresentaram a equação 08 que representa a taxa de morte de sementes de trigo, durante a secagem a 65° C:

$$\sigma=60*\exp(15,538-5,9*\ln(U)) \quad (08)$$

MCKNIGHT & MOYSEY (1973) realizaram experimentos de acondicionamento hermético em estufas, e encontraram germinação conforme Tabela 03.

Tabela 03. Germinação após armazenagem hermética de colza

Temperatura (°C)	Tempo (10 <sup>2</sup> s)	Umidade (%)	
		9,5	14,6
		Germinação (%)	
48,9	36	95	98
48,9	108	98	
60,0	36	97	90
60,0	108	95	
71,1	36	94	0
71,1	108	50	
82,2	36	45	

Fonte: MCKNIGHT & MOYSEY, 1973.

KREYGER (1972) estudou a redução de germinação durante o tempo de armazenagem, como se verifica na Tabela 04.

Diversos pesquisadores utilizaram os dados de KREYGER (BURRELL et al., 1980; e MUIR & SINHA, 1986). BURRELL et al. (1980) realizaram pesquisa semelhante, utilizando como critério de qualidade, a visualização de crescimento de fungos em colza armazenada.

Tabela 04. Experimentos de acondicionamento hermético.

Temperatura (°C)	Tempo (10 <sup>2</sup> s)	Umidade (%)	Germinação (%)
50	6	10,16	98
50	18	10,16	92
50	72	10,16	88
60	6	9,80	98
60	24	9,80	66
60	36	9,80	72
70	6	7,36	98
70	12	7,36	85
70	24	7,36	82
70	6	9,49	35
70	12	9,49	34
70	18	9,49	15

Fonte: KREYGER, 1972.

MUIR & SINHA (1986) estabeleceram a seguinte equação que expressa os dados de KREYGER (1972):

$$t = \exp(12,153 - 0,4743 * U - 0,145 * T) \quad (09)$$

onde:

- t tempo de exposição (s ou h)
- U umidade da semente (%)
- T temperatura da semente (°C)

### 3.3. Ensaios de secagem

Muitos experimentos de secagem de sementes utilizaram sementes reidratadas, resultando em amostras homogêneas, porém não representam o que realmente ocorre no campo, quando sementes colhidas a umidades variadas sofrem secagem natural ou em secadores mecânicos.

WOODFORDE & LAWTON (1965) reidrataram colza até 20% e secaram durante uma hora, a diversas temperaturas de 40°C a 85°C. Não houve redução significativa de germinação até 65°C, mas as perdas se tornaram maiores com aumento da temperatura, a partir de 70° C. A temperatura de 60°C foi considerada segura com o objetivo de preservar o índice de germinação da semente.

NELLIST, REES & ABRAHAMS (1970) secaram colza, colhida diretamente do campo, em secador de colunas. A umidade variou de 13 a 26%. Amostras de 150 mm de profundidade sofreram secagem com ar a temperatura na faixa de 32 a 74°C, à vazão de 10 (kg de ar)/(h.kg semente). O tempo de secagem variou de 0,7 a 7,5 h. As curvas mostraram que as frentes de secagem ainda permaneceram na massa de grãos. Significa que os tratamentos variam entre si, e grãos apresentam diferença de umidade em diferentes camadas de profundidade do leito; porém após a mistura, as amostras podem representar significativamente os secadores contínuos. As perdas de germinação foram mais significativas após mais de duas horas de secagem e sob temperaturas superiores a 70°C, e experimentos com umidade inicial superior a 18%. O resumo dos experimentos realizados encontra-se na Figura 03.

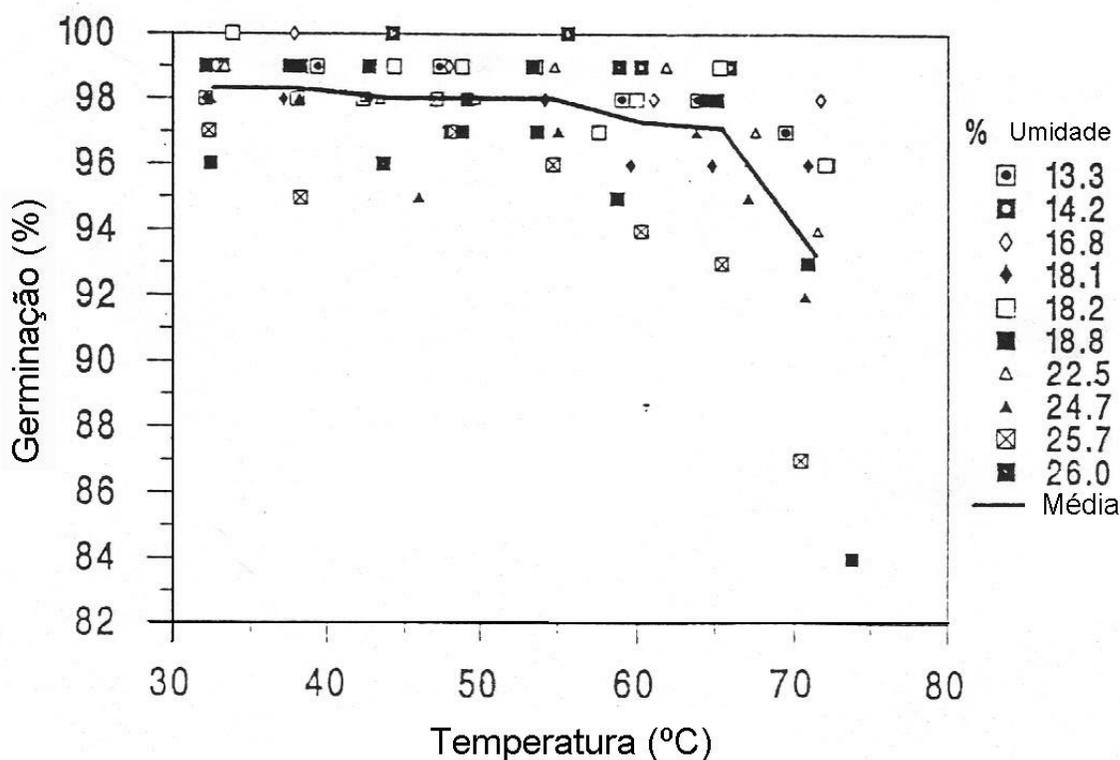


Figura 03. Efeito da umidade inicial e temperatura de secagem, na germinação de sementes de colza. (Fonte: NELLIST, REES & ABRAHAMS, 1970)

A legislação britânica (GREAT BRITAIN, 1982) estabelece normas (Tabela 05) muito abaixo do verificado experimentalmente, de que sementes não devem sofrer secagem a temperaturas superiores a 43° C, para umidade inicial de 25% e 55° C, para umidade de 21%.

Tabela 05. Temperatura máxima recomendada para secagem de sementes, de acordo com a umidade inicial.

Umidade (%)	Temperatura (°C)
17	65
19	60
21	55
23	49
25	43
27	38
29	32

Fonte: GREAT BRITAIN, 1982.

De acordo com NELLIST (1978) as recomendações do GREAT BRITAIN (1982) são limitantes, pois no início de secagem, em equipamentos industriais, não há redução de germinação.

MCKNIGHT & MOYSEY (1973) realizaram experimento semelhante em colunas de 250 mm. Encontraram redução de germinação acima de 60°C, dependendo da umidade. Temperatura de 71°C causa pouco dano para umidade inicial de 11%. Para cada acréscimo de umidade de 2%, temperatura deve ser reduzida em 5,6°C (10°F) apresentadas na Tabela 06. As recomendações são mais conservadoras que no caso da legislação britânica.

Tabela 06. Germinação de colza na camada inferior e amostra de mistura após secagem a três temperaturas e três valores de umidade inicial

Temperatura (°C)	Umidade (%)			Umidade (%)	
	11,5	12,3	15,4	11,5	15,4
	Germinação de camada inferior (%)			Germinação de mistura (%)	
71,1	92	79 (85*)	83	95	90
82,2	90		75	90	75
93,3	82		65	82	65

fluxo de ar 0,25 m/s; (\*) 0,07 m/s

Fonte: MCKNIGHT & MOYSEY, 1973.

SUTHERLAND & GHALY (1982) secaram colza em secador de leito fluidizado, com umidade inicial de 12, 14 e 16%. O ar de secagem, com vazão de 2,0 m/s, foi utilizado a diversas temperaturas entre 40 e 70°C. Não houve redução de germinação até 60°C, perda reduzida a 65°C, e perda substancial a 70°C, para umidade inicial de 14 e 16%. Colza com umidade inicial de 12% apresentou germinação zero após uma hora. As maiores reduções de germinação ocorreram na primeira hora de secagem. Até 60°C não houve perda de germinação, para umidade de 14, 16 ou 18% após 8 horas de secagem (Figura 03). SUTHERLAND & GHALY (1982) concluíram que temperatura de 75°C resultou em não germinação.

Os dados de WOODFORDE & LAWTON (1965) e SUTHERLAND & GHALY (1982) são semelhantes. Embora os secadores sejam diferentes, a secagem em leito fluidizado

segue o mesmo mecanismo de secagem em camada delgada na metodologia de WOODFORDE & LAWTON (1965).

Como guia prático para estabelecer as condições de secagem e armazenagem, HARRINGTON (1973), sugeriu a seguinte regra: "para cada redução de temperatura em 5,6 C (10°F), o tempo de armazenagem será dobrado, para mesma perda de germinação". Obviamente, essas regras são sujeitas a limitações, não exibindo comportamento linear. MCKNIGHT & MOYSEY (1973) confirmaram uma regra semelhante, secando colza a 71°C.

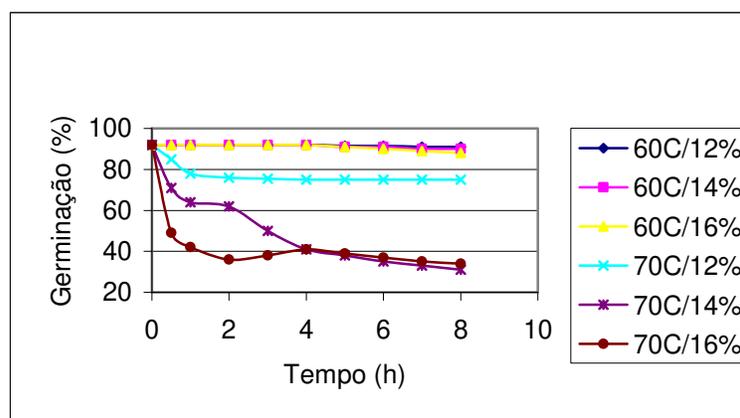


Figura 04. Secagem de colza com três níveis de umidade inicial e duas temperaturas (SUTHERLAND & GHALY, 1982).

GHALY & SUTHERLAND (1984) secaram colza à umidade inicial de 12, 14 e 16%, com temperatura de 30 a 90°C, por 8 horas. O equipamento utilizado foi de leito fluidizado, ar com velocidade de 2,0 m/s. Utilizou-se neste trabalho, como critério de qualidade, detectar queda de germinação, e qualidade de óleo nas temperaturas selecionadas.

Verificou-se que as sementes e a umidades testadas podem ser submetidas à secagem a 60°C, sem sofrer perdas de germinação. A 70°C, houve redução leve de germinação, durante a primeira hora. A qualidade de óleo foi reduzida à temperatura de 70°C, para umidade inicial de 14 e 16% e 75°C, para 12% de umidade inicial.

CENKOWSKI, MUIR & JAYAS (1990) secaram canola e cevada, com umidade inicial de 25% bs e realizaram estudos de simulação. O fluxo de ar variou de 0,4 a 0,6 kg/(m.s<sup>2</sup>) e a temperatura de secagem foi de 67,5°C. A secagem de cevada apresentou curvas

experimentais e estimadas, próximas de outros pesquisadores, enquanto que canola necessita de estudos adicionais para verificar índices de qualidade. O peso específico e dimensões apresentaram alterações sensíveis.

CORREA, MARTINS & CHRIST (1999) secaram canola em camada delgada e avaliaram as perdas de germinação. A secagem foi realizada a diversas temperaturas (30 a 60°C), umidade relativa do ar de 30 a 60%. A umidade inicial da canola foi de 13% até atingir 8%. O modelo de redução de germinação utilizado foi um polinômio, baseado na estatística aplicada SAS.

A germinação inicial de 93% apresentou menor redução durante secagem a 60°C, com 60% de umidade relativa e a maior queda ocorreu a 50°C, umidade relativa de 30%.

As sementes devem sofrer secagem a temperaturas inferiores às utilizadas em grãos para consumo, para não haver redução na viabilidade.

As temperaturas elevadas e alta vazão em secadores de leito fluidizado afetam imediatamente a germinação da semente, porém após algum tempo, a qualidade dos lipídeos é afetada. Depois de algum tempo, surgem ácidos graxos livres e aumento de índice de peróxido e posteriormente, há escurecimento do óleo (GHALY & SUTHERLAND, 1984; PATHAK, AGRAWAL & SINGH, 1991). Igualmente, temperaturas mais elevadas causam redução da germinação e afetam qualidade do óleo imediatamente, para sementes colhidas verdes (CENKOWSKI, MUIR & JAYAS, 1990). Não há evidências de que a secagem afete a qualidade do óleo durante a armazenagem, embora as oleaginosas deterioresem mais rápido que cereais (PATHAK, AGRAWAL & SINGH, 1991).

### **3.4. Simulação de secagem de sementes.**

O volume de sementes num secador de leito estacionário pode ser considerado como diversas camadas delgadas superpostas. As variações de umidade e temperatura podem ser calculadas para cada período de tempo, assumindo que durante cada período  $dt$ , o produto se encontra em condições constantes de umidade e temperatura. O modelo de secagem de equações diferenciais consiste em 3 equações (equações 10, 11 e 12), e mais a equação 13 baseada em experimento de camada delgada (BROOKER, BAKKER-ARKEMA & HALL (1992).

Assumindo-se que:

1. o encolhimento de grãos é mínimo durante a secagem;
2. o gradiente de temperatura em cada grão é desprezado;
3. não há condução de grão para grão, nem perda de massa;
4. o fluxo de ar é a vazão constante;
5.  $\partial T/\partial t$  e  $\partial H/\partial t$  são desprezíveis, comparado a  $\partial T/\partial x$  e  $\partial H/\partial x$ ;
6. as paredes do secador são adiabáticas;
7. as equações de secagem e umidade de equilíbrio são necessárias;
8. cada camada representa um volume de controle onde ar e grão realizam trocas de umidade e temperatura.

As seguintes equações regem o comportamento das variáveis em coordenadas cartesianas:

Temperatura do ar:

$$\frac{\partial T_a}{\partial x} = \frac{-h^* s^* (T_a - T_p)}{Q_a * c_a + Q_a * c_v * H} \quad (10)$$

Temperatura do grão.

$$\frac{\partial T_p}{\partial t} = \frac{h^* s^* (T_a - T_p)}{\rho_p * c_p + \rho_p * c_w * \bar{U}} + \frac{h_{fg} + c_v * (T_a - T_p) * Q_a}{\rho_p * c_p + \rho_p * c_w * \bar{U}} * \frac{\partial H}{\partial x} \quad (11)$$

Umidade absoluta do ar:

$$\frac{\partial H}{\partial x} = -\frac{\rho_p * \partial U}{Q_a * \partial t} \quad (12)$$

Equação de camada delgada:

$$\frac{\partial U}{\partial t} = \alpha (e^{-\beta t}) \quad (13)$$

onde:

- $c_a$  calor específico do ar (J/(kg\*°C))  
 $c_p$  calor específico da semente (J/(kg\*°C))

$c_v$	calor específico do vapor (J/(kg*°C))
$c_w$	calor específico da água (J/(kg*°C))
$h$	coeficiente de transferência de calor por convecção (J/(m <sup>2</sup> *h*°C))
$h_{fg}$	calor latente de evaporação da água (J/kg)
$s$	área superficial volumétrica (m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> )
$t$	tempo (s ou h)
$x$	espessura da camada (m)
$H$	umidade absoluta (kg água/kg ar seco)
$Q$	vazão (kg ar/(h*m <sup>2</sup> ))
$S$	área da seção do secador (m <sup>2</sup> )
$T$	temperatura (°C)
$U$	umidade da semente (decimal)
$\rho$	peso específico (kg/m <sup>3</sup> )

Para resolução das equações diferenciais, há necessidade de se estabelecer condições iniciais e de contorno para o sistema analisado (Figura 05).

Assim sendo, para as sementes de canola e ar de secagem, as seguintes condições iniciais são conhecidas:

1. Temperatura e umidade do produto.
2. Temperatura e umidade relativa do ar.

Condições de contorno:

Para um leito estacionário, as seguintes condições de contorno podem ser estabelecidas:

$$T_a(0,t)=T_{a0}$$

$$T_p(x,0)=T_{p0}$$

$$H(0,t)=H_0$$

$$M(x,0)=M_0$$

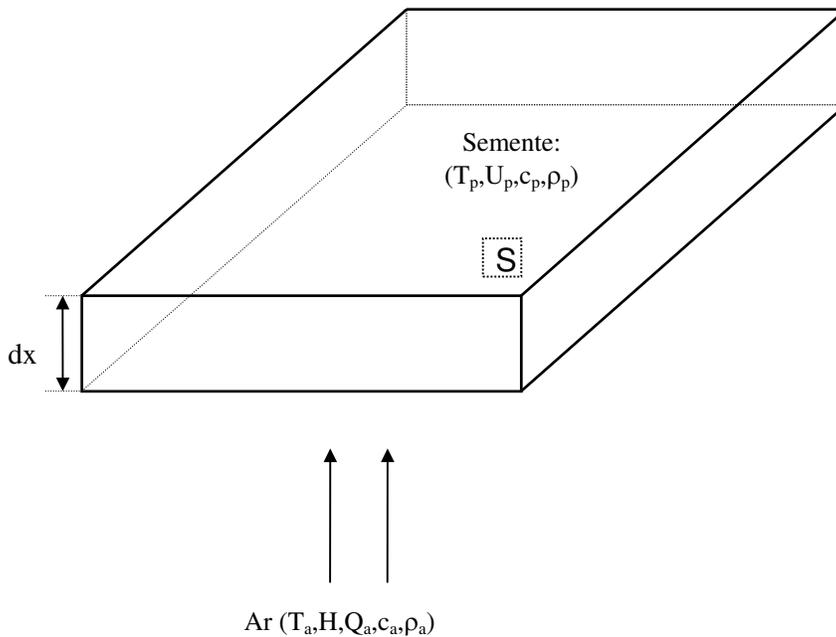


Figura 05. Unidade do volume de controle.

O modelo de equilíbrio de THOMPSON (1967) é uma simplificação do modelo anterior, utilizando as três equações de taxa de transferência de calor e massa entre ar de secagem e produto sendo desidratado. Apenas a equação de camada delgada não é utilizada, assumindo-se equilíbrio entre ar e semente, na camada delgada.

O modelo apresenta resultados de simulação representativos do experimento, para ciclos de iteração de intervalos de tempo ( $dt$ ) reduzidos, anteriormente recomendado apenas para simulação de secagem a temperatura próxima do ambiente, para iteração de uma hora em cada passo do fluxograma de secagem.

Posteriormente o modelo de Thompson foi modificado por MOREY et al. (1978), reduzindo  $dt$  e incluindo uma ou mais equações substitutivas, (como se verifica no item 3.5.5) para equação de camada delgada (equação 13).

### 3.5. Propriedades físicas

As principais propriedades físicas e térmicas são utilizadas em secagem experimental e simulação.

### 3.5.1. Peso específico aparente

RAO & PFOST (1980) consideraram que a colza é uma semente virtualmente esférica. Em uma amostra de 17.7% de umidade da cultivar Lebaron, o diâmetro foi de 1.9 mm. Para uma centena de sementes pesando 5,7 g, a redução do volume seguiu a seguinte equação:

$$V_s = (0.0039 + 0.006 * U) * 10^{-6} \quad (14)$$

Onde:

$V_s$  volume da semente ( $m^3$ )

$U$  umidade da semente (%)

E a massa seguindo a seguinte equação:

$$m_s = 0.00468 * (1 + U) \quad (15)$$

onde:

$m_s$  massa de cada semente (kg)

CRISP & WOODS (1994) mediram diâmetro de cultivar Ariana, medindo 0,995 mm com umidade 11,9% bs, seguindo a equação:

$$D_s = 1.895 + 0.00799 * U \quad (16)$$

Onde:

$D_s$  diâmetro (m)

$U$  umidade, bs (%)

JAYAS et al. (1987) estudaram *B. napus* Westar var. e *B. campestris* Tobin cultivar e concluíram que o diâmetro equivalente da cultivar Tobin foi de 1,5 mm a 14.5% de umidade e para Westar foi 1,8 mm a 7,0% de umidade.

WOODFORDE & LAWTON (1965) pesaram amostras de 100 sementes, determinaram massa individual de  $4.16 * 10^{-3}$  g; peso específico real sendo  $1.12 \text{ g/cm}^3$ ; e peso específico aparente de  $689 \text{ kg/m}^3$ .

PATIL & WARD (1988) determinaram peso específico aparente, em função da umidade, e sugeriram a equação:

$$\rho_p = 1094 - 6,25 * U + 0,305 * U^2 \quad (17)$$

### 3.5.2. Umidade de equilíbrio

Entre as principais propriedades durante a secagem, uma das essenciais é a umidade de equilíbrio. Diversos modelos representativos do fenômeno físico são aplicados durante os processos que envolvem transferência de umidade e calor.

Entre os modelos mais aplicados, encontra-se HENDERSON (1952), de THOMPSON (1967) (ou HENDERSON modificada) e CHUNG & PFOST (1967).

Diversas propriedades foram compiladas de pesquisas realizadas anteriormente com canola.

#### a. Equação de HENDERSON (1952)

HENDERSON (1952) propôs uma equação semiempírica, baseando-se na teoria de absorção de Gibbs, para representar a umidade de equilíbrio de produtos agrícolas.

$$1 - \frac{P_v}{P_{vs}} = e^{(-ha * T_{abs} * U_{eq}^{hb})} \quad (18)$$

onde:

$P_v$  pressão de vapor do produto (Pa)

$P_{vs}$  pressão de vapor do produto, se o ambiente for saturado (Pa)

$T_{abs}$  temperatura (K)

$U_{eq}$  umidade de equilíbrio (decimal)

ha, hb parâmetros do produto

#### b. Equação de HENDERSON Modificada (THOMPSON, 1967):

THOMPSON (1967) aprimorou a equação de Henderson, tornando mais apropriado aos grãos.

$$1 - \frac{P_v}{P_{vs}} = e^{(-ma(T+mc)U_{eq}^{mb})} \quad (19)$$

onde:

$P_v$  pressão de vapor do produto (Pa)

$P_{vs}$  pressão de vapor do produto, se o ambiente for saturado (Pa)

$T$  temperatura (°C)

$U_{eq}$  umidade de equilíbrio (decimal)

$ma, mb, mc$  parâmetros do produto

c. Equação de Chung (CHUNG & PFOST, 1967).

Assim como a equação de Thompson, a equação desenvolvida por CHUNG & PFOST (1967) também é muito utilizada para determinação de umidade de equilíbrio de produtos agrícolas.

$$U_{eq} = ea - eb * \ln(-(T + ec) * \ln(\frac{P_v}{P_{vs}})) \quad (20)$$

onde:

$ea, eb, ec$  coeficientes dependentes da espécie da semente

RAO & PFOST (1980) utilizaram os dados para os modelos HENDERSON modificado (THOMPSON, 1967) e CHUNG & PFOST (1967).

SOKHANSANJ et al. (1986) utilizaram sensores eletrônicos para medir umidade relativa a 5 a 25°C, evitando acúmulo de erros causados pelas medidas de ambas variáveis. Os valores de umidade de equilíbrio apresentaram convergência com dados de PICHLER (1957) e PIXTON & HENDERSON (1981), porém nem tanto com dados de RAO & PFOST (1980). O modelo de HENDERSON modificado apresentou melhor representação que o modelo de Chung (CHUNG & PFOST, 1967), até 80% acima desta umidade e a umidade de equilíbrio apresentou curva abaixo dos pontos experimentais.

Os parâmetros utilizados pelos diversos pesquisadores se encontram na Tabela 07.

Tabela 07. Valores de parâmetros para equação modificada de HENDERSON de umidade de equilíbrio.

Autor	ma (10 <sup>-3</sup> )	mb	mc
RAO & PFOST (1980)	0,143	146,5	1,72
MUIR & SINHA (1986)	0,577	46,8	1,43
SOKHANSANJ et al (1986)	0,506	40,12	1,57

GHALY & SUTHERLAND, (1984); PIXTON & HENDERSON, (1981); PATIL & WARD (1989); CORREA, MARTINS & CHRIST (1999) realizaram experimentos acima de 45°C. Na Tabela 08, pode-se verificar alguns parâmetros da equação de CHUNG de umidade de equilíbrio.

Tabela 08. Valores de parâmetros para equação de CHUNG de umidade de equilíbrio.

Autor	ea	eb	ec
RAO & PFOST (1980)	694,2	28,23	116,14
SOKHANSANJ et al. (1986)	189	21,12	39,18

### 3.5.3. Perda de carga

LAWTON (1965) determinou graficamente a perda de pressão do fluxo de ar através de volume de colza e outras sementes. Utilizou vazão até 27 m/min em colunas de 15 e 30 cm de profundidade.

PATIL & WARD (1988) determinaram perda de carga em colza, variando umidade e vazão de ar, expressando através da equação de Shedd.

$$Q/S = a * (\Delta P_{st})^b \quad (21)$$

onde:

Q fluxo de ar (m<sup>3</sup>/s)

S área da secção (m<sup>2</sup>)

Pst pressão estática (Pa)

Os coeficientes estão apresentados na Tabela 09.

Tabela 09. Parâmetros para resistência ao fluxo de ar.

Umidade (%)	a	b
19,6	0,176	0,626
17,6	0,169	0,620
15,5	0,163	0,631
11,9	0,148	0,627
8,8	0,147	0,613
6,5	0,142	0,606

Fonte: PATIL & WARD, 1988.

MATTHIES & PETERSEN (1974) desenvolveram a seguinte equação, baseando-se na lei de Reynolds.

Este modelo é mais abrangente que o modelo de Shedd, estabelecendo parâmetros em função das dimensões do produto, forma e rugosidade para representar a perda de carga mais realista, durante a secagem.

$$\Delta P/H = C_1 * (\varepsilon)^{-4} * (w)^{(2-xn)} \quad (22)$$

onde:

- $\varepsilon$  porosidade (decimal)
- $C_1$  fator de correção de forma
- $xn$  constante dependente do produto

A potência do ventilador para fornecer a vazão é determinada pela equação (MAIER, 1992)

$$FP = \Delta P * Q * S / (\eta) \quad (23)$$

Onde:

- $FP$  potência (W)
- $\eta$  rendimento do sistema

### 3.5.4. Razão de secagem

A razão de secagem expressa a diferença entre a umidade de equilíbrio e umidade do produto sob condições do ar de secagem. (BROOKER, BAKKER-ARKEMA & HALL, 1992).

Colza é um material higroscópico poroso, portanto, seu perfil de secagem, se situa principalmente na região de secagem descendente (PATIL & WARD, 1989).

A equação geral de razão de secagem é representada pela equação 24.

$$\frac{dU}{dt} = -k(U(t) - U_{eq}) \quad (24)$$

ou

$$\frac{(U(t) - U_{eq})}{(U_0 - U_{eq})} = a * e^{(-bt)} \quad (25)$$

onde:

a, b constantes do produto.

SOKHANSANJ et al. (1986) realizaram a determinação dos coeficientes da equação de razão de secagem para colza, e os coeficientes encontrados foram:

$$a = -0,183$$

$$b = 0,572$$

GHALY & SUTHERLAND (1984) utilizaram secador de leito fluidizado e recomendaram parâmetros mais complexos, em função de temperatura, umidade e fluxo do ar.

KREYGER (1972) forneceu dados relativos de razão de secagem comparando-se diversos grãos, concluiu que a razão de secagem de canola é dez vezes maior que trigo.

O valor de razão de secagem de 0,05%wb/(°C\*h) foi encontrado para colza a 6,5% e trigo a 15% de umidade (Tabela 10).

Tabela 10. Razão de secagem para colza e outros produtos.

Tipo de sementes	Teor de água relacionado a uma razão de secagem de 0,05 %/°C.h (0,028 %/°F.h)	
	% (bs)	% (bu)
feijão-fava	22,0	18,0
ervilha	19,5	16,5
milho	18,5	15,5
tremoço	17,5	15,0
trigo	15,0	13,0
centeio	15,0	13,0
aveia	13,5	12,0
azevém	11,0	10,0
beterraba	11,0	10,0
colza	7,0	6,5

Nota: Válido para temperatura do ar de 25°C - 35°C e velocidade do ar de 0,4 m/s, camada superficial (aproximadamente 1 cm) (78°F - 95°F - 0,41 m/s - 3/8").

Fonte: KREYGER, 1972.

Esta relação ocorre apenas entre 25 e 35°C, com vazão alta de ar em camada delgada. Se considerar apenas massa livre de óleo, 6,5% do total equivale a 15% de umidade, próximo do trigo. A diferença pode ser devido ao tamanho da partícula.

PATIL & WARD (1989) mediram razão de secagem em colza reumidificada com umidade inicial de 20, 15 e 12%, usando ar a temperatura de 50, 60 e 70°C, e velocidade de ar de 0,21, 0,33 e 0,53 m/s.

GHALY & SUTHERLAND (82) utilizaram temperatura a 40°C-70°C. Sementes de colza a 12, 14 e 16% de umidade durante 8h. Chegaram a uma equação derivada da Equação de Page, porém, verificou-se que os valores de k variaram muito para cada intervalo de tempo de secagem.

### 3.5.5. Função FAKTOR

MAIER (1992), utilizando modelo de simulação de MOREY et al (1978), incluiu uma variável FAKTOR que depende da espécie que substitui a equação de razão de secagem, nas rotinas de equilíbrio.

Sabendo-se que:

$$FAKTOR = 1,0 + AHFG * e^{(-BHFG(M_i - M_f))} \quad (26)$$

e

$$HB = (H_f - H_i)(h_{fg} (FAKTOR - 1)) \quad (27)$$

onde

AHFG e BHFG	parâmetros do produto
H	umidade absoluta do ar (kg/kg)
HB	variável na Rotina Bilanz
U	umidade do produto (%)
$h_{fg}$	calor latente de evaporação da água (J/kg)

HB é uma variável inserida na determinação da temperatura de saída do ar, na frente de secagem, na rotina *Bilanz*, conforme seção 4.4.2.2.

## **4. MATERIAL E MÉTODOS.**

### **4.1. Material utilizado**

4.1. Sementes de canola, variedade Cyclone, safras de inverno de 1993, que foram colhidas no distrito de Owosso, MI, USA, com umidade inicial de 23%, e germinação inicial de 94%.

4.2. Envelopes “pouch”, fornecidos pela J. Reynolds, em Richmond, Virgínia, compostas de três camadas: de 0,0122 mm de poliéster, laminado com 0,0089 mm de alumínio e laminado com 0,0762 mm polipropileno modificado, conforme RUKSPOLLAMUANG (1983).

4.3. Foi utilizada uma seladora manual a vácuo, do Departamento de Embalagens da MSU.

4.4. “Banho-maria” de temperatura controlada, capacidade de 50 l, calibrado para 50, 60 e 70°C.

4.5. Germinador com regulagem de temperatura e umidade, equipamento da Michigan Seed Foundation, em East Lansing, MI, EUA. Acessórios para teste de germinação: papel Germitest, bandejas, pinças.

4.6. Secador estacionário. Capacidade de 150 kg de sementes, vazão de ar até 1,0 m<sup>3</sup>/s, aquecimento com resistência elétrica para aquecer até 75°C.

4.7. Sistema de aquisição de dados data logger Campbell CR10, para registro de temperatura durante acondicionamento hermético e secagem.

4.8. Sonda para coletar amostras de sementes do secador.

4.9. Anemômetro, termômetros, termopares, higrotermógrafo, higrômetro

4.10. Cronômetro.

## 4.2. Métodos

### 4.2.1. Características da Matéria-Prima

As sementes de canola, colhidas com umidade inicial de 23% foram submetidas à secagem natural, em bandejas, até 12% de umidade, em condições ambientais (25°C e 65% de umidade relativa), coletando-se amostras e separando lotes com faixas de umidade desejadas, conforme Tabela 11. Sementes de canola a umidade abaixo de 12% foram obtidas em estufa a 30°C, por períodos de tempo máximo de 4 h.

O tempo de secagem natural foi controlado através da perda de peso.

Foram determinados o índice germinação, umidade, dimensões e peso específico aparente das sementes.

Tabela 11. Secagem natural de matéria prima.

temperatura	faixas de umidade (%)				
50	6 a 9	9 a 12	12 a 15	15 a 18	18 a 22
60	6 a 9	9 a 12	12 a 15	15 a 18	18 a 22
70	6 a 9	9 a 12	12 a 15	15 a 18	18 a 22

### 4.2.2. Acondicionamento hermético – Testes preliminares

Foram realizados alguns experimentos preliminares de determinação de germinação, em testes de acondicionamento a diversas condições, conforme Tabelas 12, 13 e 14.

Alguns dados preliminares foram colhidos para definir as faixas de umidade, temperatura e tempo de acondicionamento hermético, e determinar, posteriormente, o modelo a ser inserido na simulação de secagem e validar através de experimento de secagem.

Considerando-se uma regressão linear, como resultado da representação dos pontos experimentais, ilustrados na Figura 02 e se os pontos experimentais não forem cuidadosamente selecionados, algumas determinações podem não ser adequadas.

Os envelopes de alumínio foram preenchidos com cerca de 50 g de sementes de canola a diversos níveis de umidade (6 a 22%) e foram selados hermeticamente a vácuo.

As amostras acondicionadas em embalagens herméticas permaneceram imersas em banho-maria, a três diferentes temperaturas (50, 60 e 70°C), por diversos períodos de tempo, de 0,5 min a 8 horas, conforme Tabelas 12, 13 e 14.

A seguir, retirou-se a semente da embalagem e foi determinada a germinação, para cada condição de experimento (Temperatura e Umidade das sementes de canola).

Tabela 12. Tempo de acondicionamento preliminar em banho-maria, a 50°C de embalagens de alumínio contendo sementes de canola.

Faixas de umidade (%)	Tempo (10 <sup>2</sup> s)					
6 a 9	108	144	180	216	252	288
9 a 12	36	72	108	144	216	288
12 a 15	36	72	108	144	216	288
15 a 18	36	54	72	90	108	126
18 a 22	18	36	54	72	108	144

Tabela 13. Tempo de acondicionamento preliminar em banho-maria, a 60°C de embalagens de alumínio contendo sementes de canola.

Faixas de umidade (%)	Tempo (10 <sup>2</sup> s)					
6 a 9	18	18	9	9	9	18
9 a 12	36	36	18	18	18	36
12 a 15	54	54	27	27	27	54
15 a 18	72	72	36	36	36	72
18 a 22	108	108	54	45	45	108

Tabela 14. Tempo de acondicionamento preliminar em banho-maria, a 70°C de embalagens de alumínio contendo sementes de canola.

Faixas de umidade (%)	Tempo (10 <sup>2</sup> s)					
6 a 9	3,0	3,0	3,0	0,3	0,3	3,0
9 a 12	6,0	6,0	6,0	0,6	0,6	6,0
12 a 15	9,0	9,0	12,0	1,2	1,2	9,0
15 a 18	12,0	12,0	18,0	2,4	1,8	12,0
18 a 22	18,0	18,0	24,0	3,0	2,4	18,0

#### 4.2.3. Determinação de temperatura real da semente

Durante os testes preliminares, verificou-se que os grãos no interior das embalagens de alumínio não atingiam a temperatura do banho-maria imediatamente. As embalagens de alumínio são barreiras naturais para transferência de calor, da água do banho a temperatura constante. Portanto, as sementes de canola atingiram a temperatura do banho após algum tempo (“time lag”) para vencer a resistência de transferência de calor causada pela embalagem.

Para verificar o perfil de temperatura no interior das embalagens com sementes submetidas a diversos tratamentos, foram acoplados termopares no interior, juntamente com os grãos como pode-se verificar nas Figuras 06 e 07.

Foram utilizadas sementes de canola a 17,5% de umidade, para este experimento.

Os sensores de temperatura foram fixados à distância de uma camada de grãos da parede da embalagem, e a temperatura foi registrada a cada 30 s, a partir do momento que as embalagens foram imersas na água.

O perfil de temperatura foi utilizado para fornecer uma equação empírica para a temperatura real da semente em função do tempo de imersão.

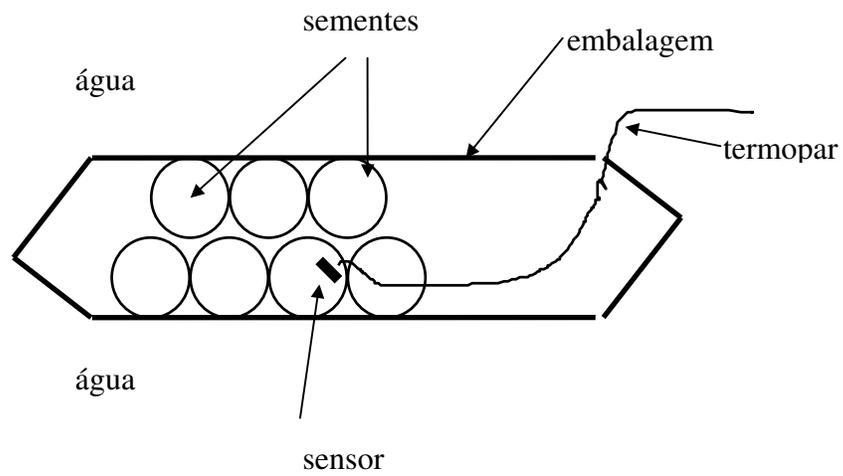


Figura 06. Disposição de sementes no interior de pouche.

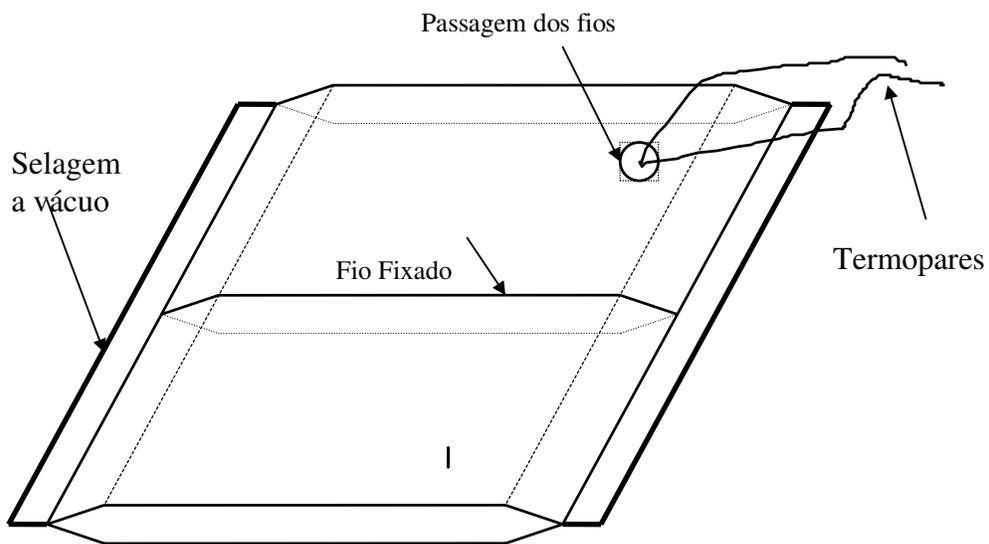


Figura 07. Detalhes do pouche e termopares.

### 4.3. Testes definitivos de acondicionamento hermético

A partir dos resultados obtidos nos testes da seção 4.2.2, definiu-se o teste definitivo.

#### 4.3.1. Acondicionamento hermético.

Os testes definitivos seguiram a metodologia descrita em 4.2.2. Os envelopes de alumínio foram preenchidos com cerca de 50 g de sementes de canola a diversos níveis de umidade (6 a 20%), e foram selados hermeticamente a vácuo.

As amostras acondicionadas em embalagens herméticas permaneceram imersas em banho-maria, a três diferentes temperaturas (50, 60 e 70°C), por diversos períodos de tempo, de 1 min a 8 horas, conforme Tabelas 15, 16 e 17. A seguir, foi determinada a germinação para cada condição de acondicionamento (T e U).

Estes dados foram utilizados para determinação de  $\sigma$  (SIGMA). Para cada temperatura e umidade de acondicionamento, determinou-se  $\sigma$  através de regressão linear, utilizando-se a equação 06.

Dependendo dos experimentos realizados, foram utilizados 3 ou 4 pontos para cada condição.

Tabela 15. Tempo de acondicionamento hermético a 50°C

Umidade (%)	Tempo de acondicionamento (10 <sup>2</sup> s)			
7,7	144	180	216	252
12,5	108	144	216	288
13,80	108	144	216	288
15,4	72	90	108	126
17,5	18	36	54	72
20,0	36	54	72	

Tabela 16. Tempo de acondicionamento hermético a 60°C

Umidade (%)	Tempo de acondicionamento (10 <sup>2</sup> s)			
12,5	54	72	108	144
13,8	36	54	72	108
15,4	27	36	45	
17,5	27	36	45	54

Tabela 17. Tempo de acondicionamento hermético a 70°C

Umidade (%)	Tempo de acondicionamento (10 <sup>2</sup> s)				
7,7	6,0	9,0	12,0	18,0	24,0
12,5	3,0	6,0	9,0	12,0	
13,8	3,0	6,0	12,0	18,0	
15,4	1,2	2,4	3,0	6,0	
17,5	0,6	1,2	2,4		

#### 4.3.2. Determinação experimental de SIGMA

Após a determinação de germinação de amostras acondicionadas hermeticamente em banho-maria, utiliza-se a função erro complementar, como na equação 05.

Aplicando-se regressão linear determina-se  $\sigma$ , através da equação 06.

#### 4.3.3. Determinação dos parâmetros da função SIGMA

Cada condição de acondicionamento (temperatura e umidade) resulta em um valor de SIGMA que irá definir os parâmetros da equação 07, através de regressão multivariada.

Esta equação, com os parâmetros definidos, será incluída no modelo matemático de simulação de secagem.

### 4.4. Simulação e experimento de secagem

#### 4.4.1. Simulação

O programa principal, previsto inicialmente para armazenamento com aeração refrigerada, foi adaptado para simular secagem a altas temperaturas. Para isso foi necessário explorar ao máximo o tempo de execução das rotinas, através de computadores do Cenapad, Centro de Computação da UNICAMP. As equações de umidade de equilíbrio foram modificadas, pois o refinamento do tempo de computação não permitiu equações simples de umidade de equilíbrio.

A rotina de qualidade de semente foi inserido em rotinas adaptadas para comportar novas variáveis, além de subrotinas de função erro complementar e inverso da mesma função, para retornar a variável X, conforme a equação 06.

Utilizando-se programa já existente modificado por Maier (1992) adaptando-se conforme fluxograma da Figura 08, introduziu-se a rotina Dres, que avalia a qualidade da semente, e apresenta como resultado, a germinação final após o processo de secagem de sementes.

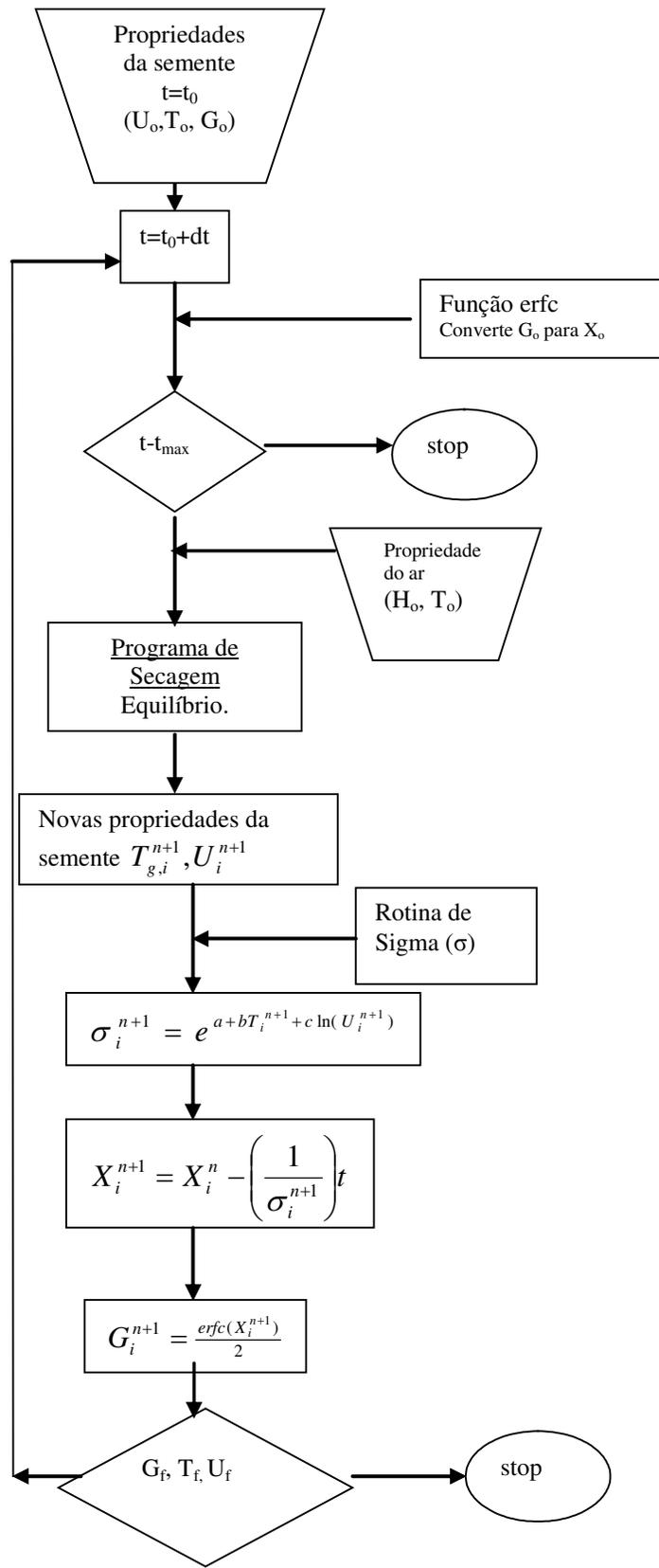


Figura 08. Etapas da rotina de avaliação de germinação.

## **4.4.2. Particularidades do modelo utilizado**

### **4.4.2.1. Modelo de simulação.**

O programa aplicado baseia-se no programa modificado por MAIER (1992), utilizando o princípio de equilíbrio, desenvolvido por MOREY et al. (1978).

Procura-se associar diversas camadas delgadas formando um leito fixo, onde a frente de secagem percorre toda massa de grãos no sentido do escoamento do ar de secagem.

Um dos modelos de secagem em leito fixo que tem apresentado resultados aplicados a vários produtos é o modelo semiteórico de THOMPSON (1967), baseado no balanço de umidade, levando em consideração a razão mássica entre grão e ar.

A estratégia de simulação consiste em dividir o processo contínuo de secagem em vários sub-processos, mediante cálculos consecutivos das trocas que ocorrem durante incrementos de tempo diferenciais.

O modelo de Thompson, inicialmente recomendado para secagem a temperaturas próximas ao ambiente (BROOKER, BAKKER-ARKEMA & HALL, 1992 e MOREY et al., 1978), funcionou bem para secagem a altas temperaturas para diversos produtos: feijão (CAVALCANTI, 1997), café (TASCON, 1984) e arroz (CANEPPELE, 1993).

As equações de balanço de massa e energia são consideradas em um volume diferencial.

As equações consideram umidade e temperatura do ar de secagem e do produto que está sofrendo secagem. Tratando-se secagem em leito estacionário, haverá duas variáveis a serem consideradas, no sistema cilíndrico. Supondo-se as paredes adiabáticas, a transferência de calor e massa se processará num só sentido, envolvendo apenas uma direção,  $x$ .

### **4.4.2.2. Programa utilizado**

O programa de simulação de secagem utilizado AERATE consta de três blocos essenciais: Entrada de dados, rotinas de balanço de energia e massa e rotina de qualidade.

a. Entrada de Dados

Os dados compreendem três partes:

a.1. Arquivo geral de dados.

Contém condições iniciais do produto, tais como peso específico aparente, umidade, e temperatura.

a.2. Condições do ar:

Pressão atmosférica, tipo de processo, potência do ventilador e nomes de arquivos ambiental (temperatura e umidade relativa).

a.3. Outros dados do equipamento, consistindo de:

Dimensões do secador

Potência do aquecedor, umidade inicial.

Condições finais do produto

Parâmetros da equação de perda de carga

Parâmetros da equação de umidade de equilíbrio

Parâmetros da equação de FAKTOR

Parâmetros térmicos

Parâmetros das equações de Condutividade térmica, Calor específico e calor latente.

b. Balanço de energia e massa

As principais equações presentes nos programas de secagem se encontram na seção 3.4.1, porém, no presente trabalho, o modelo utilizado é de equilíbrio de MOREY et al., (1978). O corpo principal do programa de simulação constitui-se de diversas rotinas, conforme a descrição a seguir:

b.1. Rotina *Tagesbel*

Define as condições iniciais do ar ambiente e entrada da frente de secagem.

Calcula a pressão de vapor de ar sob diversas condições de entrada no programa.

Condições ambientais

Pressão de vapor

Umidade absoluta

Frações de vapor e ar seco

Calculo de calor específico do ar.

Definindo fluxo de ar:  $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$

## b.2. Rotinas de equilíbrio de massa e energia

### b.2.1. Rotina *Verfahren*:

Realiza o balanço da entrada de ar do volume de controle e fornece novas condições devido ao aquecimento do ar.

Efetua troca de massa e energia após estabelecimento das novas condições do ar de secagem.

Pressão de vapor

Umidade absoluta

Frações de vapor e ar seco

Calculo de calor específico do ar.

Definindo fluxo de ar:  $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$

Fração de ar seco

Condições do grão

b.2.2. Rotina *Gleich* onde se realizam os principais balanços, para determinação da razão ar/semente de massa seca e umidade, baseado no balanço de Thompson (1967)

Considera calor específico do ar, velocidade do ar, fator limitante para a taxa de secagem.

b.2.3. Rotina *Bilanz* Balanço da saída de ar do volume de controle

Estabelece o balanço através de unidades FAKTOR, a partir de dados experimentais.

### c. Condições de qualidade da semente. Subrotina *Dres*.

Antes da secagem, no volume de controle, próximo ao plenum ( $x=0$ ), as condições iniciais são:  $T_0$ ,  $U_0$  e  $G_0$  (Figura 08). A germinação inicial pode ser convertida na variável  $X_0$  pela equação 05.

Ao ligar o secador, o ar cede calor ao grão e a cada incremento de tempo, as novas condições da semente serão  $T(t+dt)$ ,  $U(t+dt)$  e  $G(t+dt)$ , de acordo com o fluxograma da Figura 08.

Ao fim da secagem, a germinação final será decorrente da injúria térmica que decresce do valor inicial de germinação inicial.

No Apêndice 06, encontra-se a rotina *Dres*.

Na rotina *Gleich*, determina-se as condições do ar que entra em contato com o grão no volume de controle da frente de secagem, de acordo com o fluxograma da Figura 08.

Conhecendo-se a temperatura e umidade da semente, aplica-se a equação 07, estabelecendo-se o valor de SIGMA. Aplicando-se a rotina de erfc (PRESS et al., 1992), encontra-se o valor de germinação, nas condições daquele instante. A seguir, aplica-se a equação 06, e o inverso da função erfc, obtém-se o novo valor de SIGMA, para  $t=t+dt$ .

#### 4.4.3 Modificações no programa.

Conforme pode ser verificado nas descrições no item 4.4.2. as rotinas *Verfharen*, *Gleich* e *Bilanz* atuam para estabelecer o balanço de massa e energia entre ar e semente.

Este programa tem como base o modelo de equilíbrio de THOMPSON (1967), modificado por MOREY et al. (1978) inserindo-se uma função FAKTOR, substituindo a equação 13. A função FAKTOR tem o objetivo de apresentar resultado de simulação compatível com os testes experimentais, mesmo a temperaturas maiores do que as temperaturas utilizadas em processo de secagem a temperaturas próximas às ambientais, problema normalmente encontrado em simulação através do modelo de THOMPSON (1967).

#### 4.4.4. Parâmetros da espécie canola

Os seguintes parâmetros e equações foram utilizados para simulação de secagem de canola:

##### 4.4.4.1. Umidade de equilíbrio

Foi utilizada a equação de CHUNG (Equação 20), através dos seguintes coeficientes apresentados na Tabela 18:

Tabela 18. Parâmetros de equação de umidade de equilíbrio.

	T<40 (°C)	T>40 (°C)
ea	694,20	701,3
eb	28,23	52,8
ec	116,14	19,7

Abaixo de 40°C, foram utilizados parâmetros definidos para 25 C, de acordo com SOKHANSANJ et al. (1986).

Como os parâmetros não representam adequadamente os experimentos realizados por PATIL & WARD (1988) e MOYSEY, SHAW & LAMPMAN (1977) e foi realizada regressão para escolha de parâmetros acima de 40°C.

#### **4.4.4.2. Resistência ao fluxo de ar**

Foi utilizado o modelo de MATTHIES & PETERSEN (1974), com os coeficientes para colza.

$$\lambda = 0,40$$

$$C1 = 249,0$$

$$x_n = 0,86$$

#### **4.4.4.3 Peso específico aparente**

Seguindo metodologia ASAE (2000):

$$\rho_p = 669 \text{ kg/m}^3$$

#### **4.4.4.4 Calor específico**

De acordo com MUIR & SINHA (1986):

$$c_p = 1,29 + 0,033 * U / (1 + U) + 0,00024 * T \quad (28)$$

#### **4.4.4.5. Equação de calor latente**

$$h_{fg} = 2502,0 - 2,39 * T \quad (29)$$

MONTROSS et al (1997) e MONTROSS & MAIER (2000) usaram simulação computacional, para secagem de grãos em diversas condições, utilizando o programa de secagem do presente trabalho, recomendado inicialmente, para armazenamento e aeração com aquecimento (MAIER, 1992).

No presente trabalho foi utilizado modelo combinado de balanço de massa e calor, portanto a equação principal na simulação é a equação de umidade de equilíbrio sem a necessidade da equação de secagem em camada delgada (MAIER, 1992).

#### 4.4.5. Secagem experimental para validação dos coeficientes de SIGMA

Cerca de 150 kg de sementes de canola foram secadas em secador estacionário, utilizando-se um tambor metálico com dimensões 0,6 m de diâmetro e 1,0 m de altura, conforme Figura 09. A entrada de ar se processou através de um “plenum” com chapa perfurada no fundo do tambor. O ar foi insuflado através de um ventilador centrífugo de 1 CV. O aquecimento do ar foi realizado por resistências elétricas, que são reguladas de acordo com a temperatura desejada. Foram medidas e registradas as temperaturas dos grãos em intervalos de 30 segundos, a cada 20 cm de profundidade de grãos. Foram realizadas medidas de fluxo de ar, pressão estática e umidade do ar de saída. Foram retiradas amostras de grãos, a cada 0,5 h, para determinação de umidade e germinação, nas posições do registro de temperatura (cada 20 cm de profundidade). A velocidade de ar foi ao redor de 0,5 m/s e a perda de pressão variou de 2 a 4 cm de coluna d’água.

Foram realizados testes de secagem a três temperaturas: 51, 61 e 67°C.

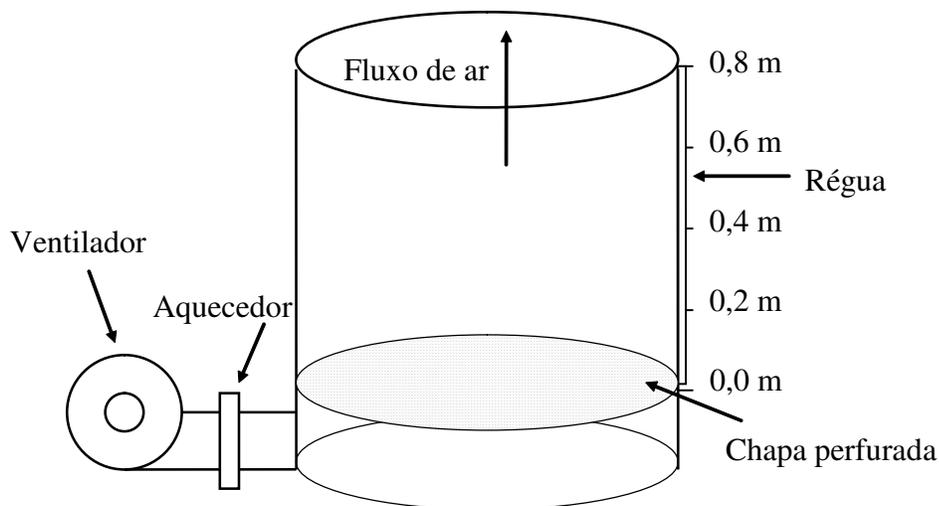


Figura 09. Secador intermitente.

## **4.5. Metodologia analítica**

### **4.5.1. Determinação de germinação:**

Tomaram-se três amostras de 100 sementes, distribuiu-se em papel Germitest conforme gabarito, conservou-se a temperatura de 22°C, por 10 dias, sendo a contagem inicial, após 4 dias e a contagem final, após 10 dias (AOSA, 1983).

### **4.5.2. Determinação de umidade:**

Foi utilizado método Standard 352.1 ASAE (1990), para determinação de umidade, pelo método de estufa (130°C, por 4 horas).

### **4.5.3. Determinação de dimensões**

Realizou-se a determinação do diâmetro das sementes utilizando-se de paquímetro digital, a 21% e 8% de umidade, com cinco repetições.

### **4.5.4. Determinação de peso específico aparente**

Alimentou-se um recipiente de volume conhecido (1,0 L) com sementes de canola. O excedente foi retirado e a massa de canola foi obtida através de uma balança tarada previamente, conforme método Standard ASAE (1990) 241.4.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1. Características da matéria-prima

#### 5.1.1. Germinação

Os dados de germinação inicial das amostras que sofreram secagem natural em condições ambientais (25°C e 65% de umidade relativa) encontram-se na Tabela 19.

Para obtenção de umidade abaixo de 10%, as sementes de canola foram mantidos em estufa a 30°C, por 1 a 2 h.

Tabela 19. Germinação inicial (3 repetições) de sementes de canola a diversas umidades.

Umidade (%)	Germinação (%)			Média (%)
	G1	G2	G3	
6,6	94	93	96	94
7,7	93	95	96	95
12,5	92	93	96	94
13,8	93	95	90	93
14,2	92	94	95	94
15,4	96	97	96	96
21,4	92	91	96	93
Média Geral				94

#### 5.1.2. Dimensões

O diâmetro da semente de canola foi determinado com 5 repetições como se verifica na Tabela 20.

Tabela 20 - Dimensões de sementes de canola com 8 e 21% de umidade.

Umidade (%)	Diâmetro (mm)	Média (mm)	Desvio Padrão (mm)
21	2,02	2,01	0,03
	1,97		
	2,04		
	2,04		
	1,99		
8	1,98	1,99	0,018
	2,01		
	1,99		
	1,97		
	2,01		

### 5.1.3. Peso específico aparente

O peso específico da canola apresentou os seguintes resultados, em duas condições de umidade, como se encontra na Tabela 21.

Tabela 21 - Peso específico de sementes de canola a 8 e 21% de umidade.

Umidade (%)	P. Espec (kg/m <sup>3</sup> )	Média (kg/m <sup>3</sup> )	Desvio Padrão (kg/m <sup>3</sup> )
21	686,4	670,7	11,4
	678,3		
	667,8		
	661,1		
	660,0		
8	688,0	686,1	3,2
	690,7		
	683,4		
	684,2		
	684,0		

A determinação de germinação inicial da Tabela 19 mostra que a secagem das sementes de canola em condições ambientais não influenciou no índice de germinação, nas

amostras com diversas umidades. O tempo para atingir a umidade desejada ocorreu em intervalos de tempo variando entre 2 e 4 horas e não influenciou na queda de germinação.

As dimensões e peso específico aparente de canola *B. napus*, cv. Cyclone apresentaram valores compatíveis com diversas outras variedades pesquisadas por JAYAS, SOKHANSANJ & WHITE (1989), SOKHANSANJ et al. (1986), e PATIL & WARD (1988).

## 5.2. Acondicionamento hermético – Testes preliminares

### 5.2.1. Germinação inicial

Para cada temperatura, foram realizados testes de germinação para definir as faixas de tempo de acondicionamento definitivas, para cada faixa de umidade (Tabelas 22, 23 e 24).

Tabela 22. Germinação de teste preliminar de acondicionamento a 50°C.

Umidade (%)						
7,7	Tempo (10 <sup>2</sup> s)	144	180	216	252	
	Germinação (%)	93	68	53	12	
12,5	Tempo (10 <sup>2</sup> s)	108	144	216	288	
	Germinação (%)	90	87	35	21	
13,8	Tempo (10 <sup>2</sup> s)	108	144	216	288	
	Germinação (%)	87	67	32	14	
15,4	Tempo (10 <sup>2</sup> s)	72	90	108	126	
	Germinação (%)	82	86	61	21	
17,5	Tempo (10 <sup>2</sup> s)	18	36	54	72	108
	Germinação (%)	90	81	60	59	28
20,0	Tempo (10 <sup>2</sup> s)	36	54	72		
	Germinação (%)	81	61	12		

Tabela 23. Germinação de teste preliminar de acondicionamento a 60°C.

Umidade % bu					
12,5	Tempo (10 <sup>2</sup> s)	54	72	108	144
	Germinação (%)	92	81	80	38
13,8	Tempo (10 <sup>2</sup> s)	36	54	72	108
	Germinação (%)	90	87	49	42
15,4	Tempo (10 <sup>2</sup> s)	27	36	45	
	Germinação (%)	72	55	40	
17,5	Tempo (10 <sup>2</sup> s)	27	36	45	54
	Germinação (%)	90	67	43	18

Tabela 24. Germinação de teste preliminar de acondicionamento a 70°C.

Umidade % bu						
7,7	Tempo (10 <sup>2</sup> s)	6,0	9,0	12,0	18,0	24,0
	Germinação (%)	75	64	43	31	12
12,5	Tempo (10 <sup>2</sup> s)	3,0	6,0	9,0	12,0	
	Germinação (%)	54	12	0	0	
13,8	Tempo (10 <sup>2</sup> s)	3,0	6,0	12,0	18,0	
	Germinação (%)	63	23	36	0	
15,4	Tempo (10 <sup>2</sup> s)	1,2	2,4	3,0	6,0	
	Germinação (%)	70	41	15	0	
17,5	Tempo (10 <sup>2</sup> s)	0,6	1,2	2,4		
	Germinação (%)	76	8	14		

Os ensaios preliminares foram de extrema importância, pois definiram as faixas ideais de tempo de acondicionamento hermético, em cada condição de temperatura e umidade, para serem aplicadas a cada condição de temperatura (50, 60 e 70°C) nas faixas de umidade trabalhadas. O tempo máximo de acondicionamento nos testes definitivos não deve resultar em germinação nula, pois não se pode determinar qual o tempo exato de imersão no banho para fornecer este valor.

### 5.2.2. Determinação de temperatura real da semente

Durante o acondicionamento hermético em banho-maria, à temperaturas de 50, 60 e 70°C, foram registradas as temperaturas das sementes localizadas à distância de um grão das paredes, e os resultados são apresentados na Figura 10.

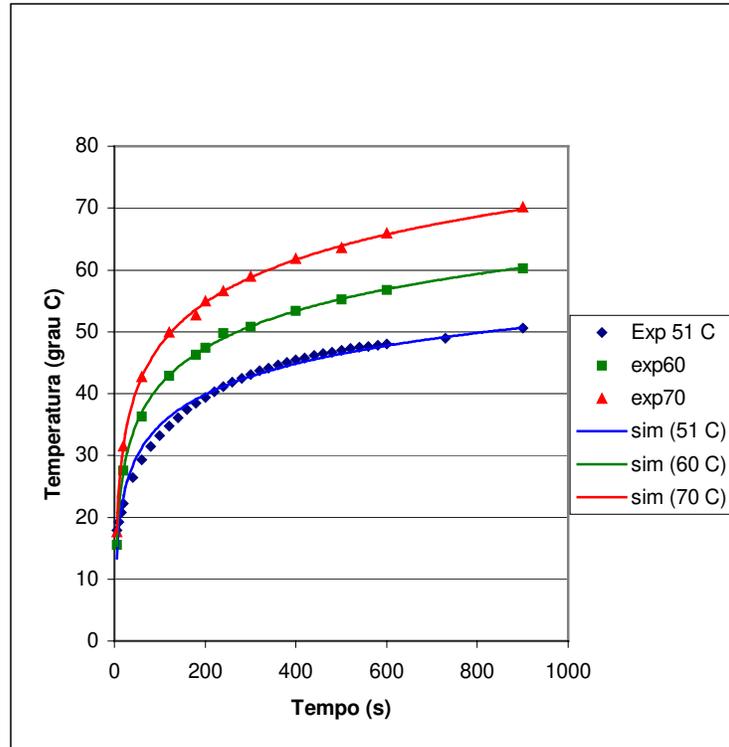


Figura 10. Perfil de temperatura da semente de canola, localizada dentro das embalagens herméticas.

Através de integração das curvas experimentais, foi determinado o modelo empírico das equações 30, 31 e 32 que representa o comportamento da temperatura no interior das embalagens “pouche”.

$$T_p = 7.1829 * \log(t) + 1.7954 \quad R^2=0.98 \quad (30)$$

$$T_p = 8.6453 * \log(t) + 1.5587 \quad R^2=0.99 \quad (31)$$

$$T_p = 10.108 * \log(t) + 1.322 \quad R^2=0.99 \quad (32)$$

A partir das equações acima, foi elaborada a Tabela 24, onde

Erro relativo=(tempo nominal-tempo real)/(tempo nominal)

Tabela 25. Tempo para a semente atingir a temperatura do banho.

TEMPERATURA DO BANHO (°C)	Tempo nominal (10 <sup>2</sup> s)	Tempo real (10 <sup>2</sup> s)	Erro relativo (dec)
50	6,0	4,1	0,3
50	9,0	7,0	0,2
60	3,0	1,9	0,4
60	6,0	4,2	0,3
60	9,0	7,1	0,2
70	0,3	0,1	0,7
70	0,6	0,3	0,5
70	1,2	0,7	0,4
70	1,8	1,1	0,4
70	2,4	1,6	0,3
70	3,0	2,1	0,3
70	6,0	4,1	0,3
70	9,0	7,3	0,2
70	12,0	10,3	0,1

A embalagem composta de alumínio e polipropileno é uma barreira para a semente atingir a temperatura do banho-maria, portanto, investigou-se a temperatura real das sementes de canola no interior das embalagens durante o acondicionamento.

Verificou-se que apenas a 70°C, o “time lag” interferiu significativamente no tempo real de acondicionamento, levando-se em consideração os intervalos de tempo considerados durante o tratamento. Enquanto que a 50 e 60°C, o tempo para atingir a temperatura do banho não influenciou significativamente no tempo total de acondicionamento.

Como pode ser verificado na Figura 10 e Tabela 25 o tempo total de acondicionamento foi muito maior que o tempo necessário para atingir a temperatura desejada.

Um exemplo ilustrativo seria o tratamento de 60°C durante 5 minutos, que apresentou erro relativo 0,4. Este erro relativo seria significativo se algum tratamento de acondicionamento hermético a 60°C fosse realizado durante 5 minutos, o que não aconteceu, como se verifica na Tabela 23, onde o tempo mínimo de acondicionamento foi de 45 minutos.

### 5.3. Acondicionamento hermético definitivo

A partir dos resultados dos testes preliminares, foram definidos os intervalos de tempo para determinação de germinação após acondicionamento hermético nos experimentos definitivos. Cada condição de temperatura e umidade compreende 3 a 4 testes de acondicionamento hermético em banho-maria, variando-se o tempo de permanência nas condições do banho, como se observa nas Tabelas 26, 27 e 28.

Tabela 26. Germinação após acondicionamento hermético a 50°C.

Umidade (%)	Tempo (10 <sup>2</sup> s)	Germinação (%)
6,6	144	62
7,7	162	29
7,7	252	25
12,5	126	73
12,5	162	57
12,5	216	48
13,8	108	82
13,8	126	86
13,8	144	52
13,8	252	21
15,4	72	87
15,4	126	70
15,4	162	59
16,0	36	94
16,0	72	94
16,0	108	89
16,0	126	76
17,5	72	90
17,5	90	78
17,5	126	73

Tabela 27. Germinação após acondicionamento hermético a 60°C.

Umidade (%)	Tempo (10 <sup>2</sup> s)	Germinação (%)
12,5	18	91
12,5	72	74
12,5	108	52
12,5	126	51
13,8	72	50
13,8	90	46
13,8	108	25
14,2	24	94
14,2	36	92
14,2	54	79
16,7	24	92
16,7	30	83
16,7	36	76

Tabela 28. Germinação após acondicionamento hermético a 70°C.

Umidade (%)	Tempo (10 <sup>2</sup> s)	Germinação (%)
6,6	6,0	67
6,6	9,0	75
7,7	24,0	54
13,8	3,0	90
13,8	6,0	57
13,8	9,0	19
13,8	36,0	9
14,2	3,0	87
14,2	6,0	80
14,2	12,0	48
14,2	18,0	19
17,5	0,6	90
17,5	1,8	48
17,5	2,4	34
17,5	3,0	37

#### 5.4. Determinação de SIGMA

Os valores de SIGMA foram determinados através de regressão linear, utilizando-se os dados das Tabelas 26, 27 e 28.

Os cálculos estão presentes no Apêndice 01, que resultou nos valores de SIGMA, como se verifica na Tabela 29, onde os valores de R<sup>2</sup> representam a correlação dos dados experimentais com a equação resultante da regressão linear.

Tabela 29. Valores de  $\sigma$  para cada condição de Temperatura e Umidade.

Temperatura (°C)	Umidade (%)	$\sigma$ (min)	R <sup>2</sup>
50	7,3	526,3	0,64
50	12,5	312,5	0,99
50	13,8	250,0	0,84
50	15,4	243,9	0,97
50	16,0	277,8	0,83
50	17,5	250,0	1,00
60	12,5	181,8	0,99
60	13,8	122,0	0,99
60	14,2	172,4	0,69
60	16,7	108,7	0,76
70	7,0	45,9	0,64
70	13,8	31,5	0,87
70	14,2	16,1	1,00
70	17,5	2,9	0,87

#### 5.4.1. Determinação dos parâmetros de SIGMA.

Os dados da Tabela 29 foram utilizados para determinação dos parâmetros da Equação 07, conforme Apêndice 02, resultando na equação 33. No Apêndice 02 encontram-se os cálculos da regressão múltipla para determinação dos parâmetros da Equação 07, resultando na Equação 33. A análise de variância fornece resultados de alta correlação (R<sup>2</sup> de 0,9), com nível de significância de 95%.

$$\sigma = e^{13,55-0,12*T-0,72*\ln(M)} \quad (33)$$

#### 5.4.2. SIGMA Experimental e Estimado

Utilizando-se a equação 33 e os dados da Tabela 29, pode-se analisar o nível de erro do modelo de SIGMA. No Apêndice 03, realizou-se a análise de erros de pontos experimentais e estimados pela equação 33, como se verifica na Figura 11.

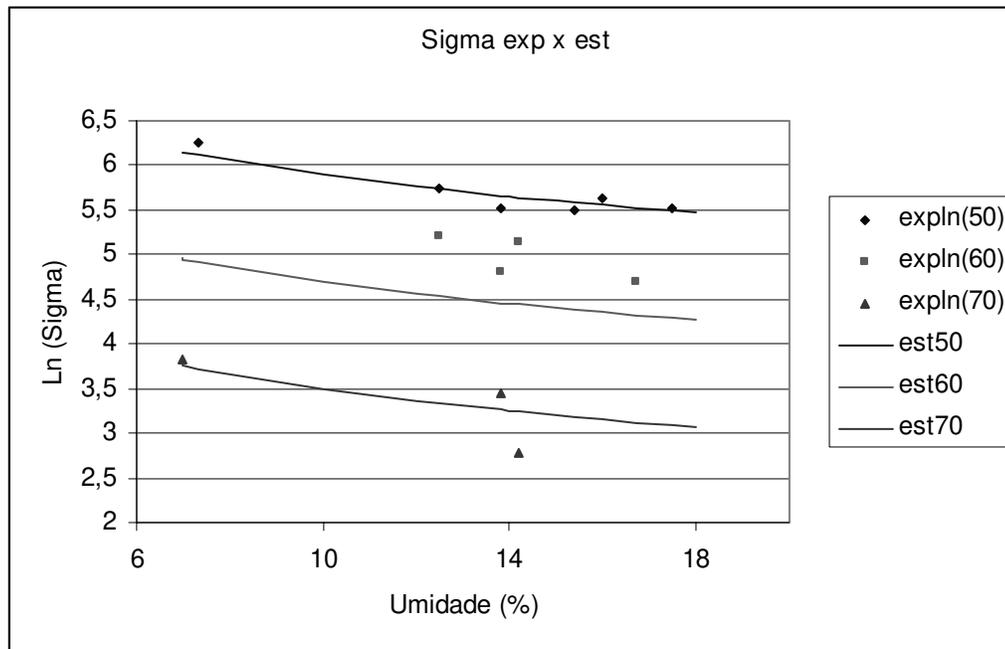


Figura 11. SIGMA experimental e estimado, de acordo com Equação 33.

Pela análise de erros relativos no Apêndice 03, pode-se verificar que o acondicionamento a 60°C, resultou em maior desvio da equação 33 com relação aos pontos experimentais, porém, para 50 e 70°C, houve boa concordância com os dados experimentais de SIGMA.

O erro relativo é definido com sendo:

$$\text{Erro}(T) = (\text{expln}(T) - \text{estln}(T)) / \text{expln}(T) \quad (34)$$

## **5.5. Secagem experimental e simulação**

### **5.5.1. Simulação**

Utilizando-se o programa de secagem contendo a rotina de qualidade Dres, através da equação 33, para cada passo de iteração da simulação, estabelecendo-se  $dt=1,0$  s, obtém-se as curvas de temperatura, umidade e germinação das sementes de canola durante a secagem a temperatura de 51, 61 e 67°C.

Foram consideradas 4 camadas de produto para representar o processo de secagem em secador estacionário.

De acordo com a legenda, C1 indica camada superior e outras camadas distanciadas a 0,20 m de profundidade cada.

Ou seja:

C1: camada superior;

C2: camada 0,20 m profundidade;

C3: camada 0,40 m profundidade;

C4: camada inferior;

exp: experimental;

est: estimado.

Através da análise dos dados de CENKOWSKI et al. (1990), LANG et al.(1993) e LANG et al.(1994), foram utilizados os valores para  $AHFG = 40,0$  e  $BHFG = 1,0$ .

### **5.5.2. Secagem experimental**

Os dados de secagem experimental, para comparar com os dados estimados pela simulação incluindo-se a rotina sobre qualidade das sementes representadas pela germinação estão representados nas Figuras 12 a 20.

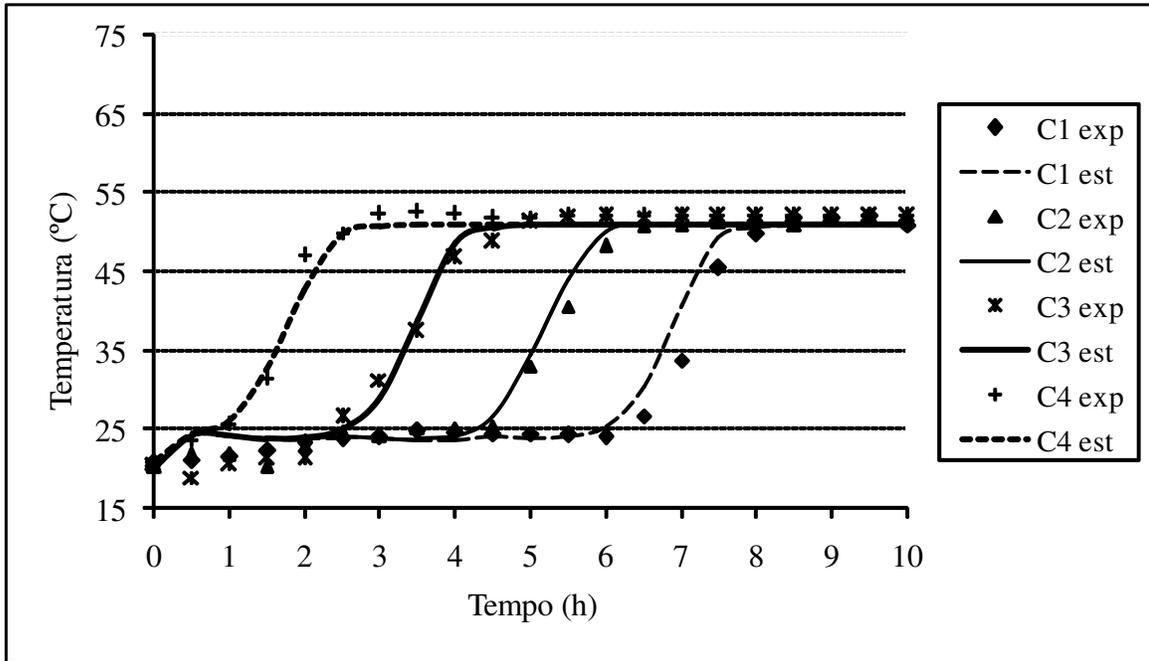


Figura 12. Curvas de temperatura da semente de canola durante secagem a 51°C

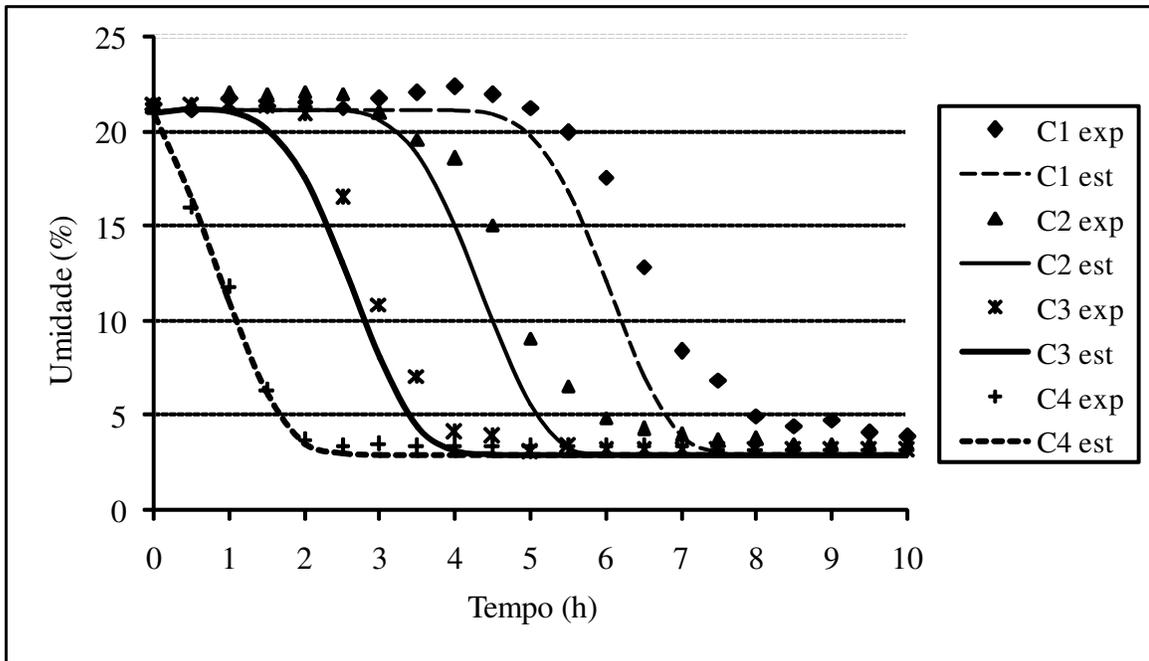


Figura 13. Curvas de umidade da semente de canola durante secagem a 51°C

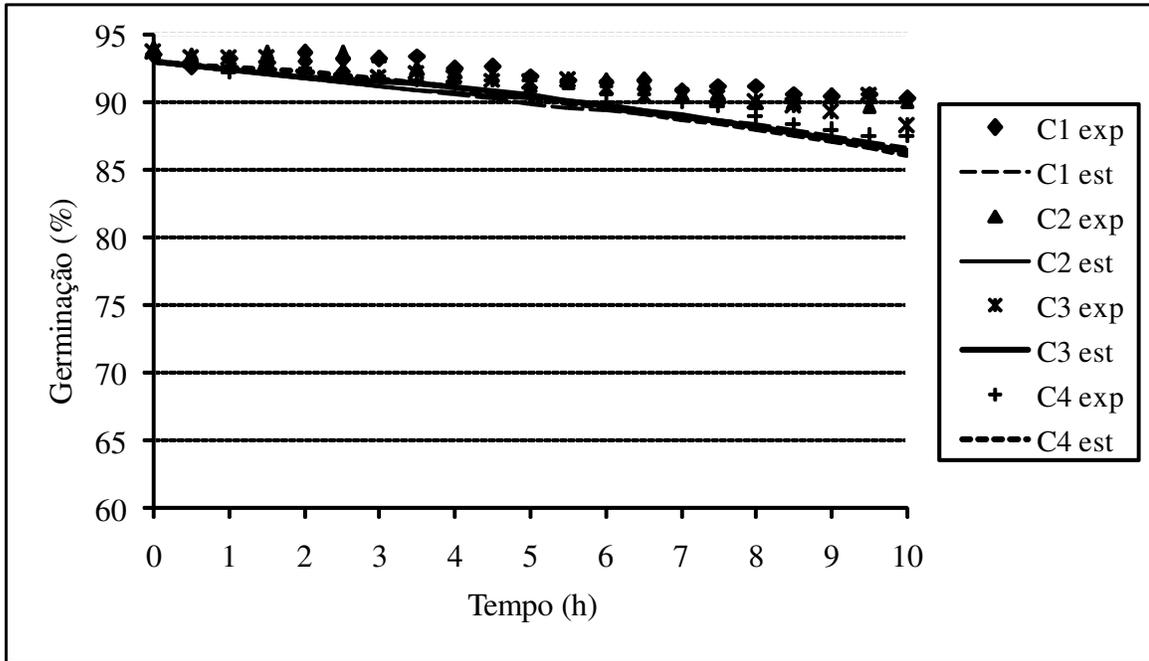


Figura 14. Curvas de germinação da semente de canola durante secagem a 51°C

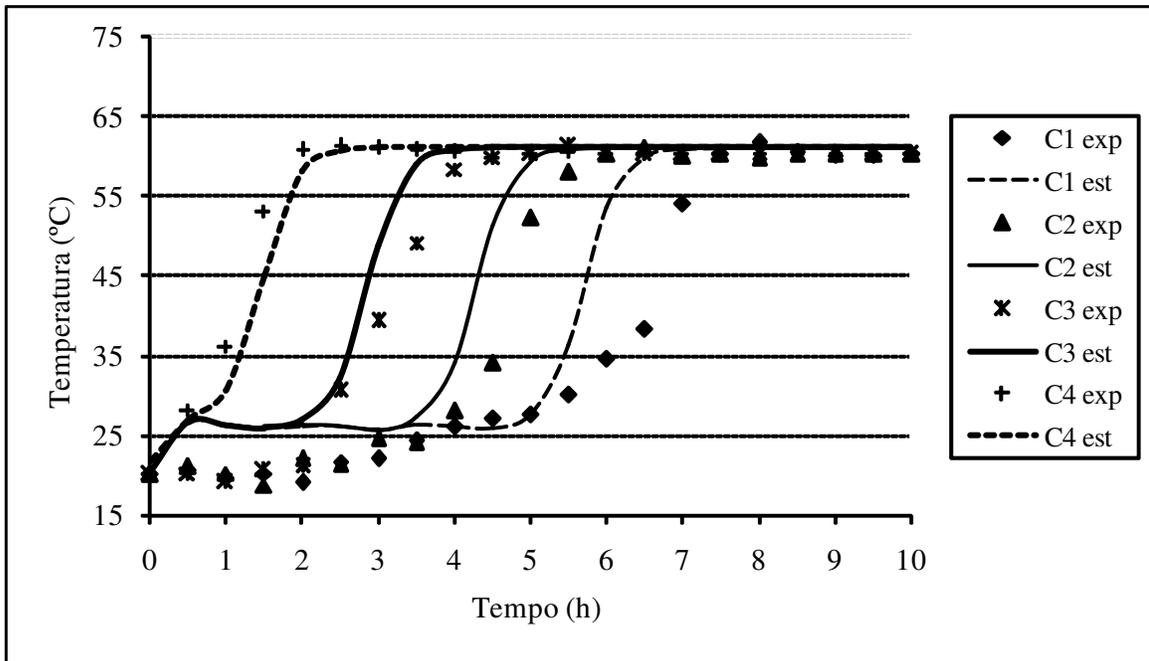


Figura 15. Curvas de temperatura da semente de canola durante secagem a 61°C

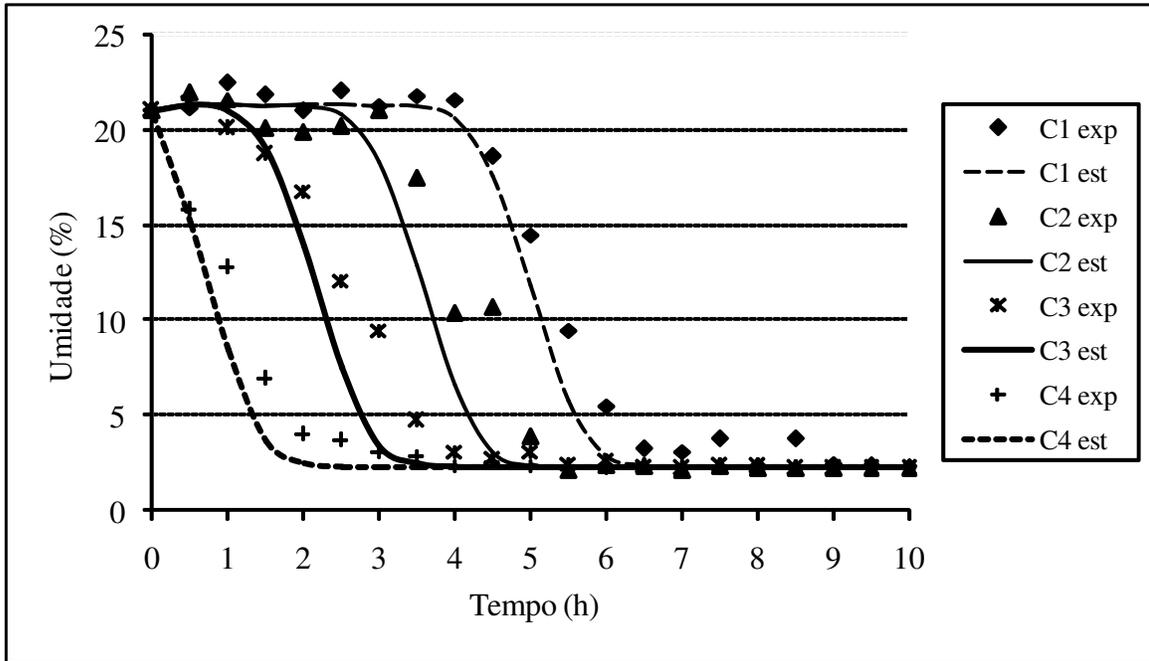


Figura 16. Curvas de umidade da semente de canola durante secagem a 61°C

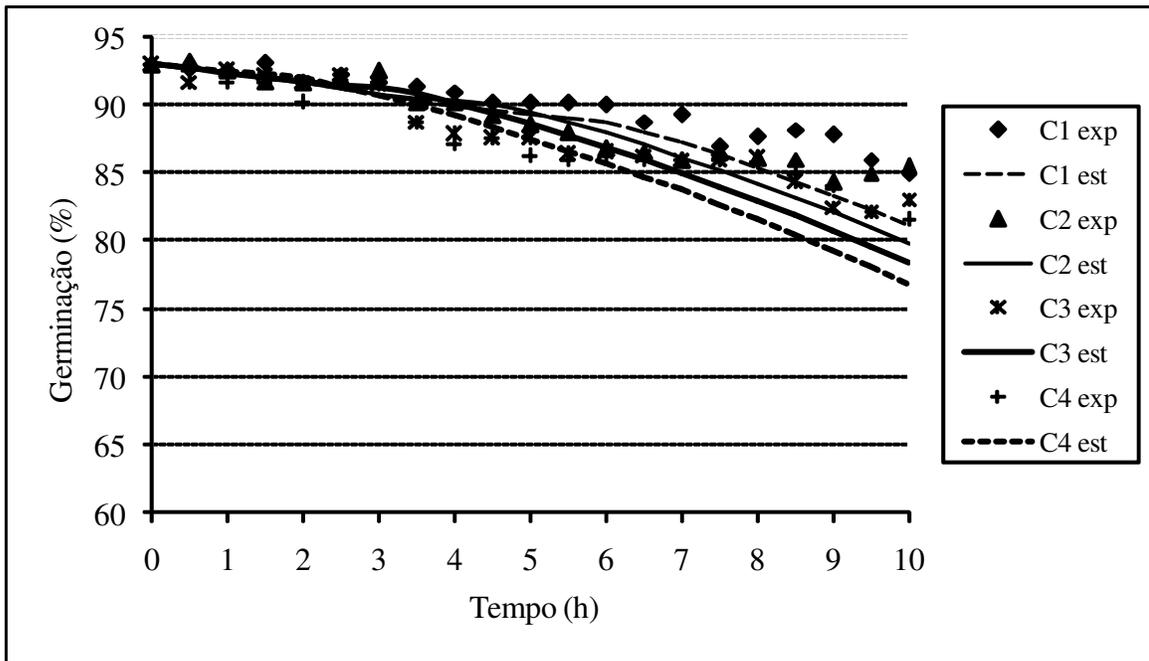


Figura 17. Curvas de germinação da semente de canola durante secagem a 61°C

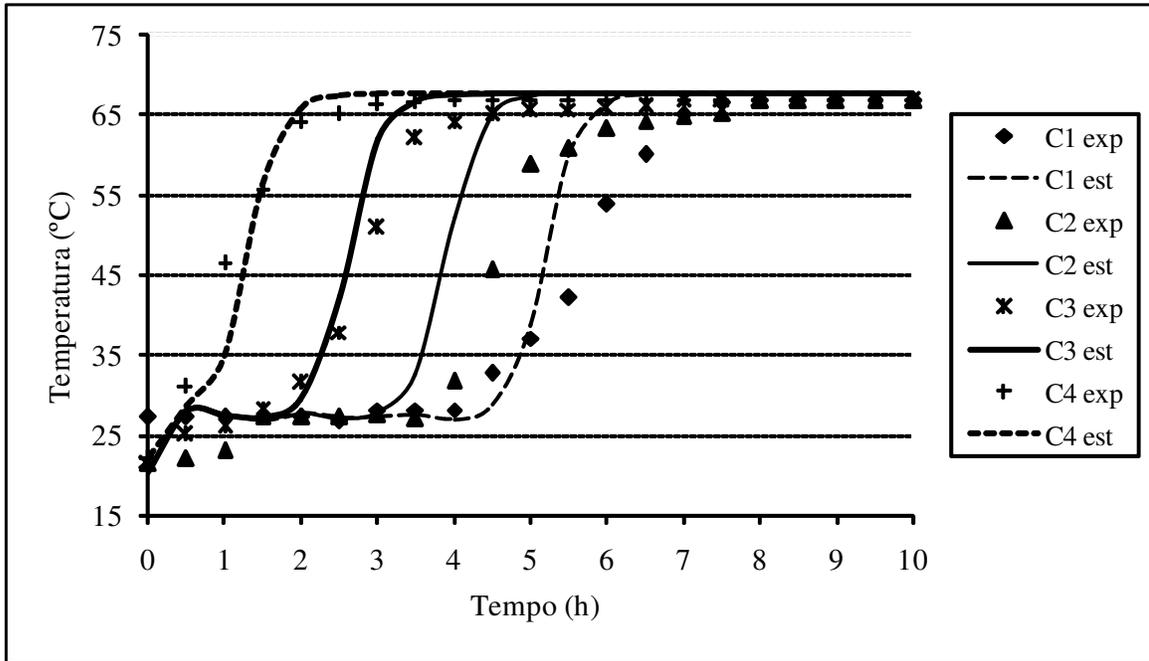


Figura 18. Curvas de temperatura da semente de canola durante secagem a 67°C

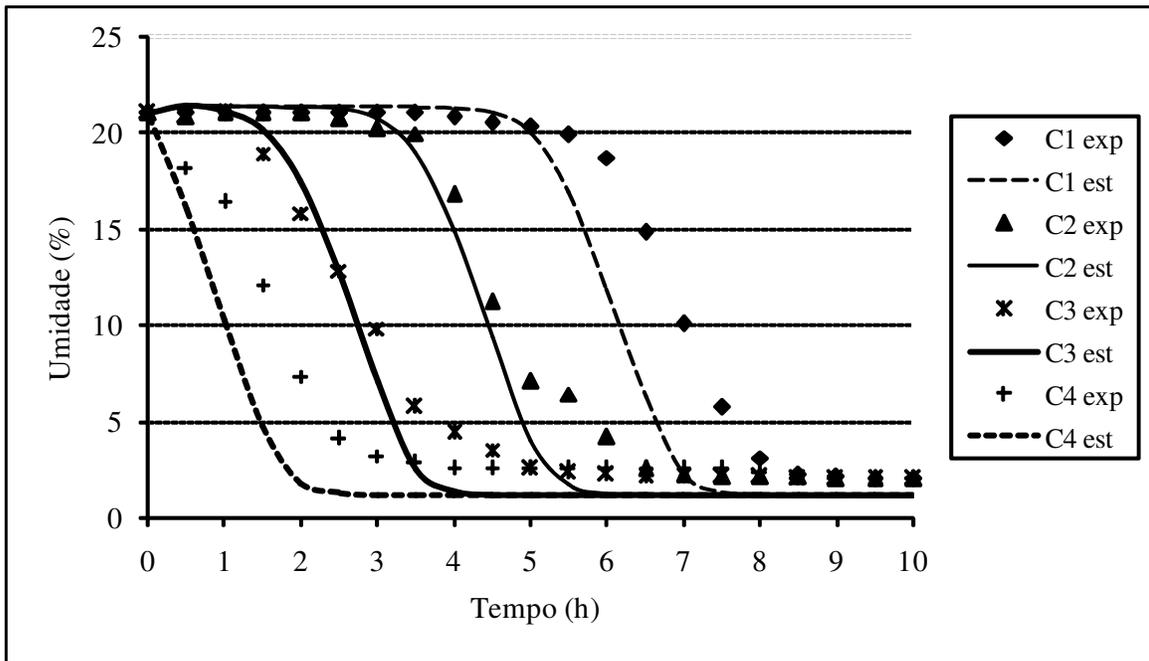


Figura 19. Curvas de umidade da semente de canola durante secagem a 67°C

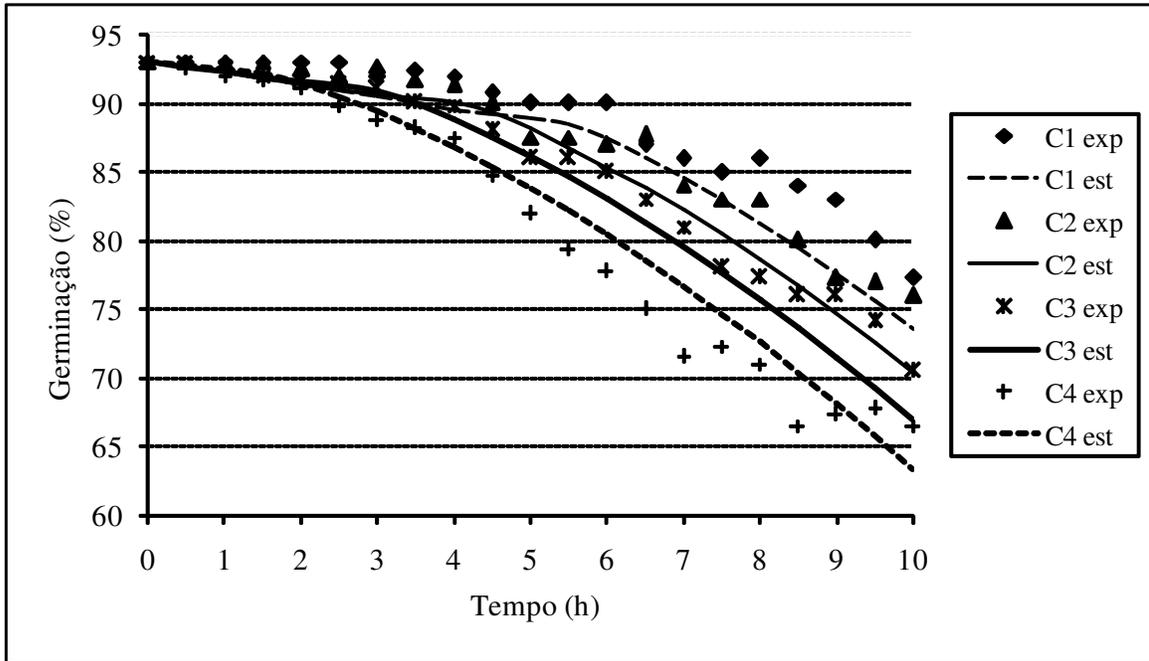


Figura 20. Curvas de germinação da semente de canola durante secagem a 67°C

### 5.5.3. Discussão sobre os resultados de secagem

Uma Sub-rotina de qualidade de semente denominada DRES foi introduzida num programa de secagem, cedido por MAIER (1991).

Nesta rotina, a germinação inicial é convertida à função erfc (função erro complementar), através de SIGMA. A cada instante, em cada ponto, o valor de X é atualizado, em função de tempo, posição e condições do ar de secagem.

Ao fim de cada iteração (dt), é aplicado o inverso da função erfc, resultando nos valores de temperatura, umidade e germinação estimados.

#### **5.5.4. Modificações no programa de secagem**

O programa AERATE é um programa versátil que pode simular processos de armazenagem com e sem aeração ou secagem, ou resfriamento.

As propriedades físicas e térmicas utilizadas na simulação, se encontram na seção 4.4.4.

As temperaturas utilizadas foram acima de 50°C, portanto define-se o processo como não sendo de aeração, secagem a temperatura próxima ao ambiente ou resfriamento.

Como o processo utilizado foi de secagem, há necessidade de definir a vazão de ar, de acordo com a seqüência de entrada de dados no programa. As potências do ventilador e do aquecedor definem a temperatura de secagem, pois o motor do ventilador cede calor dissipado ao ar de secagem.

Definiu-se a iteração da simulação,  $dt = 1,0$  s, para, juntamente com a função FAKTOR, apresentar resultados mais significativos, quando comparados aos dados experimentais, seguindo as recomendações de MOREY et al. (1978).

##### **5.5.4.1. Parâmetro FAKTOR**

A variável, FAKTOR, definida na rotina *Bilanz*, fornece condições semelhantes a equação de taxa de secagem representado pela Equação 13, no modelo de equações diferenciais ordinárias. Deve-se ressaltar que o programa realiza iterações em tempo real.

Como não há nenhum estudo de determinação dos parâmetros de FAKTOR, foram utilizados os dados experimentais de CENKOWSKI et al. (1990), LANG et al.(1993) e LANG et al.(1994) para determinar os parâmetros AHFG e BHFG na Equação 26.

##### **5.5.4.2. Umidade de Equilíbrio.**

A Equação de Henderson modificada não convergiu devido a logaritmo de número negativo, portanto, a equação de Chung apresentou os melhores resultados, porém as referências bibliográficas não apresentam parâmetros para todas faixas de umidade e temperatura. SOKHANSANJ et al (1986), por exemplo, apresenta apenas parâmetros a 25°C.

Para se evitar descontinuidade nas curvas de umidade de equilíbrio, foram estabelecidas diversas faixas de umidade relativa e temperatura, com parâmetros definidos

para cada faixa, baseando-se nos estudos de SOKHANSANJ et al (1986), PATIL & WARD (1988) e PRICHLER (1957).

### 5.5.5. Análise das curvas de secagem.

No Apêndice 04, realizou-se uma análise dos resíduos das curvas de secagem estimadas com relação aos pontos experimentais. As Tabelas 30 a 32 resumem a tabulação de erros absolutos e quadráticos.

Tabela 30. Avaliação de erro absoluto e quadrático nas curvas de temperatura, durante a secagem.

Temperatura de secagem	Camada	Erro absoluto	Erro quadrático
51°C	C1	1,5	5,1
	C2	1,2	2,5
	C3	1,6	3,9
	C4	1,1	1,9
61°C	C1	4,6	53,6
	C2	3,5	27,4
	C3	2,8	17,0
	C4	1,5	5,6
67°C	C1	3,0	29,1
	C2	4,3	49,5
	C3	2,3	10,4
	C4	1,5	7,4

Tabela 31. Avaliação de erro absoluto e quadrático nas curvas de umidade, durante a secagem.

Temperatura de secagem	Camada	Erro absoluto	Erro quadrático
51°C	C1	1,8	6,1
	C2	1,4	3,6
	C3	0,9	2,0
	C4	0,4	0,2
61°C	C1	0,9	1,8
	C2	1,2	5,1
	C3	1,0	3,6
	C4	0,7	1,6
67°C	C1	1,9	10,4
	C2	1,2	2,8
	C3	1,2	2,3
	C4	2,1	7,6

Tabela 32. Avaliação de erro absoluto e quadrático nas curvas de germinação, durante a secagem.

Temperatura de secagem	Camada	Erro absoluto	Erro quadrático
51°C	C1	2,1	5,1
	C2	1,8	3,7
	C3	1,3	2,3
	C4	0,7	0,8
61°C	C1	1,5	3,9
	C2	1,3	3,5
	C3	1,4	3,4
	C4	1,9	6,2
67°C	C1	2,2	7,0
	C2	2,0	6,2
	C3	1,3	3,7
	C4	1,6	4,7

Pelos resultados, pode-se verificar que a simulação e os pontos experimentais apresentaram boa correlação, de acordo com a análise de resíduos no Apêndice 04 e Tabelas 30 a 32, pois os erros apresentados não foram muito altos, e o perfil apresentado no Apêndice 04 não apresentou proporcionalidade, portanto, os resultados da simulação representam significativamente os dados de secagem experimental.

Os maiores erros ocorreram nas curvas de temperatura durante secagem a 61 e 67°C, principalmente nas duas camadas superiores. Isto se deve a movimentação dos termopares durante a retirada de amostras, através de sonda, fazendo com que a leitura de temperatura durante a secagem a 61 e 67°C não fosse a leitura real, mas sim fora da posição correta. Isto pode-se verificar, avaliando-se os comportamentos distintos do erro absoluto e quadrático nas posições destacadas. Uma maneira de evitar este problema, seria fixar os termopares nas posições de profundidades definidas através de uma haste instalada ao longo da profundidade da massa de grãos, sem interferir no escoamento do ar de secagem, ou da retirada de amostras.

No experimento de secagem a 51°C, a germinação experimental apresentou valores acima da germinação estimada, o que não invalida o objetivo proposto, uma vez que os resultados experimentais são maiores que os simulados.

No Apêndice 05, as Figuras 12 a 20 foram desmembradas em 4 camadas do leito de secagem.

Esta separação das curvas e pontos experimentais de temperatura, umidade e germinação durante a secagem ajudam a visualizar os valores de erro absoluto e quadrático encontrados nas Tabelas 30 a 32.

#### **5.5.6. Tempo de secagem.**

Os resultados de simulação e experimentais comprovam facilmente os experimentos realizados por WOODFORDE e LAWTON (1965) MCKNIGHT e MOYSEY (1973) SUTHERLAND e GHALY (1982), através dos resultados das Tabelas 03, 04 e 06 e Figura 04. Assim como Nellist (1978), pode-se verificar que a legislação britânica (1982) estabelece recomendações de temperatura máxima muito abaixo de 61°C, recomendado por este trabalho.

Pode-se verificar que no início da secagem, principalmente para experimentos a 61 e 67°C, durante as três horas iniciais de secagem, houve menor queda de germinação do que

após 6 h, quando o lote da semente já atinge umidade segura armazenagem, o que pode ser facilmente visualizado pela declividade crescente nas curvas das Figuras 17 e 20.

## **5.6. Considerações sobre a simulação.**

Algumas modificações no programa AERATE foram essenciais para a simulação de secagem de sementes de canola e comparar com os dados experimentais de secagem em leito fixo.

### **5.6.1. Parâmetros AHFG e BHFG**

A definição dos parâmetros na equação 26 foi essencial para representar a simulação de secagem de sementes de canola, pois esses parâmetros substituem a equação de taxa de secagem.

Para isso, utilizou-se como base, as curvas de secagem de CENKOWSKI et al. (1989) e LANG et al. (1994), escolhendo-se os melhores valores de AHFG e BHFG, para os dados desses autores.

### **5.6.2 Análise estatística.**

Os valores de  $R^2$  na regressão linear da Tabela 29 e a análise de variância do Apêndice 2 valorizam a significância dos parâmetros da função SIGMA.

## **5.7. Discussão sobre os experimentos.**

Durante a secagem experimental, as amostras foram colhidas através de sondas, no centro do secador, portanto, alguns termopares podem ter saído da posição real de leitura, e as sementes também estariam apresentando valores maiores de umidade, pois a cada coleta de material, as sementes de posição superior podem descer.

Os valores de SIGMA apresentaram valores próximos ao esperado, porém a 60°C, maior diferença em relação aos pontos experimentais.

De acordo com Apêndice 05, pode-se verificar que os experimentos de secagem e a simulação apresentaram boa correlação, embora as curvas de temperatura a 61 e 67°C, nas

duas camadas superiores resultaram em alto valor de erro quadrático (de acordo com Apêndice 04).

Nas figuras do Apêndice 05, com as posições de cada camada desmembradas, para melhor visualização, pode-se verificar a significativa correlação entre os pontos experimentais e o modelo proposto.

As camadas superiores apresentaram maiores resíduos de uma maneira geral, conseqüência de movimentação das camadas decorrentes da introdução da sonda na massa de sementes para determinação de umidade e germinação, sendo que os termopares que registram as temperaturas através do data-logger também saíram de posição.

## 6. CONCLUSÕES

De acordo com os resultados apresentados, as seguintes conclusões podem ser consideradas:

6.1. O modelo proposto representa bem os pontos experimentais de secagem de sementes de canola, nas temperaturas de 61 e 67°C, no entanto, a germinação estimada a 51°C resultou em valor inferior aos pontos experimentais.

6.2. O modelo proposto simula quaisquer condições de secagem, estabelecendo-se o tempo ideal de secagem, para preservar o índice de germinação.

6.3. A germinação foi reduzida com aumento da temperatura de secagem.

6.4. A germinação não sofreu queda significativa nas duas primeiras horas de secagem, quando a umidade ainda era elevada. Por outro lado, a germinação foi significativamente reduzida após secagem a 67°C por 6 horas.

6.5. Através deste trabalho, pode-se recomendar secagem a 61°C ao produtor de sementes, para sementes de canola com umidade inicial de 21%. Se a umidade inicial for diferente, pode-se apontar nova recomendação de condições de secagem, utilizando-se a simulação de secagem, através da equação 33.

6.6. Os experimentos de acondicionamento hermético podem definir os coeficientes da equação 07 para qualquer espécie de sementes e assim especificar as recomendações de secagem, para preservar a germinação da semente.

## 7. REFERÊNCIAS

AGRONLINE. **Produtores gaúchos iniciam a colheita da canola**. Disponível em: <<http://www.agronline.com.br/agronoticias/noticia.php?id=831>>. Acesso em: 29 de outubro de 2007.

ALLEN, E. J.; MORGAN, D. G. A quantitative comparison of the growth, development and yield of different varieties of oilseed rape. **Journal of Agricultural Science**, Aberdeen, UK, v. 85, p. 159-174, 1975.

AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERING - ASAE. **Technical Standards**. USA, 1990.

ASSOCIATION OF OFFICIAL SEED ANALYST - AOSA. **Seed testing rules**. Stillwater, OK, USA, 1983.

BASRA, S. M. A. et al. Assessment of cottonseed deterioration during accelerated ageing. **Seed Science and Technology**, Zurich, Switzerland, v. 31, n. 3, p. 531-540, 2003.

BROOKER, D. B.; BAKKER-ARKEMA, F. W.; HALL, C. W. **Drying and Storage of grains and oilseeds**. New York: Van Nostrand Reinhold, 1992. chap. 4 - Grain equilibrium moisture content, p. 67-86.

BURRELL, N. J., et al. Determination of the time available for drying rapeseed before the appearance of surface molds. **Journal of the Stored Products Research**, Surrey, UK, v. 16, p. 115-118, 1980.

CAMPBELL, L. D.; SLOMINSKI, B. A.; JENSEN, S. K. Is there a need to reduce the level of indole glucosinolates in canola/rapeseed? In: INTERNATIONAL RAPESEED CONGRESS, 10, 1999, Camberra, Australia. **Proceedings of 10<sup>th</sup> International Rapeseed Congress**. Canberra, Australia: The Regional Institute Ltd, 1999. Disponível em: <<http://www.regional.org.au/au/gcirc/1/275.htm#TopOfPage>>. Acesso em: 29 de outubro de 2007.

CANEPPELE, C. et al. Simulação de secagem de arroz (*Oriza sativa* L.). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 22, 1993, Ilhéus, BA, Brasil. **Anais do Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola**. Ilhéus: Ceplac, 1993. v. 2, p. 1080-1090.

CANOLA COUNCIL OF CANADA. **Growing canola**. Disponível em: <<http://www.canola-council.org/growing.html>>. Acesso em: 29 de outubro de 2007.

CARVALHO, N. M.; NAKAGAWA, J. **Sementes: ciência, tecnologia e produção**. 4 ed. Jaboticabal: FUNEP, 2000. 588 p.

CAVALCANTI MATA, M. E. R. M. **Efeito da secagem em altas temperaturas por curtos períodos de tempo em camada estacionaria, sobre a armazenagem de sementes de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) variedade “Carioca”**. 1997. 229 p. Tese (Doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas. SP, Brasil.

CENKOWSKI, S.; MUIR, W. E.; JAYAS, D. S. Simulation of canola and barley drying in a deep bed. **Journal of Food Process Engineering**, London, v. 12, p. 171-190, 1990.

CHILD, R. D. et al. Ethylene biosynthesis in oilseed rape pods in relation to pod shatter. **Journal of Experimental Botany**, Lancaster, UK, v. 49, n. 322, p. 829-838, 1998.

CHUNG, D. S.; PFOST, H. B. Adsorption and desorption of water vapor by cereal grains and their products. **Transactions of ASAE**, St. Joseph, MI, v. 10, p. 552-575, 1967.

COPELAND, L. O.; MCDONALD, M. B. **Principles of seed Science and technology**. 2<sup>nd</sup> ed. Minneapolis, Minnesota: Burgess Publishing Co, 1985.

CORREA, P. C.; MARTINS, J. H.; CHRIST, D. Thin Layer drying rate and lossof viability modeling for canola. **Journal of Agricultural Engineering Research**, Silsoe, UK, v. 74, n. 1, p. 33-39. 1999.

CRISP, J.; WOODS, J. L. The drying properties of rapeseed. **Journal of Agricultural Engineering Research**, Silsoe, UK, v. 57, n. 2, p. 89-97, 1994.

ELLIS, R. H.; HONG, T. D.; ROBERTS, E. H. A comparison of the low moisture-content limit to the logarithmic relation between seed moisture and longevity in twelve species. **Annals of Botany**, Exeter, UK, v. 63, p. 601-611, 1989.

ELLIS, R. H.; ROBERTS, E. H. Improved equations for the prediction of seed longevity. **Annals of Botany**, Exeter, UK, v. 45, p. 13-30, 1980a.

ELLIS, R. H.; ROBERTS, E. H. The influence of temperature and moisture on seed viability period in barley. **Annals of Botany**, Exeter, UK, v. 45, p. 31-37, 1980b.

FAO. **Yearbook of Production**. FAO, ONU, 2005. 336 p.

FIGUEIREDO, D. F. et al. Desempenho e morfometria da mucosa de duodeno de frangos de corte alimentados com farelo de canola, durante o período inicial. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, MG, Brasil, v. 32, n. 6, p. 1321-1329, 2003.

FINNEY, D. J. **Probit Analysis**. Cambridge: Cambridge University Press, 1951.

GAIOTTO, J. R.; MACEDO-VIEGAS, E. M. Farelo de canola para juvenis de tilápia do Nilo. (*Oreochromis niloticus*), linhagem Chitralada. **Acta Scientiarum Animal Science**, Maringá, PR, Brasil, v. 26, n. 1, p. 15-19, 2004.

GALDIOLI, E. M. et al. Substituição da proteína do farelo de soja pela proteína do farelo de canola em rações para alevinos de curimatá (*Prochilodus lineatus* V.). **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, MG, Brasil, v. 31, n. 2, p.552-559, 2002.

GAZZONI, D. L. **Historia e Biodiesel**. Disponível em: <<http://www.biodiesel.com.br/biodiesel/historia/biodiesel-historia.htm>>. Acesso em: 30 de maio de 2007.

GHALY, T. F.; SUTHERLAND, J. W. Heat damage to grain and seeds. **Journal of Agricultural Engineering Research**, Silsoe, UK, v. 30, n. 4, p. 337-345, 1984.

GREAT BRITAIN. Ministry of Agriculture, Fisheries and Food. **High temperature grain drying**. Booklet 2417. Almwick, Great Britain: MAFF, 1982.

HARRINGTON, J. F. Seed storage and longevity. In: KOSLOWSKI, T. (Ed.). **Seed Biology**. New York: Academic Press, 1973. p. 145-245.

HENDERSON, S. M. A basic concept of equilibrium moisture. **Agricultural Engineering**, St. Joseph, MI, v. 33, p. 29-31, 1952.

HONG, T. D.; ELLIS, R. H. The survival of germinating orthodox seeds after desiccation and hermetic storage. **Journal of Experimental Botany**, London, v. 43, p. 239-247, 1992.

HONG, T. D. et al. Survival and vigour of ultra-dry seeds. **Seed Science and Technology**, Zurich, Switzerland, v. 33, p. 449-460, 2005.

JAYAS, D. S. et al. The effect of airflow direction on the resistance of canola to airflow. **Canadian Agricultural Engineering**, Ottawa, v. 29, p. 189-192, 1987.

JAYAS, D. S.; SOKHANSANJ, S.; WHITE, N. D. G. Bulk density and porosity of two canola species. **Transactions of ASAE**, St. Joseph, MI, v. 32, n. 1, p. 291-294, 1989.

JOHNSON, D. L.; CROISSANT, R. L. Rapeseed and canola production. **Extension Bulletin 0110/2007**. Colorado: Colorado State University, 2007.

KREYGER, J. **Drying and storing grains seeds and pulses in temperate climates**. Pub 205. Wageningen, Netherlands: Institut Voor Bewaring en Verwverking Van Landbouwprodukten, 1972. 333 p.

LAGE, L. V. **Utilização da semente de canola extrusada ou não na alimentação de leitões na fase de creche**. 2002. 104 p. Dissertação (doutorado em ciências biológicas) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, Brasil.

LANG, W.; SOKHANSANJ, S.; ROHANI, S. Dynamic shrinkage in Bakker-Arkema's mathematical simulation of wheat and canola drying. **Drying Technology**, New York, v. 12, n. 7, p. 1687-1708, 1994.

LANG, W.; SOKHANSANJ, S.; SOSULSKI, F. W. Comparative drying experiments with instantaneous shrinkage measurements for canola seeds. **Canadian Agricultural Engineering**, Ottawa, v. 35, n. 2, p. 127-132, 1993.

LAWTON, P. J. Resistance to airflow of some common seeds. **Journal of Agricultural Engineering Research**, Silsoe, UK, v. 10, n. 4, p. 298-300, 1965.

MAIER, D. E. **The chilled aeration and storage of cereal grains**. 1992. Thesis (Ph.D) - Michigan State University, East Lansing, Michigan.

MATTHIES, H. J.; PETERSEN, H. New data for calculating the resistance to air flow of stored granular materials. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, MI, v. 17, n. 6, p. 1144-1149, 1974.

MCKNIGHT, K. E.; MOYSEY, E. B. The effect of temperature and air flow rate on the quality of dried rapeseed. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, MI, v. 16, n. 4, p. 814-816, 1973.

MONTROSS, M. D. et al. Dryer performance enhancement through grain preheating. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, MI, v. 40, n. 5, p. 1391-1394, 1997.

MONTROSS, M. D.; MAIER, D. E. Simulated performance of conventional high temperature drying, dryeration, and combination drying of shelled corn with automatic conditioning. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, MI, v. 43, n. 3, p. 691-699, 2000.

MORE, D. Trade policy and US canola market in US. In: US CANOLA CONFERENCE. March 5-6, 1992, Memphis, Tennessee. **Proceedings US Canola Conference**. Memphis, Tennessee: US Canola Association Washington, DC, 1992, p 17-29.

MOREY, R.V., et al. The present status of grain drying simulation. **Paper 78-3009 - American Society of Agricultural Engineering – ASAE**. St. Joseph, MI, 1978. 24 p.

MOYSEY, E. B.; SHAW, J. T.; LAMPMAN, W. P. The Effect of Temperature and Moisture on the Thermal Properties of Rapeseed. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, MI, v. 20, p. 768-770, 1977.

MUIR, W. E.; SINHA, R. N. Theoretical rates of flow of air at near-ambient conditions required to dry rapeseed. **Canadian Agricultural Engineering**, Ottawa, v. 28, p. 45-49, 1986.

NELLIST, M. E.; BRUCE, D. M. Drying and Cereal Quality. **Aspects of Applied Biology**, Wellsbourne, v. 15, p. 439-456, 1987.

NELLIST, M. E, REES, D. V. H.; ABRAHAM, S. J. The effect of drying air temperature on the quality of the seed of the winter oil-rape, *Brassica napus*. **Dept. note DN/HC/28/70**. Silsoe, Bedford, UK: National Institute of Agricultural Engineering, 1970. 26 p.

NELLIST, M. E. Safe drying for seed grain. In: HEBBLETHWAITE, P. D. (Ed.). **Seed Production**. London: Butterworths, 1980. p. 371-388.

NELLIST, M. E. **Safe temperature for drying grain**. Report n. 29. Silsoe, Bedford, UK: National Institute of Agricultural Engineering, 1978. 90 p.

PATHAK, P. K.; AGRAWAL, Y. C.; SINGH, B. P. N. Effect of elevated drying temperature on rapeseed oil quality. **Journal of the American Oil Chemistry Society**, Heidelberg, v. 68, n. 8, p. 580-582, 1991.

PATIL, B. G.; WARD, G. T. Heated air drying of rapeseed. **Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America**, Tokyo, Japan, v. 20, n. 4, p. 52-58, 1989.

PATIL, B. G.; WARD, G. T. Resistance to airflow of oilseed rape. **Journal of Agricultural Engineering Research**, Silsoe, UK, v. 41, n. 1, p. 25-31, 1988.

PICHLER, H. J. Sorption isotherms for grain and rape. **Journal of Agricultural Engineering Research**, Silsoe, UK, v. 2, n. 2, p. 159-165, 1957.

PIXTON, S. W.; HENDERSON, S. The moisture content equilibrium relative humidity relationships of five varieties of canadian wheat and candle rapeseed at different temperatures. **Journal of Stored Products Research**, Surrey UK, v. 17, p. 187-190, 1981.

POPINIGIS, F. **Fisiologia da semente**. 2 ed. Brasília: Agiplan, 1985. 289 p.

PRESS, W. H. et al. **Numerical recipes in FORTRAN**. 2<sup>nd</sup> ed. New York: Cambridge University Press, 1992. chap. 6 - Special functions, p 205-265.

RAO, V. G.; PFOST, H. B. Physical properties related to drying of twenty food grains. **Paper 80-3539 - American Society of Agricultural Engineering – ASAE**, St. Joseph, 1980.

ROBERTS, E. H. The viability of cereal seeds in relation to temperature and moisture. **Annals of Botany**, Exeter, UK, v. 24, p. 12-31, 1960.

ROBERTS, E. H. **Viability of Seeds**. London: Chapman and Hall, 1972. Storage Environment and the control of viability, p. 11-58.

RUKSPOLLAMUANG, N. **Physical damage and the effect of vibration on the oxygen barrier quality of institutional retort pouches**. 1983. Dissertation (Master Degree) - Michigan State University, School of Packaging, East Lansing, Michigan.

SCHERER, C. **Utilização da semente de canola extrusada ou não na alimentação de leitões na fase de creche**. 2006. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Maringá, Maringá, PR, Brasil.

SHAHIDI, F. **Canola and Rapeseed: Production, Chemistry, Nutrition, and Processing Technology**. New York: AVI, 1990. chap. 1 - Rapeseed and canola: global production and distribution, p. 3-14.

SOKHANSANJ, S. et al. Equilibrium relative humidity-moisture content of canola from 5 to 25 °C. **Transactions of ASAE**, St. Joseph, MI, v. 29, n. 3, p. 837-839, 1986.

SUTHERLAND, J. W.; GHALY, T. F. Heated-air drying of oilseeds. **Journal of the Stored Products Research**, Surrey UK, v. 18, n. 2, p. 43-54, 1982.

TASCON, C.E.O. **Simulação de secagem de café, em camada fixa, com inversão de fluxo de ar**. 1984. 64 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, Brasil.

THOMPSON, T. L.; PEART, R. M.; FOSTER, G. H. Mathematical simulation of corn drying: a new model. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, MI, v. 11, p. 582-586, 1968.

THOMPSON, T. L. **Predicted performance and optimal design of convection grain dryer**. 1967. Thesis (PhD) - Purdue University, West Lafayette, IN.

TOMM, G. O. Situação em 2005 e perspectivas da cultura de canola no Brasil e em países vizinhos. **Boletim de pesquisa e desenvolvimento Online**, Passo Fundo, RS, Brasil, n. 26, 21 p., novembro de 2005. Disponível em: <[http://www.cnpt.embrapa.br/biblio/bp/p\\_bp26.htm](http://www.cnpt.embrapa.br/biblio/bp/p_bp26.htm)>. Acesso em: 29 de outubro de 2007.

WOODFORDE, J.; LAWTON, P. J. The drying of seeds. **Journal of Agricultural Engineering Research**, Silsoe, UK, v. 10, n. 4, p. 283-287, 1965.

# APÊNDICE 01

## Determinação de Sigma Experimental

apendice01f1

regressao linear p/ obtencao de sigma

Tab 1.Dados de erfc(-1) germinação após acondicionamento hermético.

Temperatura	Umidade	Tempo	erfc(-1)	Germ
	6.6	0	-1.0992	94.3
50	6.6	240	-0.216	62
50	7.7	270	0.3913	29.3
50	7.7	420	0.4765	25
50	6.6	420	-0.621	80.7

Temperatura	Umidade	Sigma	R2
(° C)	(%bu)	(min)	
50	7.3	526.3	0.64
50	12.5	312.5	0.99
50	13.8	250.0	0.84
50	15.4	243.9	0.97
50	16.0	277.8	0.83
50	17.5	250.0	1.00
60	12.5	181.8	0.99
60	13.8	122.0	0.99
60	14.2	172.4	0.69
60	16.7	108.7	0.76
70	7.0	45.9	0.64
70	13.8	31.5	0.87
70	14.2	16.1	1.00
70	17.5	2.9	0.87

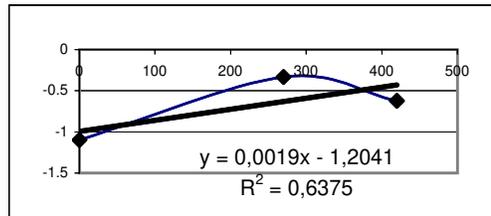
regressao linear de 3 pts

0	-1.0992
270	-0.331
420	-0.621

$$y = 0,0019x - 1,2041$$

$$R^2 = 0,6375$$

slope	interc	sgm	tm	r2
0.0019	1.2041	526.316	633.737	0.638



Temperatura	Umidade	Tempo	erfc(-1)	Germ
		0	-1.0992	93.7
50	12.5	210	-0.4122	72.7
50	12.5	270	-0.1014	57.0
50	12.5	360	0.0355	48.3

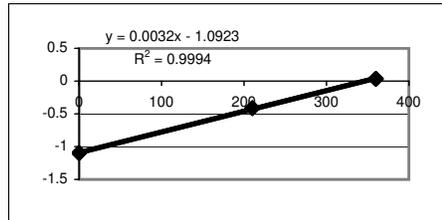
regressao linear de 3 pts

0	-1.0992
210	-0.4122
360	0.0355

$$y = 0,0032x - 1,0923$$

$$R^2 = 0,9994$$

slope	interc	sgm	tm	r2
0.0032	1.0923	312.5	341.344	0.99



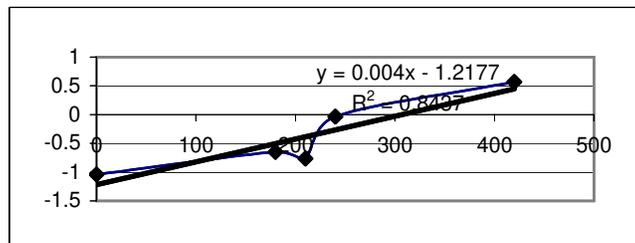
Temperatura	Umidade	Tempo	erfc(-1)	Germ
50	13.8	180	-0.6475	82
50	13.8	210	0.161	41.3
50	13.8	210	-0.764	86
50	13.8	240	0.0355	48.7
50	13.8	240	-0.0355	52
50	13.8	300	-0.9935	92
50	13.8	360	-0.621	81.3
50	13.8	420	0.5702	21

regressao linear de 5 pts

0	-1.0436
180	-0.6475
210	-0.764
240	-0.0355
420	0.5702

$$y = 0,004x - 1,2177$$

$$R^2 = 0,8437$$



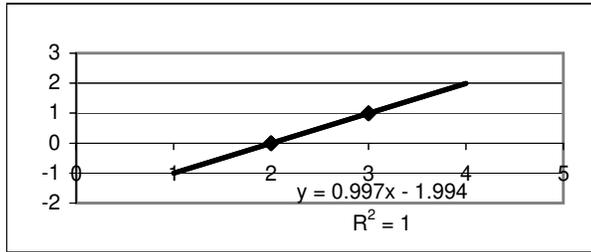
apendice01f1

*slope*    *interc*    *sgm*    *tm*    *r2*  
 0.004    1.2177    250    304.425    0.844

Temperatu	Umidade	Tempo	erfc(-1)	Germ
		0	-1.238	
50	15.4	120	-0.7965	87
50	15.4	210	-0.5702	70.3
50	15.4	270	-0.161	59.3
50	15.4	120	-0.7965	87.0
50	15.4	210	-0.6475	82.3
50	15.4	270	-0.161	59.3

regressao linear de 4 pts  
 0    -1.238  
 120    -0.7965    87  
 210    -0.5702    70.3  
 270    -0.161    59.3

$y = 0,0038x - 1,2569$   
 $R^2 = 0,9711$



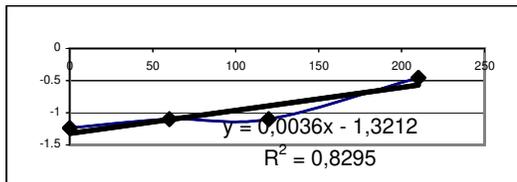
*slope*    *interc*    *sgm*    *tm*    *r2*  
 0.0041    1.3299    243.902    324.366    0.971

Temperatu	Umidade	Tempo	erfc(-1)	Germ
		0	-1.238	
50	16	60	-1.0992	94
50	16	120	-1.0992	93.7
50	16	210	-0.455	74
50	16	60	-0.9935	92.0
50	16	120	-0.948	91.3
50	16	210	-0.4994	75.7

regressao linear de 4 pts  
 0    -1.238

60	-1.0992
120	-1.0992
210	-0.455

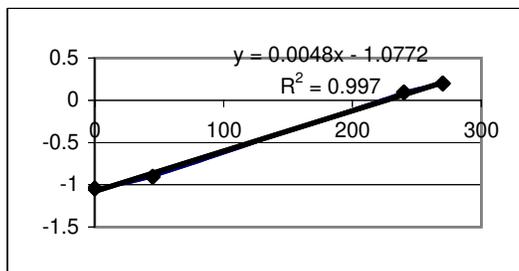
$y = 0,0036x - 1,3212$   
 $R^2 = 0,8295$



*slope*    *interc*    *sgm*    *tm*    *r2*  
 0.0036    1.3212    277.778    367    0.83

Temperatu	Umidade	Tempo	erfc(-1)	Germ
		0	-1.0436	
50	21.4	45	-0.906	89.67
50	20.0	240	0.092	78.67
50	20.0	270	0.1976	39

regressao linear de 4 pts  
 0    -1.0436  
 45    -0.906  
 240    0.092  
 270    0.1976



apendice01f1

$y = 0,0048x - 1,0772$   
 $R^2 = 0,997$

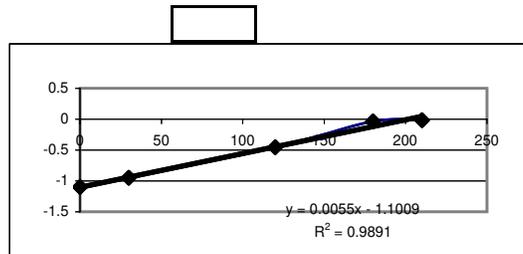
<i>slope</i>	<i>interc</i>	<i>sgm</i>	<i>tm</i>	<i>r2</i>
0.0048	1.0772	208.333	224.417	0.997

agora 60 C

Temperatura	Umidade	Tempo	erfc(-1)	Germ
	12.5	0	-1.0992	
60	12.5	30	-0.948	91.3
60	12.5	120	-0.455	74.3
60	12.5	180	-0.0355	52.3
60	12.5	210	-0.0175	50.7

regressao linear de 5 pts

0	-1.0992
30	-0.948
120	-0.455
180	-0.0355
210	-0.0175



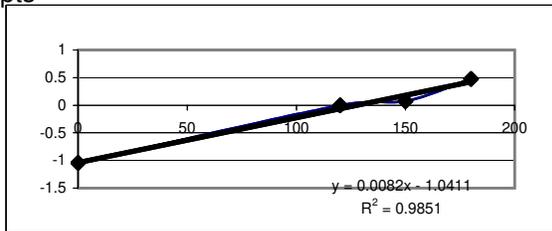
$y = 0,0055x - 1,1009$   
 $R^2 = 0,9891$

<i>slope</i>	<i>interc</i>	<i>sgm</i>	<i>tm</i>	<i>r2</i>
0.0055	1.1009	181.818	200.164	0.989

Temperatura	Umidade	Tempo	erfc(-1)	Germ
60	13.8	120	0	50.3
60	13.8	150	0.071	46.3
60	13.8	180	0.4765	25

regressao linear de 4 pts

0	-1.0436
120	0
150	0.071
180	0.4765



$y = 0,0082x - 1,0411$   
 $R^2 = 0,9851$

<i>slope</i>	<i>interc</i>	<i>sgm</i>	<i>tm</i>	<i>r2</i>
0.0082	1.0411	121.951	126.963	0.985

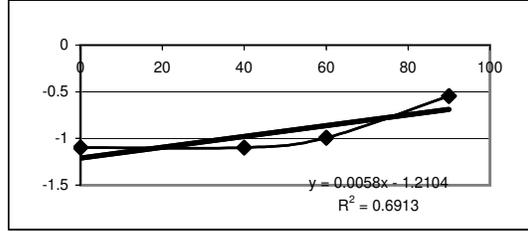
Temperatura	Umidade	Tempo	erfc(-1)	Germ
		0	-1.0992	
60	14.2	40	-1.0992	94
60	14.2	60	-0.9935	92.3
60	14.2	90	-0.546	78.7

regressao linear de 4 pts

apendice01f1

0 -1.0992  
 40 -1.0992  
 60 -0.9935  
 90 -0.546

$y = 0,0058x - 1,2104$   
 $R^2 = 0,6913$

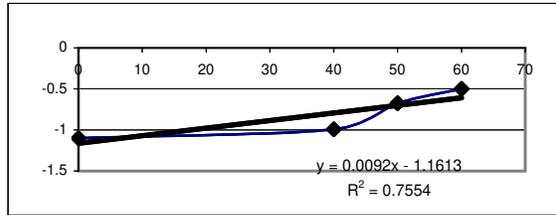


70

*slope*    *interc*    *sgm*    *tm*    *r2*  
 0.0058    1.2104    172.414    208.69    0.691

Temperatura	Umidade	Tempo	erfc(-1)	Germ
		0	-1.0992	
60	16.7	40	-0.9935	92.0
60	16.7	50	-0.675	82.7
60	16.7	60	-0.4994	76.0

0 -1.0992  
 40 -0.9935  
 50 -0.675  
 60 -0.4994  
 $y = 0,0092x - 1,1613$   
 $R^2 = 0,7554$

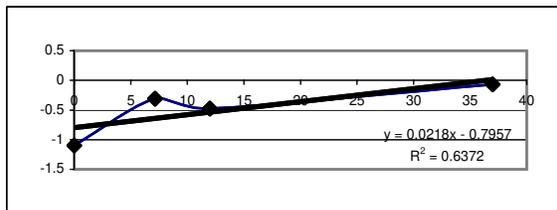


*slope*    *interc*    *sgm*    *tm*    *r2*  
 0.0092    1.1613    108.696    126.228    0.755

agora 70c

Temperatura	Umidade	Tempo	erfc(-1)	Germ
70	6.6	7.1624	-0.311	67
70	6.6	11.9794	-0.477	74.7
70	7.7	36.9794	-0.071	54

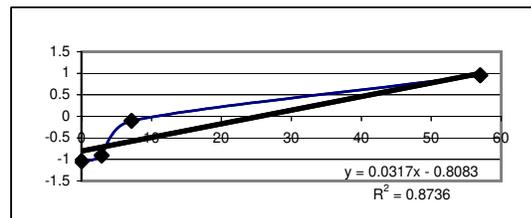
0 -1.0992  
 7.1624 -0.311  
 11.9794 -0.477  
 36.9794 -0.071  
 $y = 0,0218x - 0,7957$   
 $R^2 = 0,6372$



*slope*    *interc*    *sgm*    *tm*    *r2*  
 0.0218    0.7957    45.8716    36.5    0.637

Temperatura	Umidade	Tempo	erfc(-1)	Germ
70	13.8	2.87433	-0.906	90.3
70	13.8	7.1624	-0.1068	56.3
70	13.8	56.9794	0.9501	8.7

0 -1.0436  
 2.87433 -0.906  
 7.1624 -0.1068  
 56.9794 0.9501



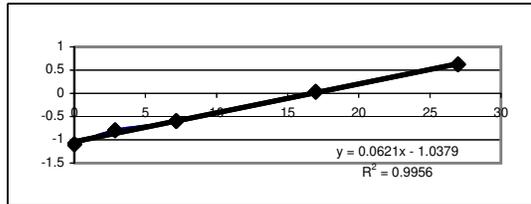
$y = 0,0317x - 0,8083$

$R^2 = 0,8736$

<i>slope</i>	<i>interc</i>	<i>sgm</i>	<i>tm</i>	<i>r2</i>
0.0317	0.8083	31.5457	25.4984	0.874

Temperatura	Umidade	Tempo	erfc(-1)	Germ
70	14.2	2.87433	-0.7965	87.0
70	14.2	7.1624	-0.595	79.7
70	14.2	16.9794	0.0355	48.0
70	14.2	26.9794	0.6208	19.3

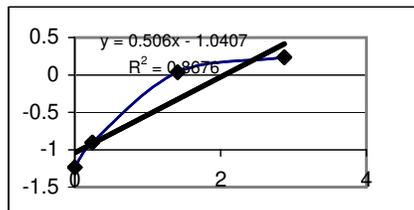
0 -1.0992  
 2.87433 -0.7965  
 7.1624 -0.595  
 16.9794 0.0355  
 26.9794 0.6208  
 $y = 0,0621x - 1,0379$   
 $R^2 = 0,9956$



<i>slope</i>	<i>interc</i>	<i>sgm</i>	<i>tm</i>	<i>r2</i>
0.0621	1.0379	16.1031	16.7134	0.996

Temperatura	Umidade	Tempo	erfc(-1)	Germ
		0	-1.238	
70	17.5	0.23953	-0.906	89.7
70	17.5	1.40981	0.0355	48.3
70	17.5	2.87433	0.2345	36.7

0 -1.238  
 0.23953 -0.906  
 1.40981 0.0355  
 2.87433 0.2345  
 $y = 0,506x - 1,0407$   
 $R^2 = 0,8676$



<i>slope</i>	<i>interc</i>	<i>sgm</i>	<i>tm</i>	<i>r2</i>
0.506	1.0407	1.97628	2.05672	0.868

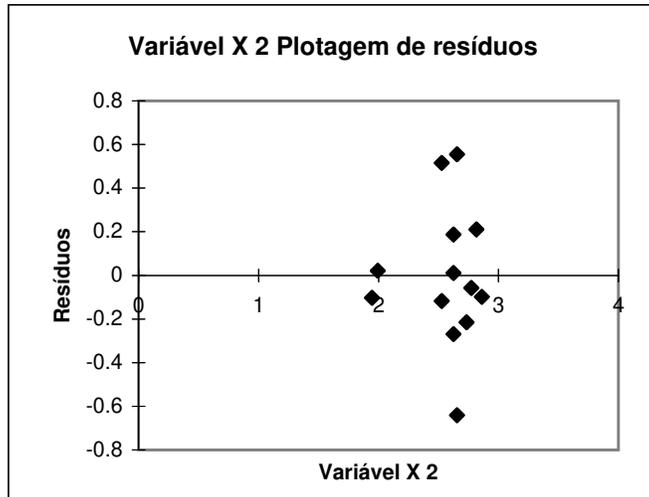
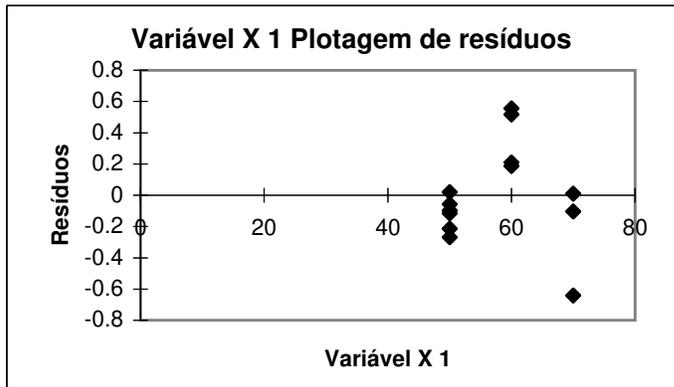
## APÊNDICE 02

### Determinação de Parâmetros de Sigma

apendice 02  
obtencao de parametros de sigma

	ln(sgm)	T	ln(M)
1	6.2659	50	1.99243
2	5.7446	50	2.52573
3	5.52146	50	2.62467
4	5.49677	50	2.73437
5	5.62682	50	2.77259
6	5.52146	50	2.8622
7	5.20301	60	2.52573
8	4.80362	60	2.62467
9	5.1499	60	2.65324
10	4.68855	60	2.81541
11	3.82585	70	1.94591
12	3.45144	70	2.62467
13	2.77901	70	2.65324

	ln(sgr T)		ln(M)
1	6.27	50	1.99243
2	5.74	50	2.52573
3	5.52	50	2.62467
4	5.5	50	2.73437
5	5.63	50	2.77259
6	5.52	50	2.8622
7	5.2	60	2.52573
8	4.8	60	2.62467
9	5.15	60	2.65324
10	4.69	60	2.81541
11	3.83	70	1.94591
12	3.45	70	2.62467
13	2.78	70	2.65324



RESUMO DOS RESULTADOS

Estadística de regressão

R mú	0.94856
R-Qu	0.89976
R-quç	0.87972
Erro ç	0.34947
Obse	13

ANOVA

	gl	SQ	MQ	F	significação
Regre	2	10.9626	5.4813	44.8824	1E-05
Resíc	10	1.22126	0.12213		
Total	12	12.1839			

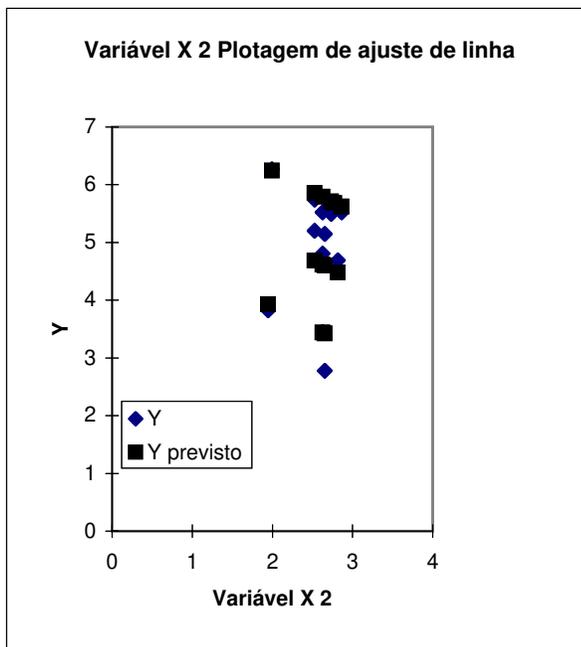
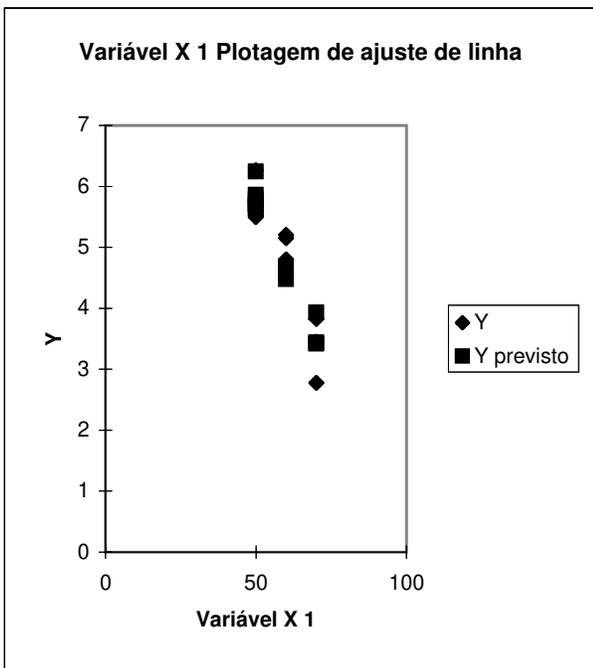
	Coefficiente	erro padrão	Stat t	valor-P	% inferior	% superior	inferior 95,0%	superior 95,0%
Inters	13.5518	1.29339	10.4777	1E-06	10.67	16.4337	10.67	16.4337
Variá	-0.1175	0.0124	-9.4744	2.6E-06	-0.1451	-0.0898	-0.1451	-0.0898
Variá	-0.7195	0.3641	-1.976	0.07638	-1.5307	0.09181	-1.5307	0.09181

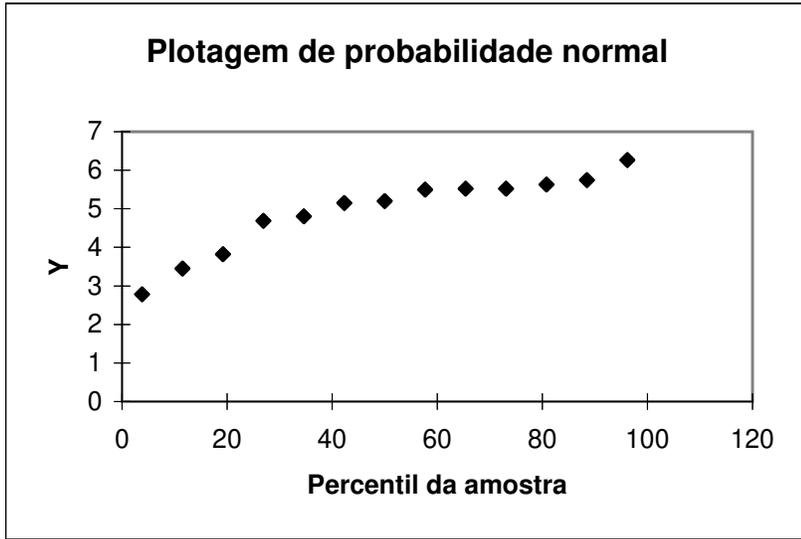
RESULTADOS DE RESÍDUOS

Observa	Y previsto	Resíduos	Resíduos padrão
1	6.24516	0.02074	0.06502
2	5.86147	-0.1169	-0.3663
3	5.79029	-0.2688	-0.8427
4	5.71137	-0.2146	-0.6727
5	5.68387	-0.057	-0.1788
6	5.6194	-0.0979	-0.307
7	4.68684	0.51617	1.61801
8	4.61565	0.18797	0.58921
9	4.5951	0.5548	1.7391
10	4.47842	0.21013	0.65868
11	3.92935	-0.1035	-0.3245
12	3.44102	0.01042	0.03267
13	3.42046	-0.6414	-2.0107

RESULTADOS DE PROBABILIDADE

Percentil	Y
3.84615	2.77901
11.5385	3.45144
19.2308	3.82585
26.9231	4.68855
34.6154	4.80362
42.3077	5.1499
50	5.20301
57.6923	5.49677
65.3846	5.52146
73.0769	5.52146
80.7692	5.62682
88.4615	5.7446
96.1538	6.2659



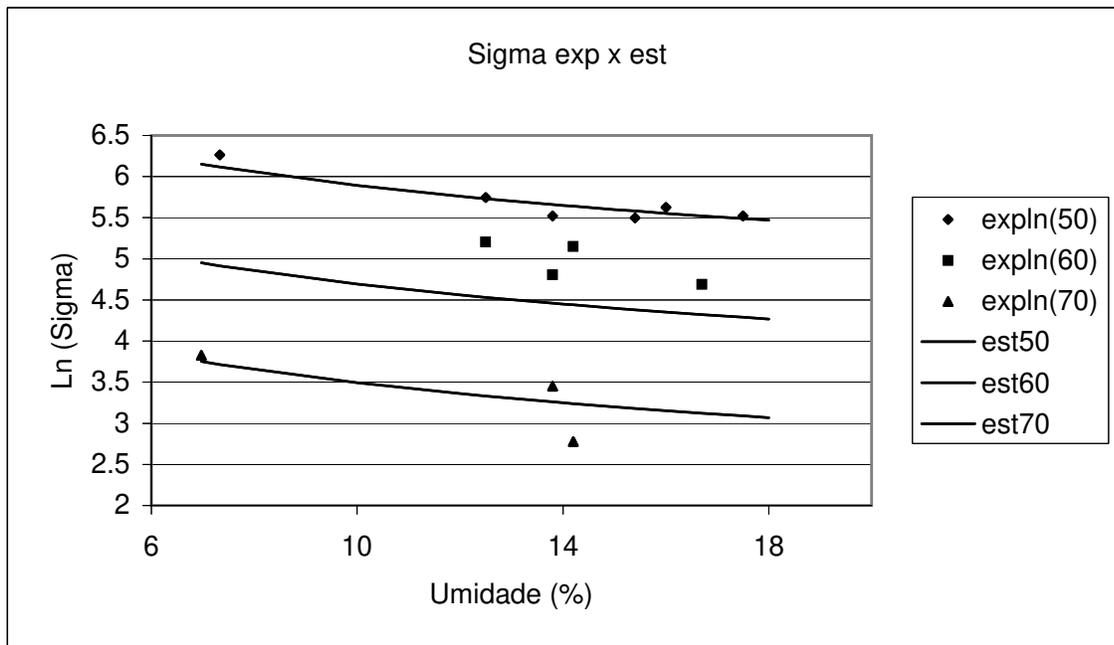


## APÊNDICE 03

Sigma experimental e estimado

Apêndice 03  
Análise de erro em sigma

Umidade (%)	Erro 50 C	Erro 60 C	Erro 70 C
7.0			0.00037
7.3	0.00058		
12.5	5.2E-06	0.01666	
13.8	0.00063	0.00511	
14.0			
14.2		0.01902	0.02748
15.4	0.00024		
16.0	0.00017		
16.7		0.00608	
17.5	3.4E-05		
Soma	0.00165	0.04687	0.02785



$$\text{Erro (T)} = (\text{expln(T)} - \text{estln(T)}) / \text{expln(T)}$$

apendice03f1

umidade	expln(50)	expln(60)	expln(70)	est50	est60	est70	erro 50	erro 60	erro 70
6.97			3.82585	6.15204	4.95204	3.75204			0.01929
7				6.14894	4.94894	3.74894			
7.33333	6.2659			6.11545	4.91545	3.71545	0.02401		
7.33333				6.11545	4.91545	3.71545			
10				5.89214	4.69214	3.49214			
12				5.76087	4.56087	3.36087			
12.5	5.7446			5.73148	4.53148	3.33148	0.00229		
12.5		5.20301		5.73148	4.53148	3.33148		0.12907	
13.8	5.52146			5.66024	4.46024	3.26024	-0.0251		
13.8		4.80362		5.66024	4.46024	3.26024		0.07148	
13.8			3.45144	5.66024	4.46024	3.26024			
14				5.64988	4.44988	3.24988			
14.2		5.1499		5.63967	4.43967	3.23967		0.13791	
14.2			2.77901	5.63967	4.43967	3.23967			-0.1658
15				5.6002	4.4002	3.2002			
15.4	5.49677			5.58126	4.38126	3.18126	-0.0154		
16	5.62682			5.55374	4.35374	3.15374	0.01299		
16.7		4.68855		5.52291	4.32291	3.12291		0.07799	
17.5	5.52146			5.48922	4.28922	3.08922	0.00584		
17.5				5.48922	4.28922	3.08922			
18				5.46893	4.26893	3.06893			
20				5.39307	4.19307	2.99307			
						soma	0.00462	0.41645	-0.1465
		fazer relativo? abs		semana3 sgmana4					

## APÊNDICE 04

### Secagem experimental e simulação de secagem (Análise de resíduos)

apendice04a1

temperatura durante secagem a 51c

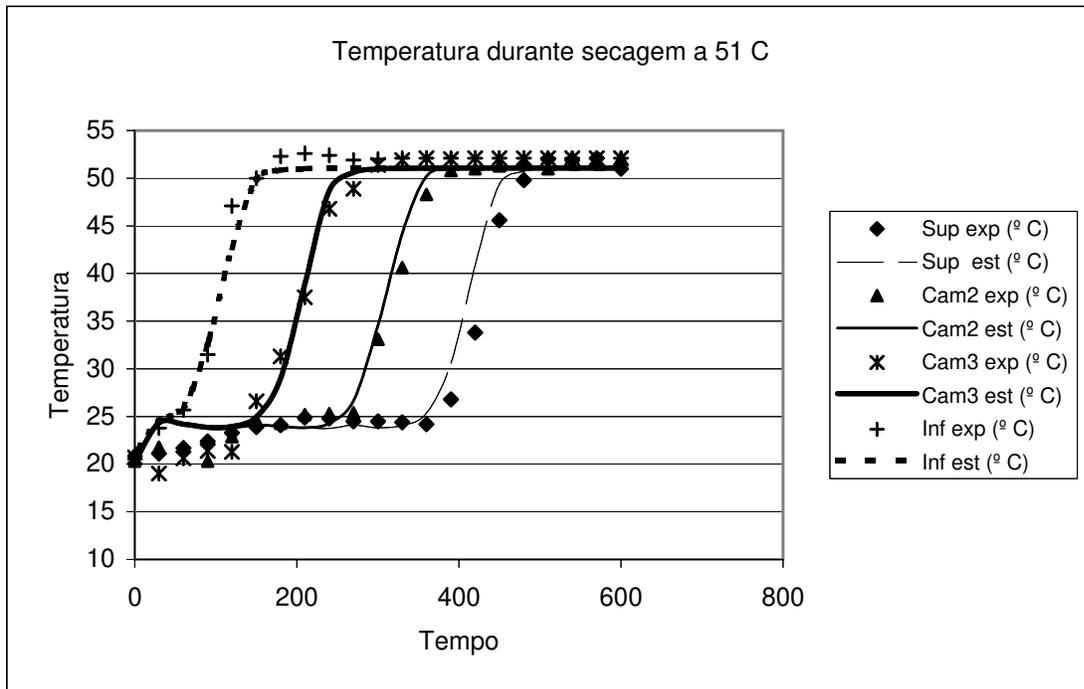
Tempo (min)	Sup exp (° C)	Sup est (° C)	Cam2 exp (° C)	Cam2 est (° C)	Cam3 exp (° C)	Cam3 est (° C)	Inf exp (° C)	Inf est (° C)
0	20,8	20,01	20,3	20,06	20,7	20,26	20,5	21,08
30	21,1	24,26	21,8	24,3	19	24,31	23,8	24,53
60	21,7	24,22	21,8	24,21	20,6	24,19	25,7	25,95
90	22,4	23,91	20,3	23,88	21,4	23,86	31,5	32,53
120	23,3	23,81	22,9	23,83	21,3	23,96	47,1	42,7
150	23,9	24,05	24,6	24,1	26,6	24,97	50	49,86
180	24,1	23,99	24,3	23,97	31,3	28,98	52,3	50,83
210	24,9	23,78	25,2	23,83	37,5	38,87	52,6	51,01
240	24,8	23,75	25,3	24,28	46,8	48,69	52,4	51,04
270	24,5	24,08	25,4	26,67	48,9	50,6	51,9	51,05
300	24,5	23,82	33,1	34,58	51,4	50,97	52	51,05
330	24,4	24,06	40,6	44,2	51,9	51,04	52,1	51,05
360	24,2	25,37	48,3	50,18	52,1	51,05	52,1	51,05
390	26,8	30,6	50,8	50,89	52	51,05	52,1	51,05
420	33,8	40,86	51	51,02	52,1	51,05	52,1	51,05
450	45,6	49,37	51,3	51,05	52,1	51,05	52,1	51,05
480	49,8	50,73	51,8	51,05	52,1	51,05	52,1	51,05
510	52	50,99	51	51,05	52,1	51,05	52,1	51,05
540	51,9	51,04	52,2	51,05	52,1	51,05	52,1	51,05
570	52,1	51,05	51,6	51,05	52,1	51,05	52,1	51,05
600	51	51,05	52,1	51,05	52,1	51,05	52,1	51,05

umidade durante secagem a 51c

Tempo (min)	Sup exp (° C)	Sup est (° C)	Cam2 exp (° C)	Cam2 est (° C)	Cam3 exp (° C)	Cam3 est (° C)	Inf exp (° C)	Inf est (° C)
0	21,5	21	21,3	21	21,5	21,01	21	20,9
30	21,2	21,21	21,5	21,21	21,5	21,2	16	16,36
60	21,8	21,2	22,1	21,2	21,5	21,05	11,8	11,09
90	21,4	21,19	22	21,19	21,4	20,19	6,3	6,29
120	21,6	21,18	22,1	21,17	20,9	17,62	3,7	3,58
150	21,3	21,2	22	21,12	16,5	13,1	3,4	3,03
180	21,8	21,19	21	20,67	10,9	8,03	3,5	2,94
210	22,1	21,18	19,6	18,87	7,1	4,4	3,4	2,92
240	22,4	21,15	18,6	15,08	4,1	3,14	3,4	2,92
270	22	20,95	15,1	10	3,9	2,96	3,4	2,92
300	21,3	19,82	9,1	5,57	3,1	2,93	3,4	2,92
330	20	16,87	6,6	3,3	3,4	2,92	3,4	2,92
360	17,6	12,07	4,9	3	3,2	2,92	3,4	2,92
390	12,9	7,12	4,3	2,93	3,2	2,92	3,4	2,92
420	8,4	3,95	4	2,92	3,2	2,92	3,4	2,92
450	6,9	3,08	3,7	2,92	3,2	2,92	3,2	2,92
480	5	2,95	3,8	2,92	3,2	2,92	3,2	2,92
510	4,5	2,93	3,5	2,92	3,2	2,92	3,2	2,92
540	4,8	2,92	3,5	2,92	3,2	2,92	3,2	2,92
570	4,1	2,92	3,5	2,92	3,2	2,92	3,2	2,92
600	3,9	2,92	3,5	2,92	3,2	2,92	3,2	2,92

germinacao durante secagem a 51 c

Tempo (min)	Sup exp (° C)	Sup est (° C)	Cam2 exp (° C)	Cam2 est (° C)	Cam3 exp (° C)	Cam3 est (° C)	Inf exp (° C)	Inf est (° C)
0	93,6	93	94	93	93,7	93	93,5	93
30	92,7	92,77	93,6	92,76	93,5	92,75	92,7	92,78
60	93,3	92,48	92,7	92,47	93,3	92,46	92,3	92,6
90	93	92,19	93,7	92,18	93,5	92,18	92,7	92,47
120	93,7	91,89	93,5	91,88	92,5	91,92	92,5	92,32
150	93,3	91,59	93,7	91,58	92,7	91,71	92,3	92,08
180	93,3	91,27	93,5	91,27	92	91,56	92	91,77
210	93,5	90,95	92,5	90,97	92,3	91,41	91,6	91,44
240	92,5	90,63	92,3	90,72	92	91,19	91,5	91,1
270	92,7	90,29	92	90,53	91,7	90,87	91,6	90,75
300	92	89,95	91,3	90,37	91,5	90,52	91,7	90,39
330	91,7	89,66	91,5	90,18	91,6	90,16	91,5	90,03
360	91,5	89,42	91,6	89,87	91,1	89,78	90,7	89,65
390	91,6	89,24	91,5	89,49	90,5	89,4	90,7	89,26
420	91	89,06	90,7	89,1	90,7	89	90	88,86
450	91,3	88,78	90,7	88,7	90,3	88,59	89,8	88,45
480	91,3	88,38	90	88,28	90	88,18	89	88,03
510	90,7	87,96	90	87,86	89,7	87,75	88,5	87,59
540	90,5	87,53	90,7	87,42	89,3	87,31	88	87,15
570	90,7	87,09	89,7	86,98	90,7	86,86	87,5	86,7
600	90,3	86,63	90,1	86,52	88,3	86,4	87,5	86,23

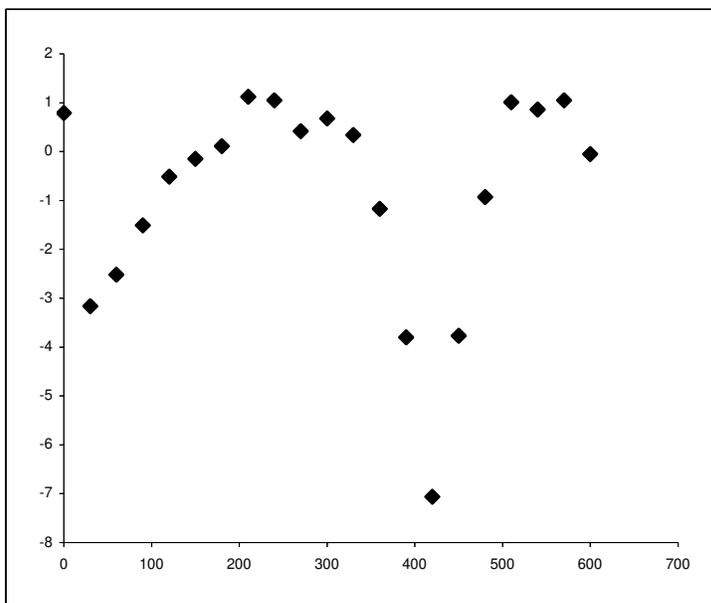


apendice04a1

**SUP**

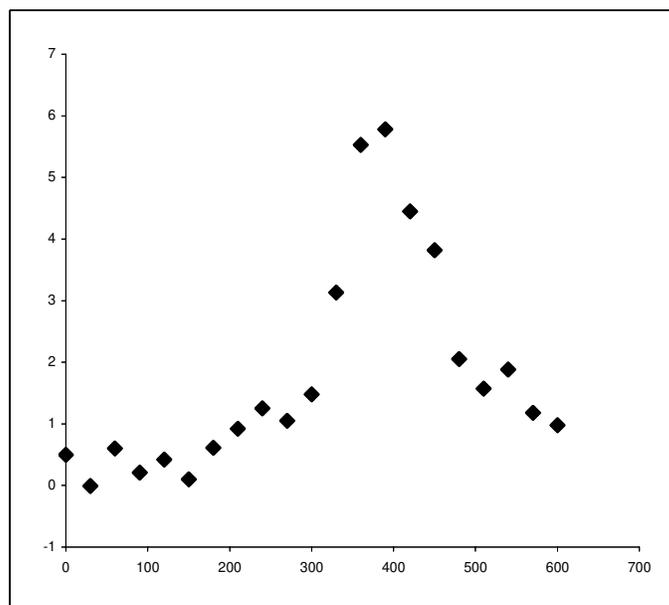
Temperatura

Resíduo	Mód Resíduo	Quadr residuo	Erro médio abs	Erro médio quadr
0,79	0,79	0,6241	1,527	5,059
-3,16	3,16	9,9856		
-2,52	2,52	6,3504		
-1,51	1,51	2,2801		
-0,51	0,51	0,2601		
-0,15	0,15	0,0225		
0,11	0,11	0,0121		
1,12	1,12	1,2544		
1,05	1,05	1,1025		
0,42	0,42	0,1764		
0,68	0,68	0,4624		
0,34	0,34	0,1156		
-1,17	1,17	1,3689		
-3,8	3,80	14,44		
-7,06	7,06	49,8436		
-3,77	3,77	14,2129		
-0,93	0,93	0,8649		
1,01	1,01	1,0201		
0,86	0,86	0,7396		
1,05	1,05	1,1025		
-0,05	0,05	0,0025		



Umidade

Resíduo	Resíduo	residuo	absoluto	quadrado
0,5	0,50	0,25	1,787	6,079
-0,01	0,01	0,0001		
0,6	0,60	0,36		
0,21	0,21	0,0441		
0,42	0,42	0,1764		
0,1	0,10	0,01		
0,61	0,61	0,3721		
0,92	0,92	0,8464		
1,25	1,25	1,5625		
1,05	1,05	1,1025		
1,48	1,48	2,1904		
3,13	3,13	9,7969		
5,53	5,53	30,5809		
5,78	5,78	33,4084		
4,45	4,45	19,8025		
3,82	3,82	14,5924		
2,05	2,05	4,2025		
1,57	1,57	2,4649		
1,88	1,88	3,5344		
1,18	1,18	1,3924		
0,98	0,98	0,9604		

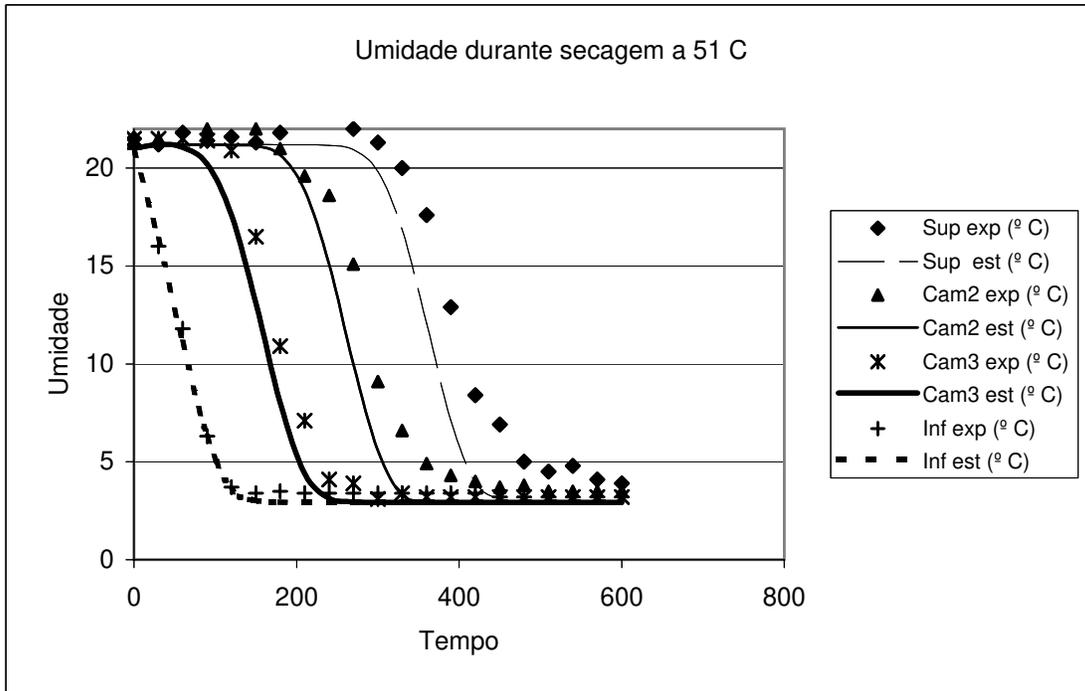
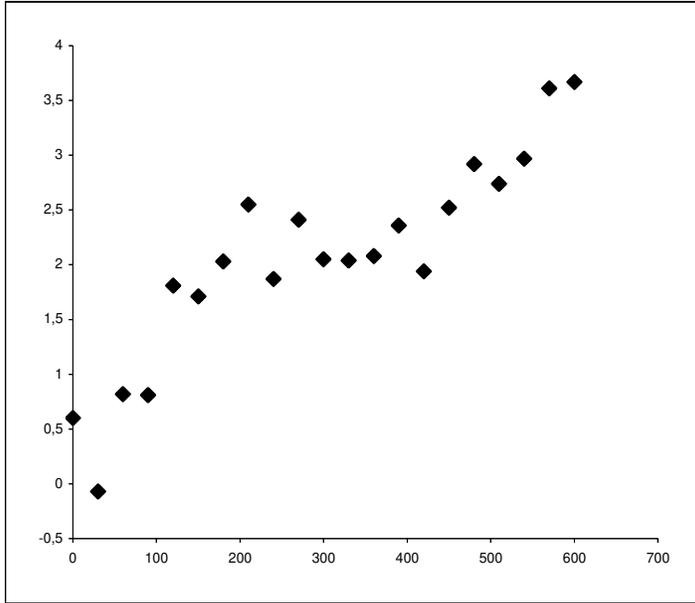


apendice04a1

Germinação

Resíduo    Resíduo    residuo    absoluto    quadrado

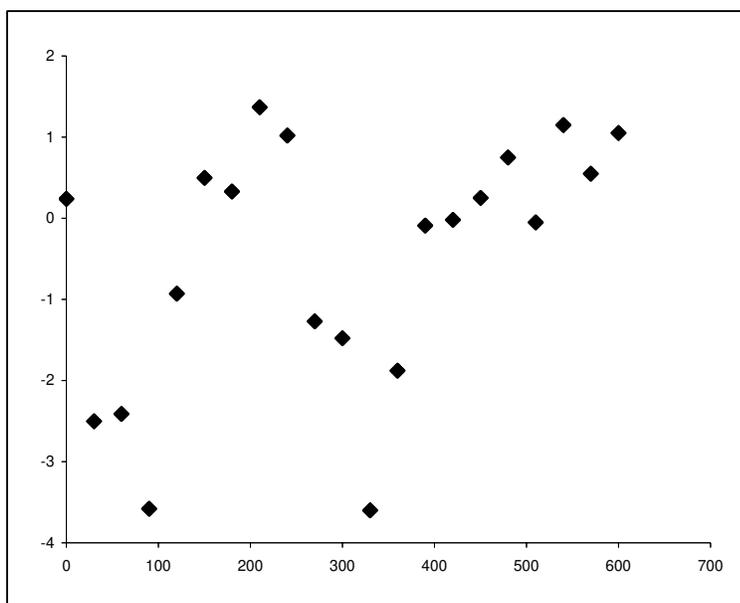
0,6	0,60	0,36	2,075	5,122
-0,07	0,07	0,0049		
0,82	0,82	0,6724		
0,81	0,81	0,6561		
1,81	1,81	3,2761		
1,71	1,71	2,9241		
2,03	2,03	4,1209		
2,55	2,55	6,5025		
1,87	1,87	3,4969		
2,41	2,41	5,8081		
2,05	2,05	4,2025		
2,04	2,04	4,1616		
2,08	2,08	4,3264		
2,36	2,36	5,5696		
1,94	1,94	3,7636		
2,52	2,52	6,3504		
2,92	2,92	8,5264		
2,74	2,74	7,5076		
2,97	2,97	8,8209		
3,61	3,61	13,0321		
3,67	3,67	13,4689		



**C2**

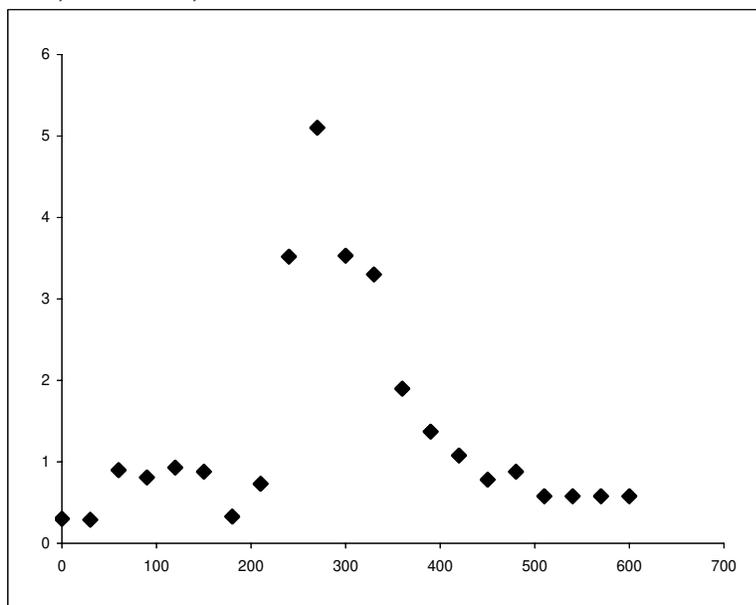
Temperatura

Resíduo	Resíduo	do residuo	absoluto	quadrado
0,24	0,24	0,0576	1,191	2,511
-2,5	2,50	6,25		
-2,41	2,41	5,8081		
-3,58	3,58	12,8164		
-0,93	0,93	0,8649		
0,5	0,50	0,25		
0,33	0,33	0,1089		
1,37	1,37	1,8769		
1,02	1,02	1,0404		
-1,27	1,27	1,6129		
-1,48	1,48	2,1904		
-3,6	3,60	12,96		
-1,88	1,88	3,5344		
-0,09	0,09	0,0081		
-0,02	0,02	0,0004		
0,25	0,25	0,0625		
0,75	0,75	0,5625		
-0,05	0,05	0,0025		
1,15	1,15	1,3225		
0,55	0,55	0,3025		
1,05	1,05	1,1025		



Umidade

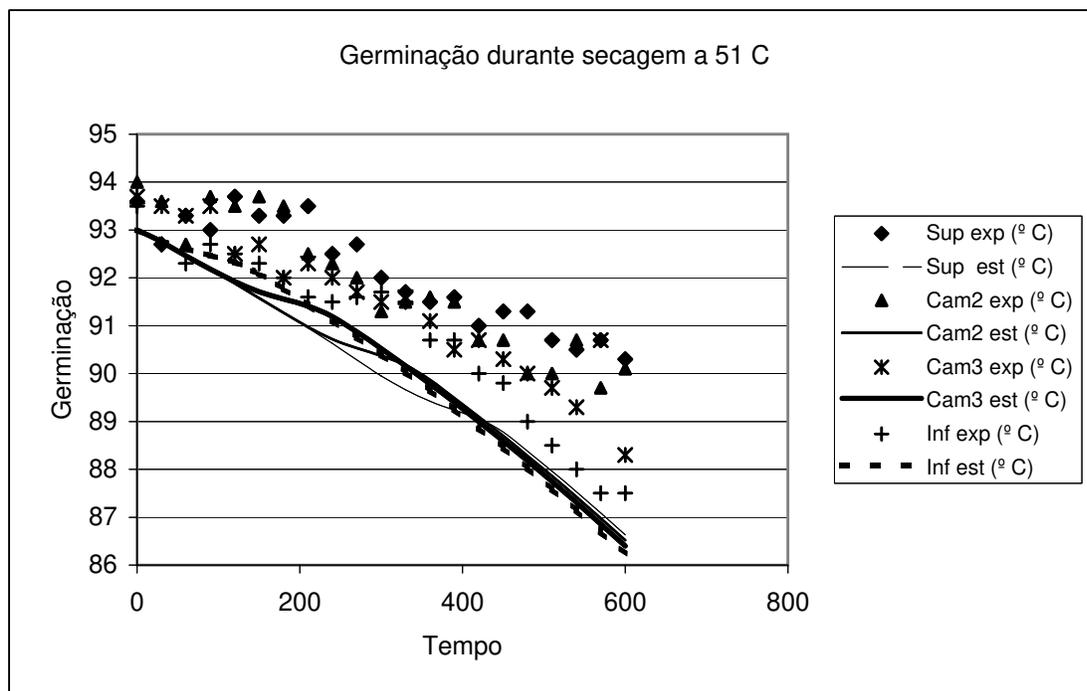
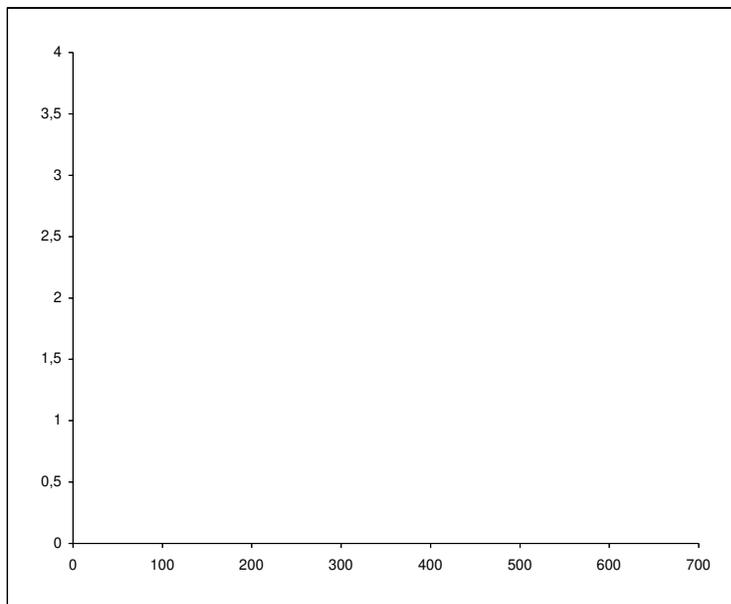
Resíduo	Resíduo	do residuo	absoluto	quadrado
0,3	0,30	0,09	1,379	3,574
0,29	0,29	0,0841		
0,9	0,90	0,81		
0,81	0,81	0,6561		
0,93	0,93	0,8649		
0,88	0,88	0,7744		
0,33	0,33	0,1089		
0,73	0,73	0,5329		
3,52	3,52	12,3904		
5,1	5,10	26,01		
3,53	3,53	12,4609		
3,3	3,30	10,89		
1,9	1,90	3,61		
1,37	1,37	1,8769		
1,08	1,08	1,1664		
0,78	0,78	0,6084		
0,88	0,88	0,7744		
0,58	0,58	0,3364		
0,58	0,58	0,3364		
0,58	0,58	0,3364		
0,58	0,58	0,3364		



Germinação

Resíduo Resíduo do residuo absoluto quadrado

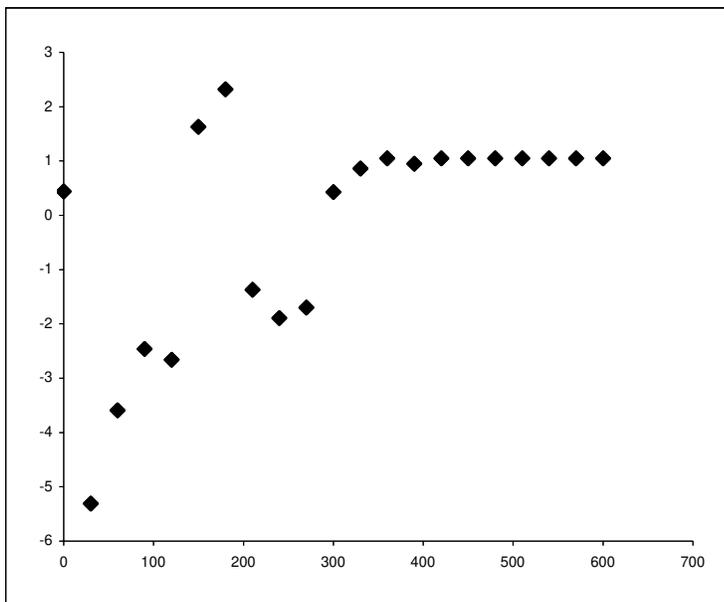
1	1,00	1	1,770	3,708
0,84	0,84	0,7056		
0,23	0,23	0,0529		
1,52	1,52	2,3104		
1,62	1,62	2,6244		
2,12	2,12	4,4944		
2,23	2,23	4,9729		
1,53	1,53	2,3409		
1,58	1,58	2,4964		
1,47	1,47	2,1609		
0,93	0,93	0,8649		
1,32	1,32	1,7424		
1,73	1,73	2,9929		
2,01	2,01	4,0401		
1,6	1,60	2,56		
2	2,00	4		
1,72	1,72	2,9584		
2,14	2,14	4,5796		
3,28	3,28	10,7584		
2,72	2,72	7,3984		
3,58	3,58	12,8164		



**C3**

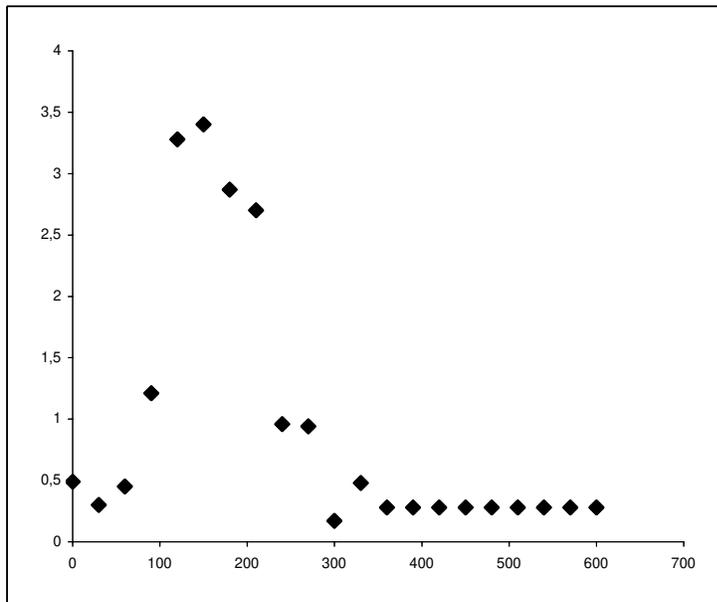
Temperatura

Resíduo	Resíduo	do residuo	absoluto	quadrado
0,44	0,44	0,1936	1,620	3,878
-5,31	5,31	28,1961		
-3,59	3,59	12,8881		
-2,46	2,46	6,0516		
-2,66	2,66	7,0756		
1,63	1,63	2,6569		
2,32	2,32	5,3824		
-1,37	1,37	1,8769		
-1,89	1,89	3,5721		
-1,7	1,70	2,89		
0,43	0,43	0,1849		
0,86	0,86	0,7396		
1,05	1,05	1,1025		
0,95	0,95	0,9025		
1,05	1,05	1,1025		
1,05	1,05	1,1025		
1,05	1,05	1,1025		
1,05	1,05	1,1025		
1,05	1,05	1,1025		
1,05	1,05	1,1025		
1,05	1,05	1,1025		
1,05	1,05	1,1025		
1,05	1,05	1,1025		



Umidade

Resíduo	Resíduo	do residuo	absoluto	quadrado
0,49	0,49	0,2401	0,941	2,029
0,3	0,30	0,09		
0,45	0,45	0,2025		
1,21	1,21	1,4641		
3,28	3,28	10,7584		
3,4	3,40	11,56		
2,87	2,87	8,2369		
2,7	2,70	7,29		
0,96	0,96	0,9216		
0,94	0,94	0,8836		
0,17	0,17	0,0289		
0,48	0,48	0,2304		
0,28	0,28	0,0784		
0,28	0,28	0,0784		
0,28	0,28	0,0784		
0,28	0,28	0,0784		
0,28	0,28	0,0784		
0,28	0,28	0,0784		
0,28	0,28	0,0784		
0,28	0,28	0,0784		
0,28	0,28	0,0784		
0,28	0,28	0,0784		
0,28	0,28	0,0784		

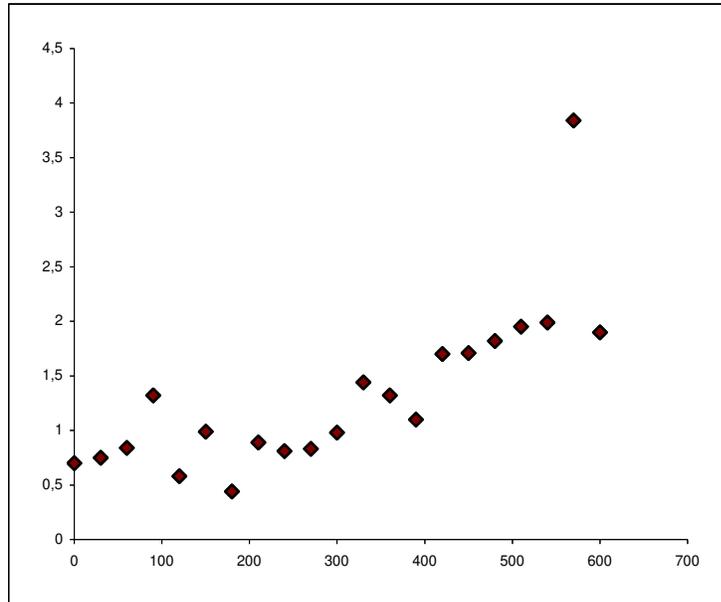


apendice04a1

Germinação

Resíduo      Resíduo      do residuo      absoluto      quadrado

0,7	0,70	0,49	1,329	2,304
0,75	0,75	0,5625		
0,84	0,84	0,7056		
1,32	1,32	1,7424		
0,58	0,58	0,3364		
0,99	0,99	0,9801		
0,44	0,44	0,1936		
0,89	0,89	0,7921		
0,81	0,81	0,6561		
0,83	0,83	0,6889		
0,98	0,98	0,9604		
1,44	1,44	2,0736		
1,32	1,32	1,7424		
1,1	1,10	1,21		
1,7	1,70	2,89		
1,71	1,71	2,9241		
1,82	1,82	3,3124		
1,95	1,95	3,8025		
1,99	1,99	3,9601		
3,84	3,84	14,7456		
1,9	1,90	3,61		



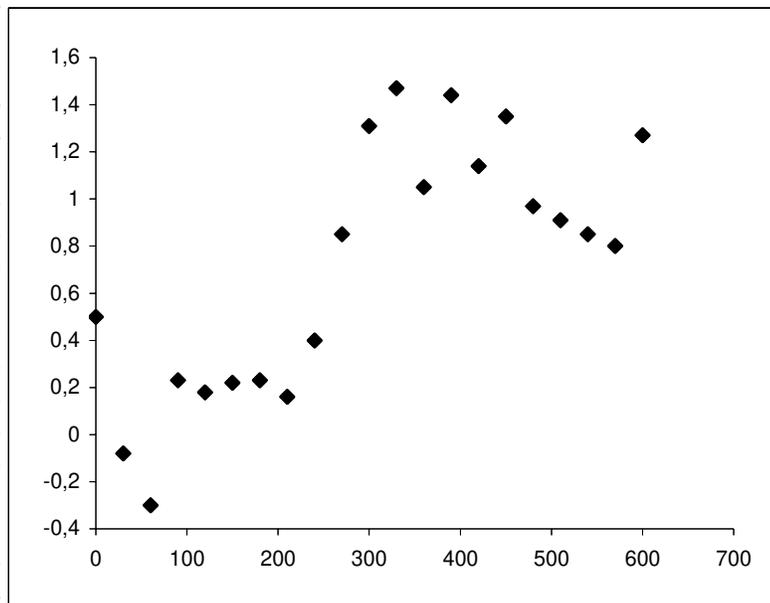


apendice04a1

Germinação

Resíduo      Resíduo      do resíduo      absoluto      quadrado

0,5	0,50	0,25	0,748	0,779
-0,08	0,08	0,0064		
-0,3	0,30	0,09		
0,23	0,23	0,0529		
0,18	0,18	0,0324		
0,22	0,22	0,0484		
0,23	0,23	0,0529		
0,16	0,16	0,0256		
0,4	0,40	0,16		
0,85	0,85	0,7225		
1,31	1,31	1,7161		
1,47	1,47	2,1609		
1,05	1,05	1,1025		
1,44	1,44	2,0736		
1,14	1,14	1,2996		
1,35	1,35	1,8225		
0,97	0,97	0,9409		
0,91	0,91	0,8281		
0,85	0,85	0,7225		
0,8	0,80	0,64		
1,27	1,27	1,6129		



apendice04b1

temperatura durante secagem a 61c

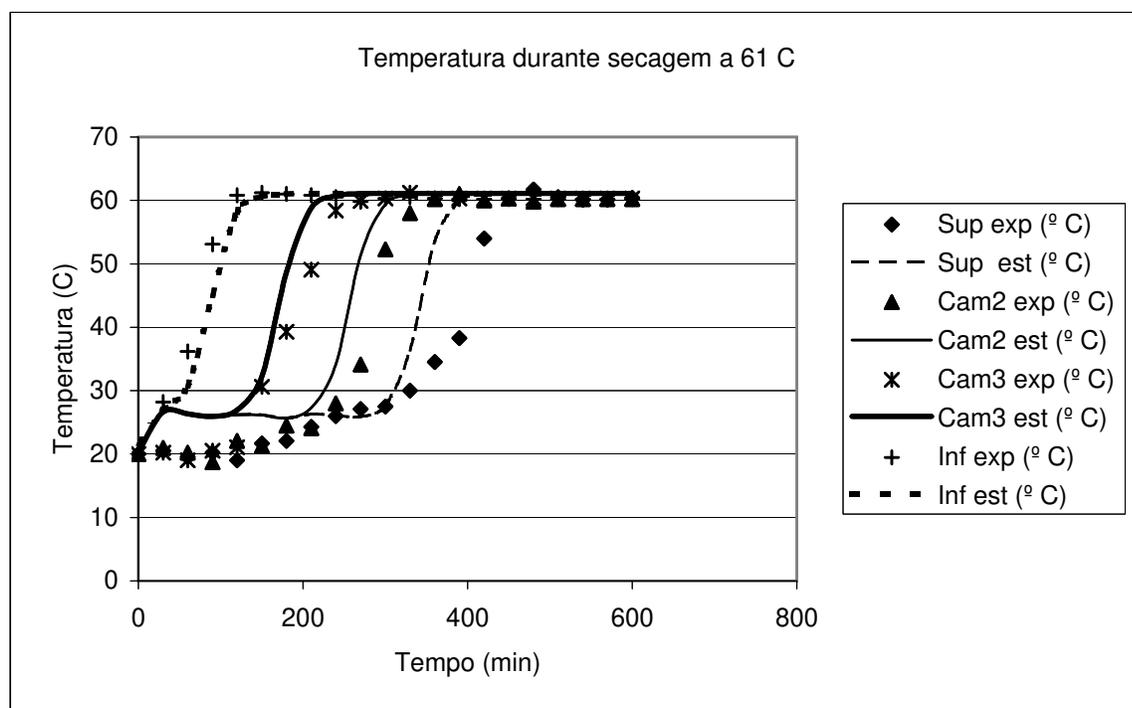
Tempo (min)	Sup exp (° C)	Sup est (° C)	Cam2 exp (° C)	Cam2 est (° C)	Cam3 exp (° C)	Cam3 est (° C)	Inf exp (° C)	Inf est (° C)
0	20	20.02	20	20.09	20	20.4	20	21.71
30	20.5	26.6	21	26.64	20.2	26.65	28.2	27.02
60	19.5	26.41	20.2	26.37	19	26.32	36.2	30.73
90	20.2	25.9	18.7	25.89	20.5	25.94	53.1	45
120	19	26.2	22.1	26.25	21.1	26.94	60.8	58.14
150	21.7	26.2	21.3	26.16	30.6	32.25	61.2	60.63
180	22.1	25.66	24.5	25.68	39.3	48.65	61	61.04
210	24.3	26.3	24.1	27.28	49.1	58.82	60.8	61.1
240	26	26.08	28	34.14	58.4	60.74	60.5	61.11
270	27.1	25.89	34.1	51.34	59.9	61.05	59.8	61.11
300	27.5	27.72	52.3	59.38	60.3	61.1	60.3	61.11
330	30	36.36	58	60.83	61.2	61.11	60.5	61.11
360	34.5	53.56	60.2	61.07	60.3	61.11	60.3	61.11
390	38.3	59.81	61	61.11	60.3	61.11	60.2	61.11
420	54	60.9	60	61.11	60.3	61.11	60.2	61.11
450	60.3	61.08	60.3	61.11	60.3	61.11	60.2	61.11
480	61.7	61.11	59.8	61.11	60.3	61.11	60.2	61.11
510	60.5	61.11	60.2	61.11	60.3	61.11	60.2	61.11
540	60.1	61.11	60.2	61.11	60.3	61.11	60.2	61.11
570	60.1	61.11	60.2	61.11	60.3	61.11	60.2	61.11
600	60.4	61.11	60.2	61.11	60.3	61.11	60.2	61.11

umidade durante secagem a 61c

Tempo (min)	Sup exp (° C)	Sup est (° C)	Cam2 exp (° C)	Cam2 est (° C)	Cam3 exp (° C)	Cam3 est (° C)	Inf exp (° C)	Inf est (° C)
0	21	21	21	21	21	21.02	21	20.89
30	21.2	21.33	22	21.33	21.5	21.31	15.8	15.18
60	22.5	21.32	21.6	21.31	20.1	20.98	12.8	8.51
90	21.9	21.29	20.1	21.29	18.7	18.96	6.9	3.66
120	21	21.31	19.9	21.26	16.8	13.86	4	2.52
150	22.1	21.31	20.2	20.8	12.1	7.52	3.7	2.33
180	21.3	21.27	21	18.31	9.5	3.36	3.1	2.3
210	21.8	21.24	17.5	12.88	4.7	2.46	2.9	2.29
240	21.6	20.6	10.4	6.63	3.1	2.32	2.4	2.29
270	18.6	17.62	10.7	3.1	2.8	2.3	2.6	2.29
300	14.5	11.88	3.9	2.42	3.1	2.29	2.4	2.29
330	9.5	5.8	2.1	2.31	2.5	2.29	2.3	2.29
360	5.5	2.9	2.4	2.3	2.7	2.29	2.2	2.29
390	3.3	2.39	2.3	2.29	2.4	2.29	2.3	2.29
420	3.1	2.31	2.1	2.29	2.2	2.29	2.4	2.29
450	3.8	2.3	2.3	2.29	2.5	2.29	2.2	2.29
480	2.3	2.29	2.2	2.29	2.3	2.29	2.2	2.29
510	3.8	2.29	2.2	2.29	2.2	2.29	2.2	2.29
540	2.5	2.29	2.2	2.29	2.2	2.29	2.2	2.29
570	2.5	2.29	2.2	2.29	2.2	2.29	2.2	2.29
600	2.4	2.29	2.2	2.29	2.2	2.29	2.2	2.29

germinacao durante secagem a 61 c

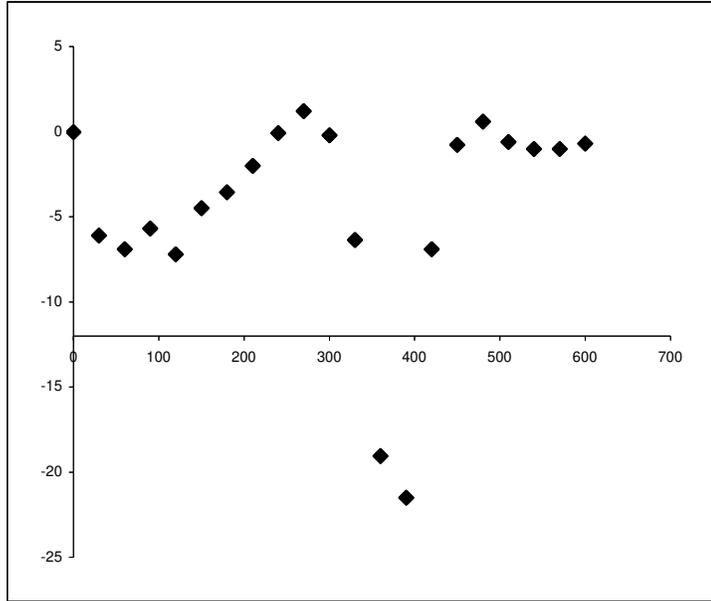
Tempo (min)	Sup exp (° C)	Sup est (° C)	Cam2 exp (° C)	Cam2 est (° C)	Cam3 exp (° C)	Cam3 est (° C)	Inf exp (° C)	Inf est (° C)
0	93	93	93	93	93	93	93	93
30	92.7	92.73	93.3	92.71	91.7	92.69	92.5	92.73
60	92.5	92.36	92.5	92.34	92.5	92.32	91.7	92.53
90	93.1	91.99	91.7	91.97	92.3	91.98	91.7	92.35
120	91.7	91.62	91.6	91.6	91.7	91.71	90.2	91.96
150	92.3	91.22	92	91.2	92.3	91.51	91.7	91.36
180	91.7	90.82	92.5	90.84	91.5	91.29	91.7	90.69
210	91.3	90.41	90.2	90.55	88.8	90.81	88.8	89.97
240	91	89.97	90.2	90.34	87.8	90.14	87.2	89.21
270	90.2	89.58	89.2	90.07	87.5	89.4	87.5	88.4
300	90.2	89.28	88.6	89.5	87.5	88.61	86.2	87.56
330	90.2	89.06	88	88.75	86.4	87.77	86	86.68
360	90	88.73	86.8	87.94	86.5	86.9	86.2	85.75
390	88.8	88.06	86.6	87.07	86.3	85.98	86	84.78
420	89.3	87.23	85.9	86.16	86	85.02	86	83.77
450	87	86.33	86.5	85.21	86	84.02	86	82.71
480	87.7	85.39	86.1	84.21	86.1	82.97	85.8	81.61
510	88.2	84.41	86	83.18	84.3	81.89	84.9	80.47
540	87.8	83.38	84.3	82.1	82.5	80.76	84	79.29
570	86	82.3	85	80.97	82.2	79.58	82.2	78.06
600	85	81.19	85.5	79.81	83.1	78.37	81.5	76.8



apendice04b1

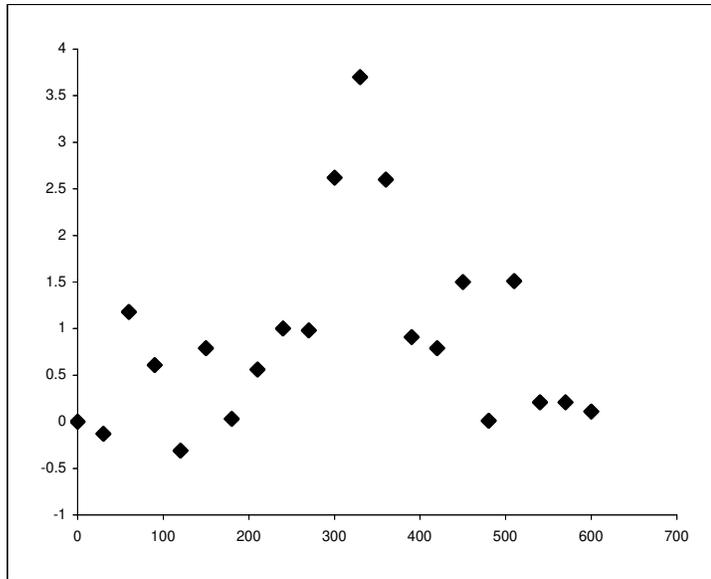
Temperatura

Resíduo	Módulo Resíduo	residuo	absoluto	Erro médio quadrado
-0.02	0.02	0.0004	4.573	53.601
-6.1	6.10	37.21		
-6.91	6.91	47.7481		
-5.7	5.70	32.49		
-7.2	7.20	51.84		
-4.5	4.50	20.25		
-3.56	3.56	12.6736		
-2	2.00	4		
-0.08	0.08	0.0064		
1.21	1.21	1.4641		
-0.22	0.22	0.0484		
-6.36	6.36	40.4496		
-19.06	19.06	363.2836		
-21.51	21.51	462.6801		
-6.9	6.90	47.61		
-0.78	0.78	0.6084		
0.59	0.59	0.3481		
-0.61	0.61	0.3721		
-1.01	1.01	1.0201		
-1.01	1.01	1.0201		
-0.71	0.71	0.5041		



Umidade

Resíduo	Módulo Resíduo	residuo	absoluto	Erro médio quadrado
0	0.00	0	0.941	1.818
-0.13	0.13	0.0169		
1.18	1.18	1.3924		
0.61	0.61	0.3721		
-0.31	0.31	0.0961		
0.79	0.79	0.6241		
0.03	0.03	0.0009		
0.56	0.56	0.3136		
1	1.00	1		
0.98	0.98	0.9604		
2.62	2.62	6.8644		
3.7	3.70	13.69		
2.6	2.60	6.76		
0.91	0.91	0.8281		
0.79	0.79	0.6241		
1.5	1.50	2.25		
0.01	0.01	1E-04		
1.51	1.51	2.2801		
0.21	0.21	0.0441		
0.21	0.21	0.0441		
0.11	0.11	0.0121		



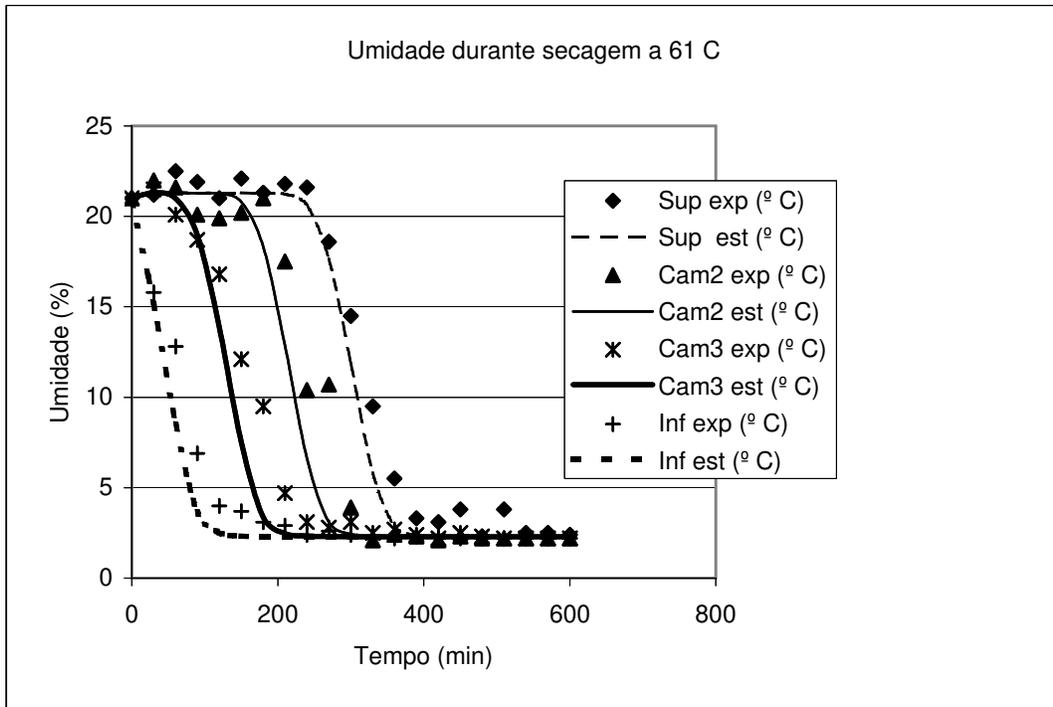
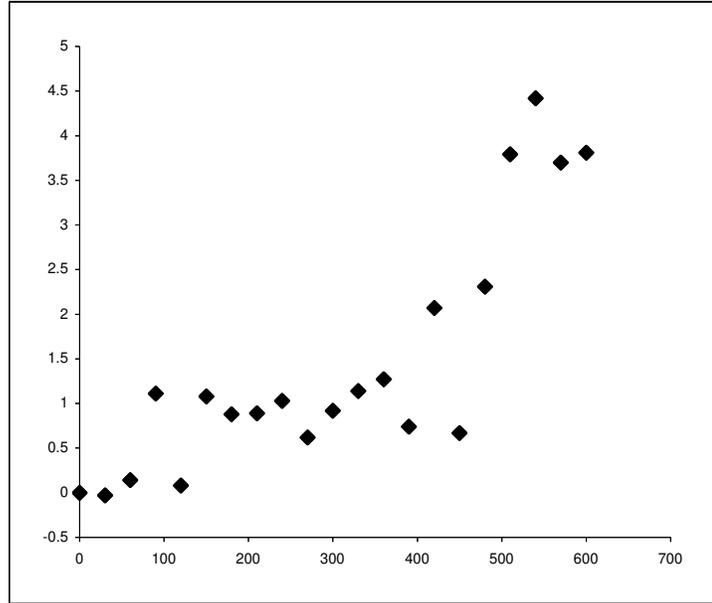
apendice04b1

Germinação  
 Resíduo Módulo Resíduo residuo absoluto Erro médio quadrado

0	0.00	0
-0.03	0.03	0.0009
0.14	0.14	0.0196
1.11	1.11	1.2321
0.08	0.08	0.0064
1.08	1.08	1.1664
0.88	0.88	0.7744
0.89	0.89	0.7921
1.03	1.03	1.0609
0.62	0.62	0.3844
0.92	0.92	0.8464
1.14	1.14	1.2996
1.27	1.27	1.6129
0.74	0.74	0.5476
2.07	2.07	4.2849
0.67	0.67	0.4489
2.31	2.31	5.3361
3.79	3.79	14.3641
4.42	4.42	19.5364
3.7	3.70	13.69
3.81	3.81	14.5161

1.462

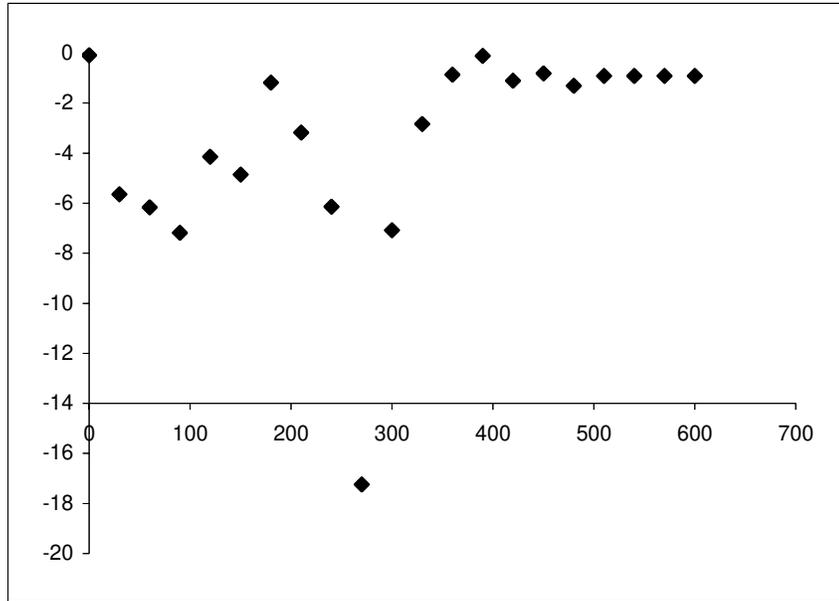
3.901



apendice04b1

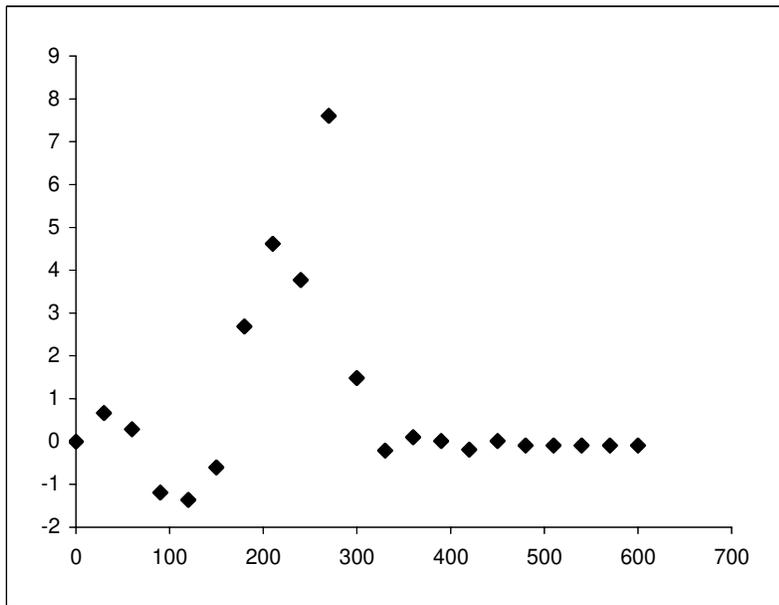
Temperatura

Resíduo	Resíduo	o do	médio	médio
-0.09	0.09	0.0081	3.505	27.365
-5.64	5.64	31.8096		
-6.17	6.17	38.0689		
-7.19	7.19	51.6961		
-4.15	4.15	17.2225		
-4.86	4.86	23.6196		
-1.18	1.18	1.3924		
-3.18	3.18	10.1124		
-6.14	6.14	37.6996		
-17.24	17.24	297.218		
-7.08	7.08	50.1264		
-2.83	2.83	8.0089		
-0.87	0.87	0.7569		
-0.11	0.11	0.0121		
-1.11	1.11	1.2321		
-0.81	0.81	0.6561		
-1.31	1.31	1.7161		
-0.91	0.91	0.8281		
-0.91	0.91	0.8281		
-0.91	0.91	0.8281		
-0.91	0.91	0.8281		



Umidade

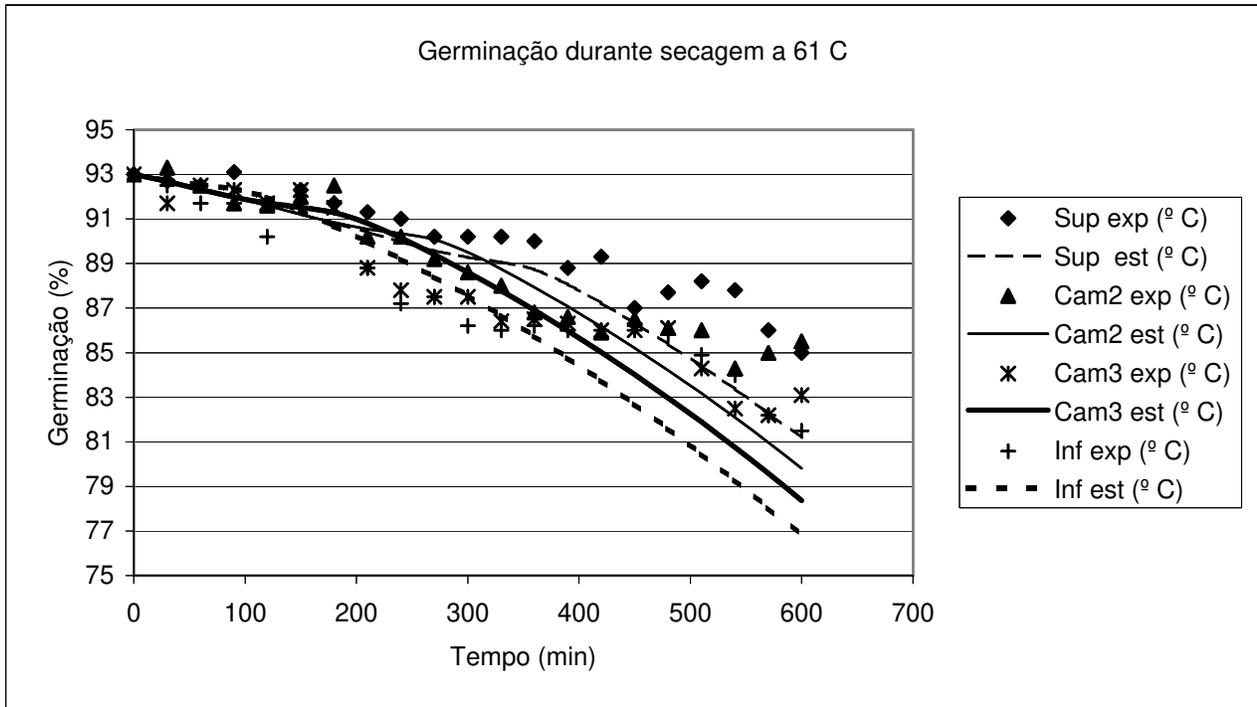
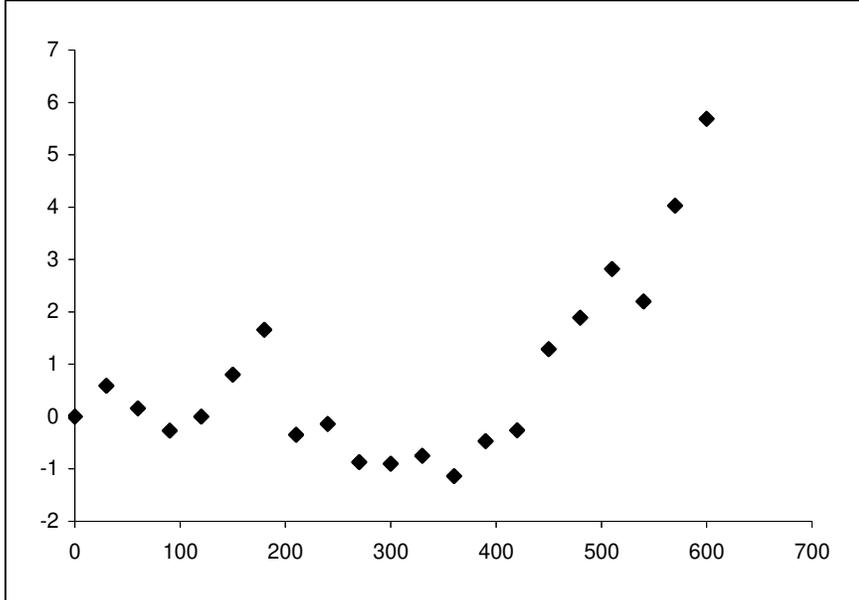
Resíduo	Resíduo	o do	médio	médio
0	0.00	0	1.202	5.097
0.67	0.67	0.4489		
0.29	0.29	0.0841		
-1.19	1.19	1.4161		
-1.36	1.36	1.8496		
-0.6	0.60	0.36		
2.69	2.69	7.2361		
4.62	4.62	21.3444		
3.77	3.77	14.2129		
7.6	7.60	57.76		
1.48	1.48	2.1904		
-0.21	0.21	0.0441		
0.1	0.10	0.01		
0.01	0.01	1E-04		
-0.19	0.19	0.0361		
0.01	0.01	1E-04		
-0.09	0.09	0.0081		
-0.09	0.09	0.0081		
-0.09	0.09	0.0081		
-0.09	0.09	0.0081		
-0.09	0.09	0.0081		



Germinação

Resíduo Resíduo o do médio médio

0	0.00	0	1.251	3.540
0.59	0.59	0.3481		
0.16	0.16	0.0256		
-0.27	0.27	0.0729		
0	0.00	0		
0.8	0.80	0.64		
1.66	1.66	2.7556		
-0.35	0.35	0.1225		
-0.14	0.14	0.0196		
-0.87	0.87	0.7569		
-0.9	0.90	0.81		
-0.75	0.75	0.5625		
-1.14	1.14	1.2996		
-0.47	0.47	0.2209		
-0.26	0.26	0.0676		
1.29	1.29	1.6641		
1.89	1.89	3.5721		
2.82	2.82	7.9524		
2.2	2.20	4.84		
4.03	4.03	16.2409		
5.69	5.69	32.3761		





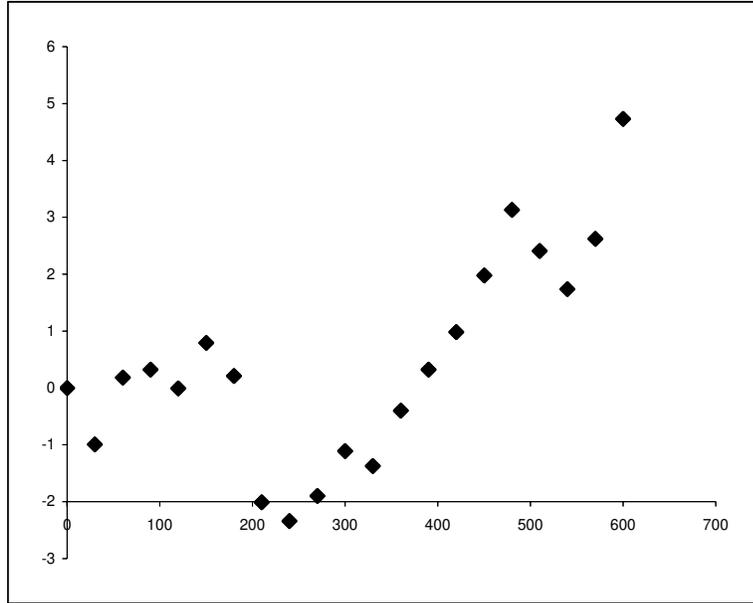
apendice04b1

Germinação

Resíduo      Resíduo      do residuo      absoluto      quadrado

0	0.00	0
-0.99	0.99	0.9801
0.18	0.18	0.0324
0.32	0.32	0.1024
-0.01	0.01	1E-04
0.79	0.79	0.6241
0.21	0.21	0.0441
-2.01	2.01	4.0401
-2.34	2.34	5.4756
-1.9	1.90	3.61
-1.11	1.11	1.2321
-1.37	1.37	1.8769
-0.4	0.40	0.16
0.32	0.32	0.1024
0.98	0.98	0.9604
1.98	1.98	3.9204
3.13	3.13	9.7969
2.41	2.41	5.8081
1.74	1.74	3.0276
2.62	2.62	6.8644
4.73	4.73	22.3729

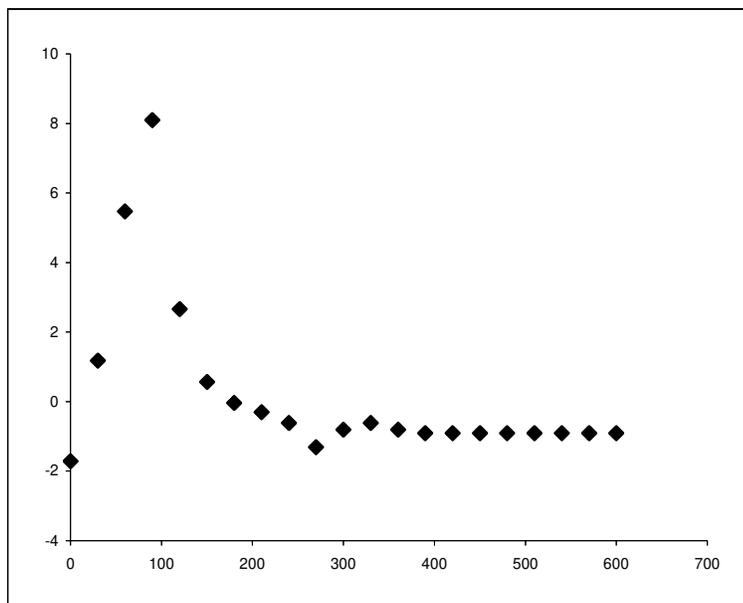
1.407      3.382



apendice04b1

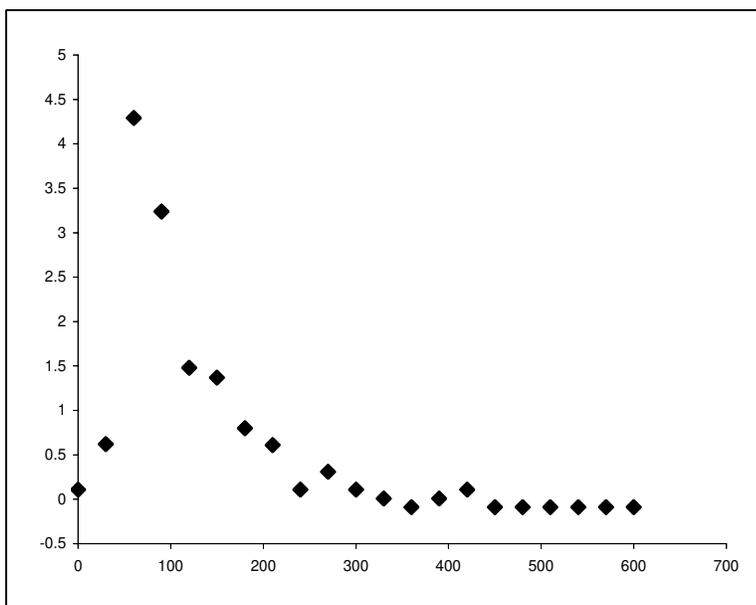
Temperatura

Resíduo	Resíduo	do residuo	absoluto	quadrado
-1.71	1.71	2.9241	1.498	5.607
1.18	1.18	1.3924		
5.47	5.47	29.9209		
8.1	8.10	65.61		
2.66	2.66	7.0756		
0.57	0.57	0.3249		
-0.04	0.04	0.0016		
-0.3	0.30	0.09		
-0.61	0.61	0.3721		
-1.31	1.31	1.7161		
-0.81	0.81	0.6561		
-0.61	0.61	0.3721		
-0.81	0.81	0.6561		
-0.91	0.91	0.8281		
-0.91	0.91	0.8281		
-0.91	0.91	0.8281		
-0.91	0.91	0.8281		
-0.91	0.91	0.8281		
-0.91	0.91	0.8281		
-0.91	0.91	0.8281		
-0.91	0.91	0.8281		
-0.91	0.91	0.8281		
-0.91	0.91	0.8281		
-0.91	0.91	0.8281		



Umidade

Resíduo	Resíduo	do residuo	absoluto	quadrado
0.11	0.11	0.0121	0.658	1.646
0.62	0.62	0.3844		
4.29	4.29	18.4041		
3.24	3.24	10.4976		
1.48	1.48	2.1904		
1.37	1.37	1.8769		
0.8	0.80	0.64		
0.61	0.61	0.3721		
0.11	0.11	0.0121		
0.31	0.31	0.0961		
0.11	0.11	0.0121		
0.01	0.01	1E-04		
-0.09	0.09	0.0081		
0.01	0.01	1E-04		
0.11	0.11	0.0121		
-0.09	0.09	0.0081		
-0.09	0.09	0.0081		
-0.09	0.09	0.0081		
-0.09	0.09	0.0081		
-0.09	0.09	0.0081		
-0.09	0.09	0.0081		
-0.09	0.09	0.0081		

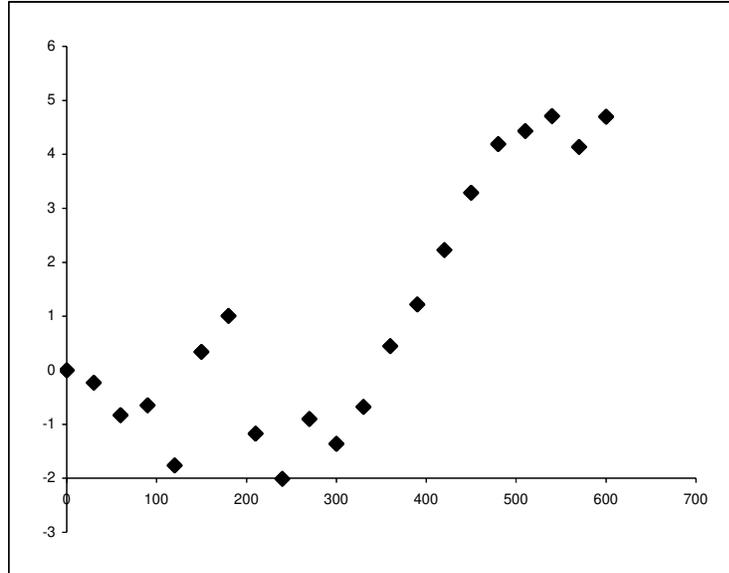


apendice04b1

Germinação  
 Resíduo Resíduo do resíduo absoluto quadrado

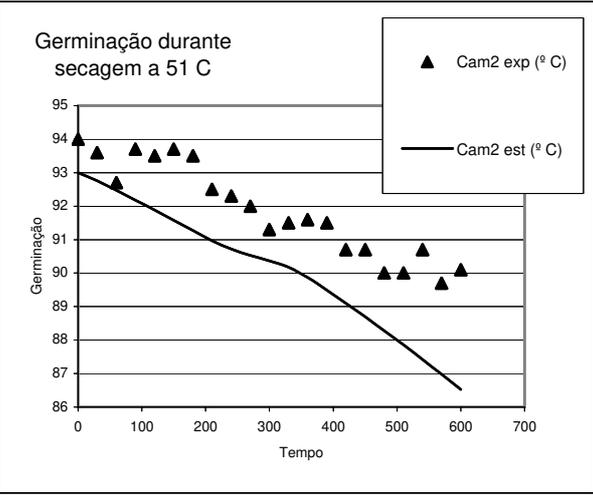
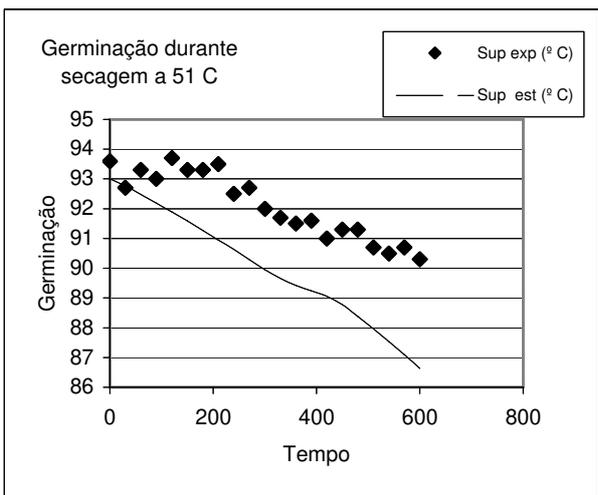
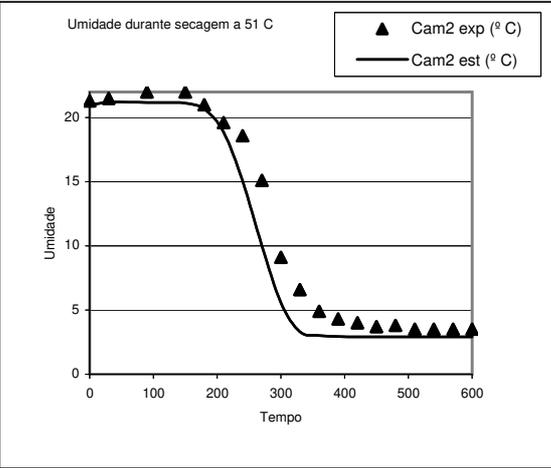
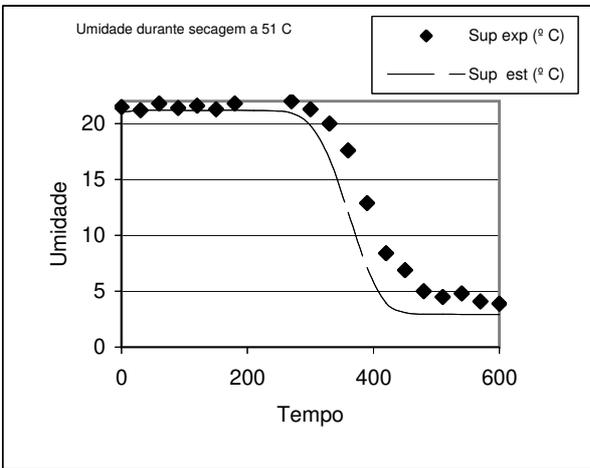
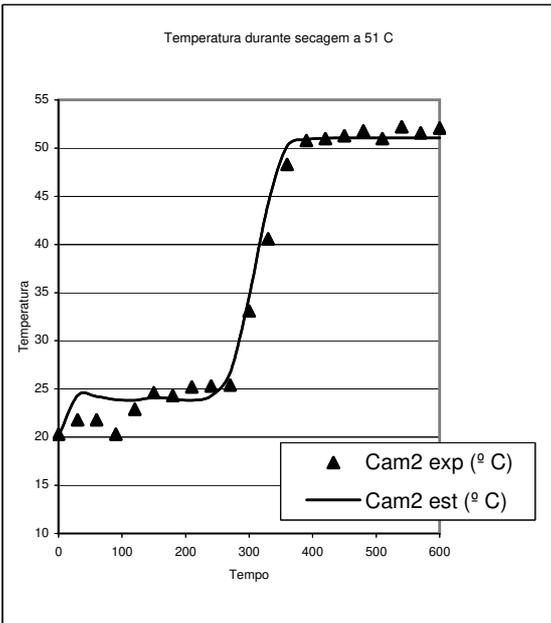
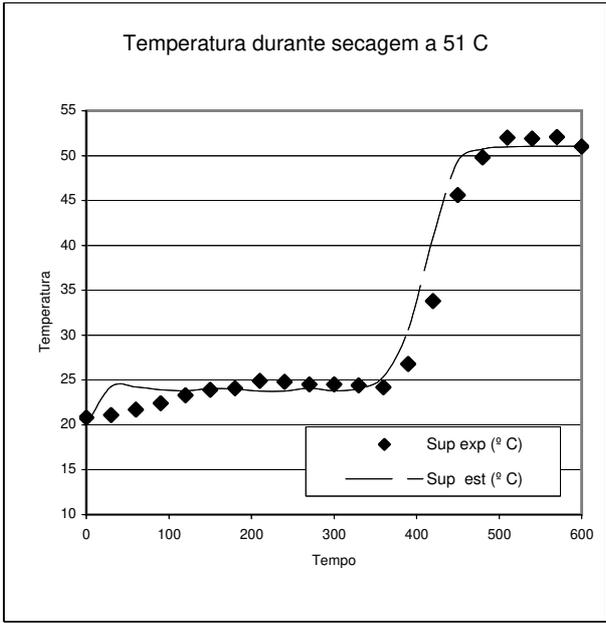
0	0.00	0
-0.23	0.23	0.0529
-0.83	0.83	0.6889
-0.65	0.65	0.4225
-1.76	1.76	3.0976
0.34	0.34	0.1156
1.01	1.01	1.0201
-1.17	1.17	1.3689
-2.01	2.01	4.0401
-0.9	0.90	0.81
-1.36	1.36	1.8496
-0.68	0.68	0.4624
0.45	0.45	0.2025
1.22	1.22	1.4884
2.23	2.23	4.9729
3.29	3.29	10.8241
4.19	4.19	17.5561
4.43	4.43	19.6249
4.71	4.71	22.1841
4.14	4.14	17.1396
4.7	4.70	22.09

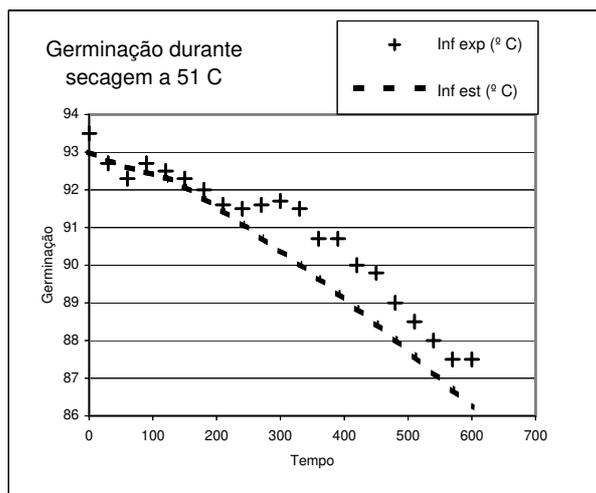
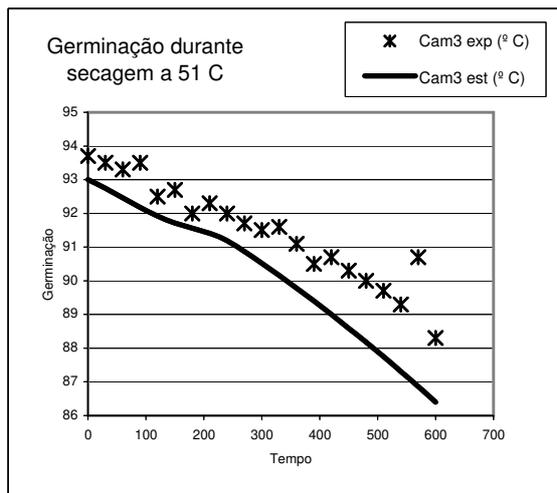
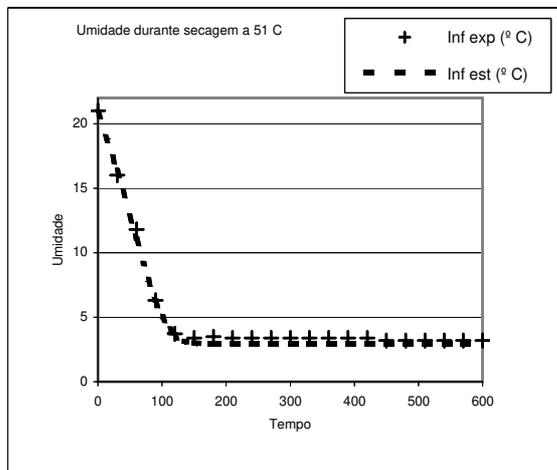
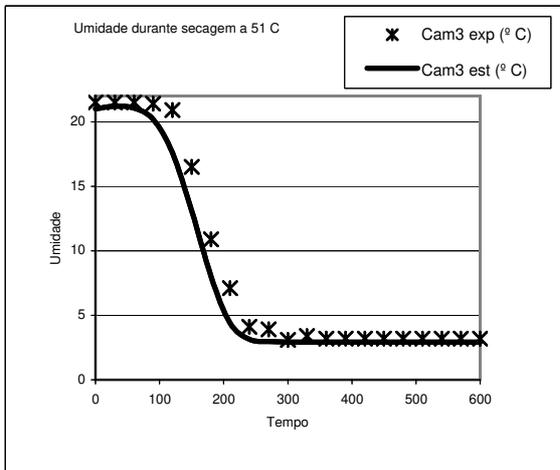
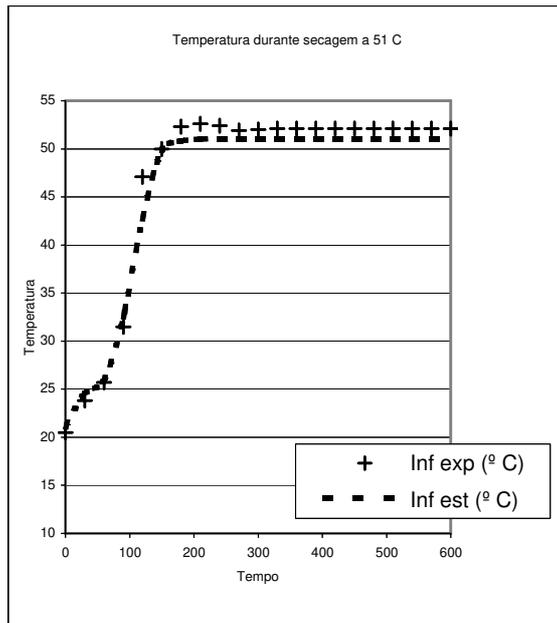
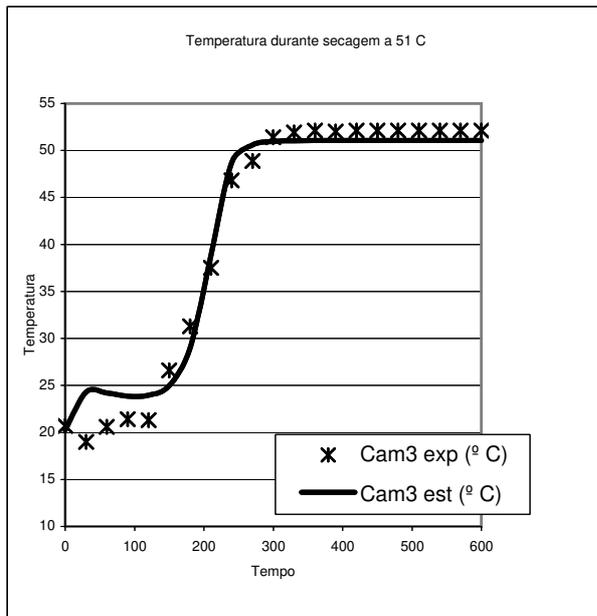
1.919 6.191

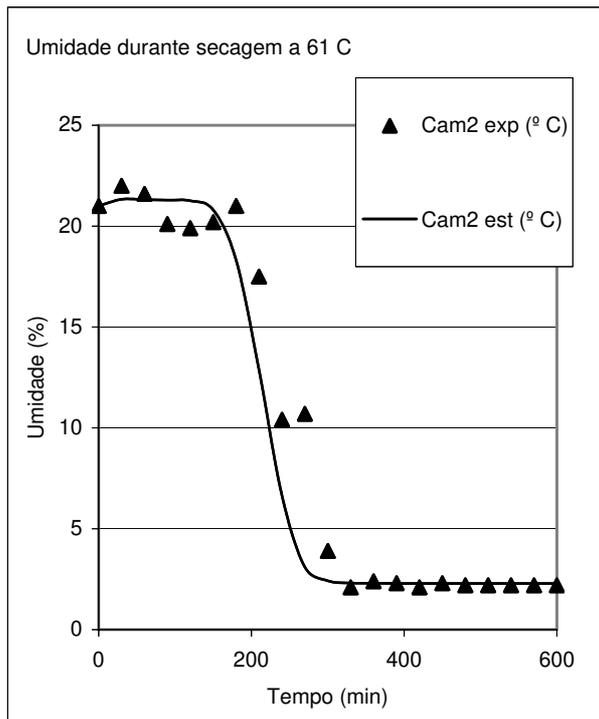
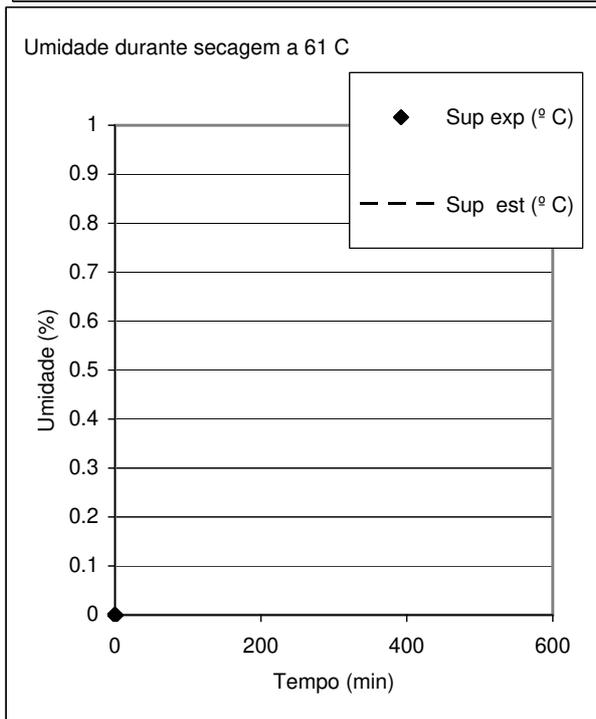
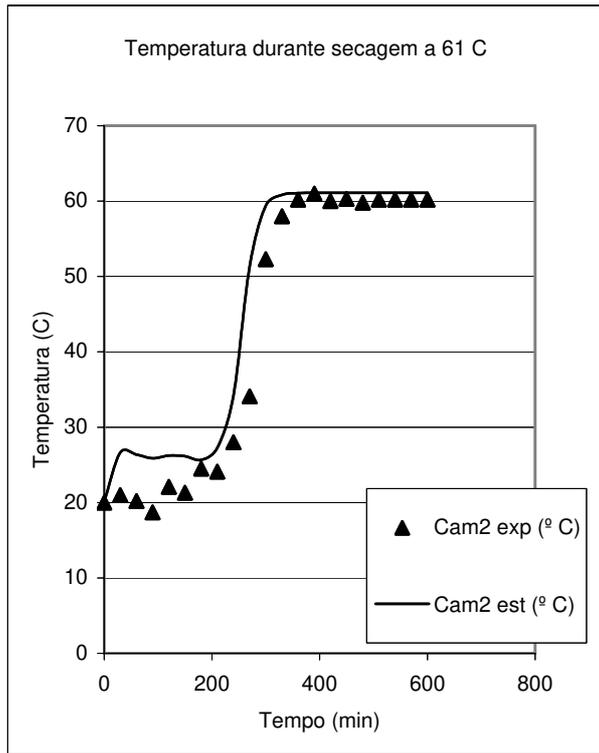
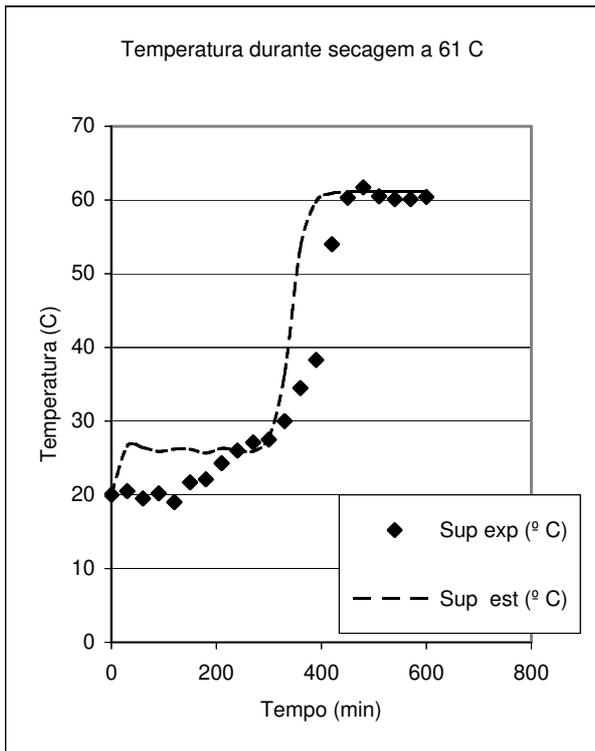


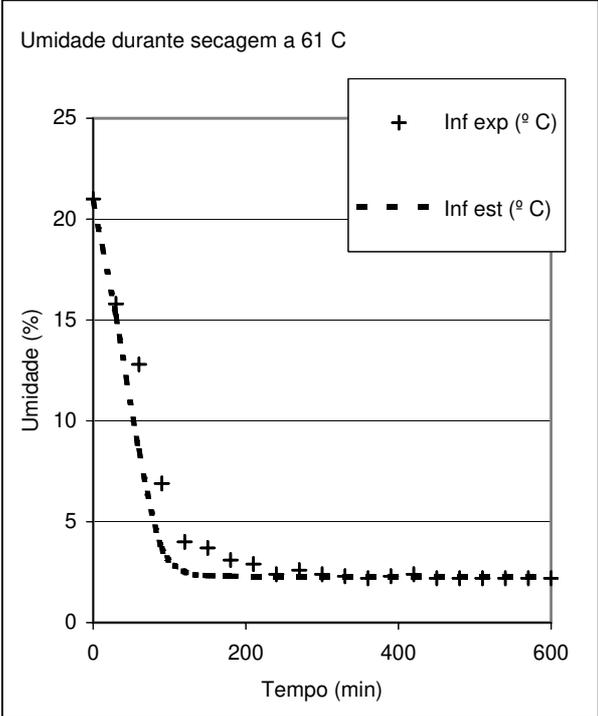
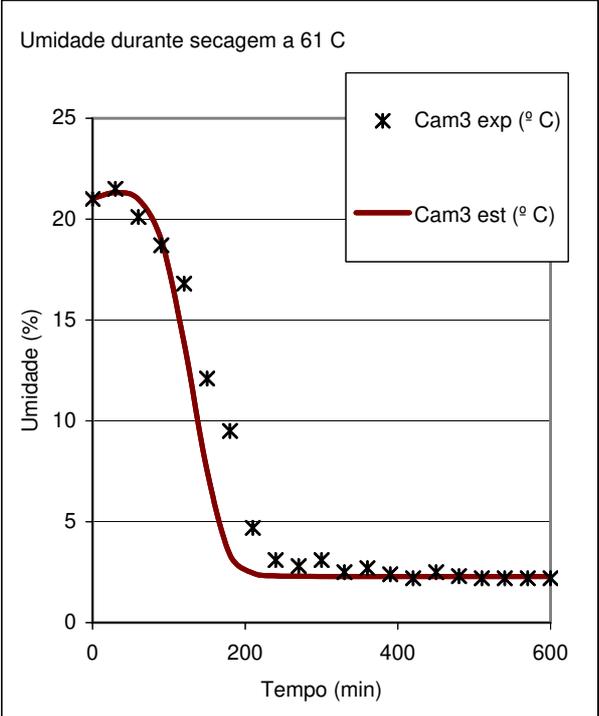
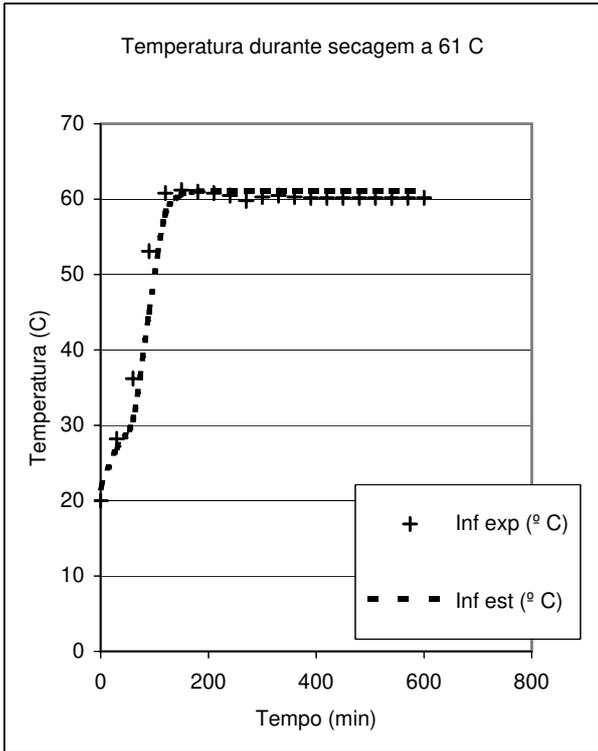
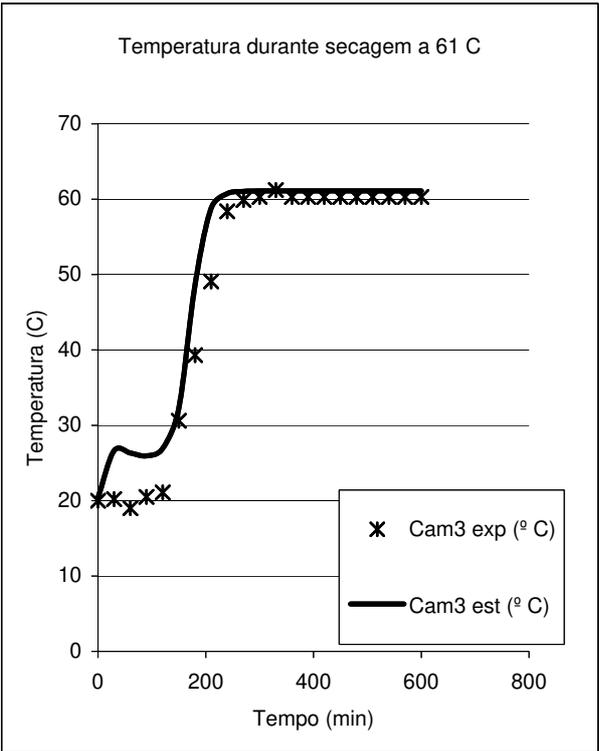
## APÊNDICE 05

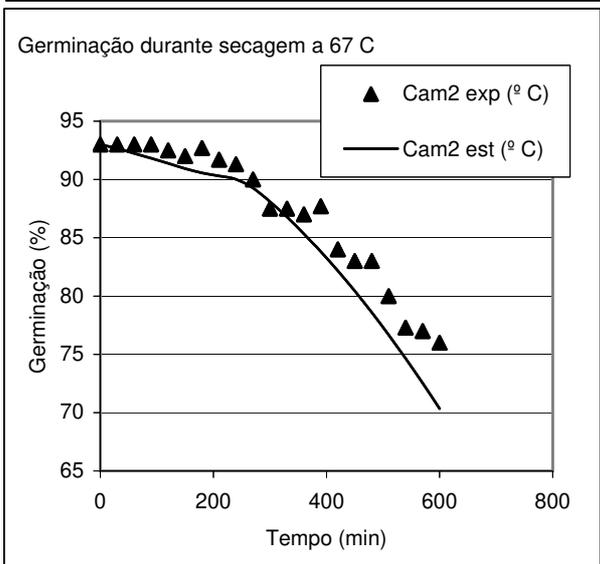
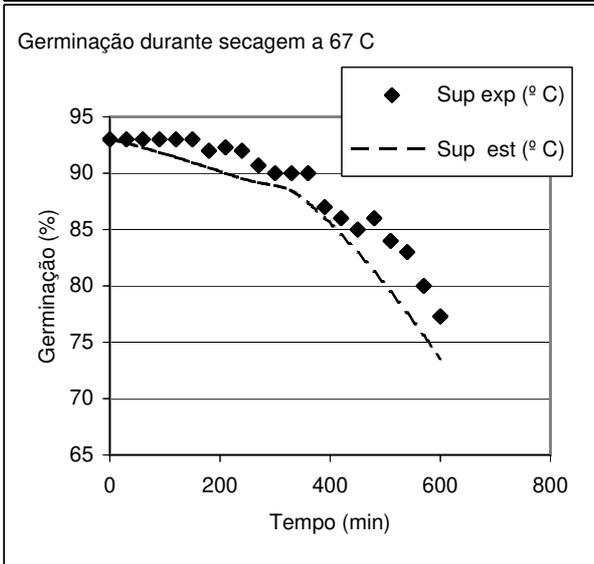
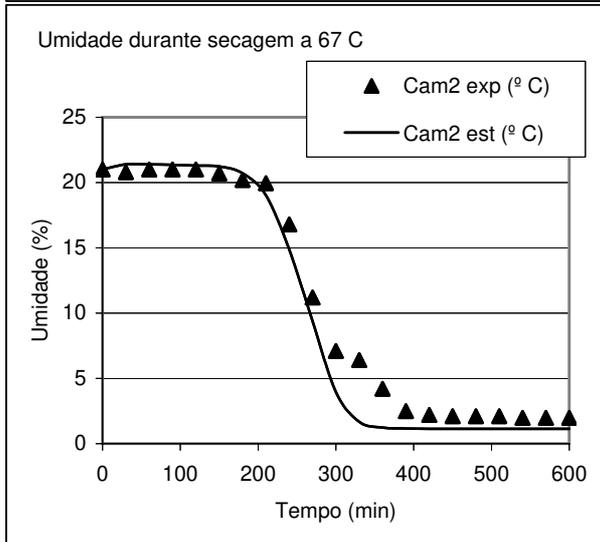
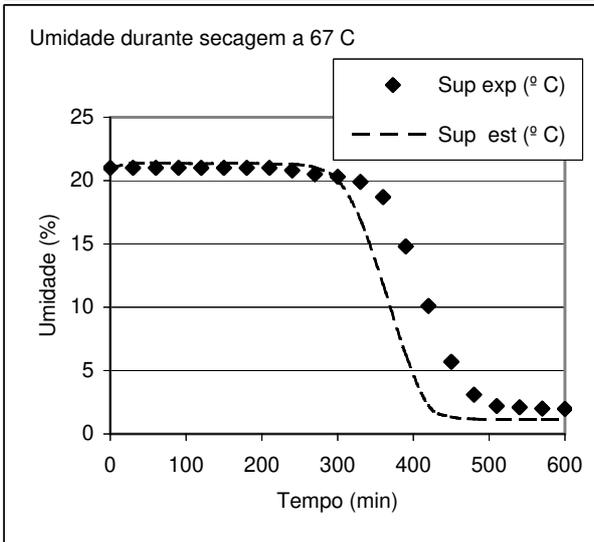
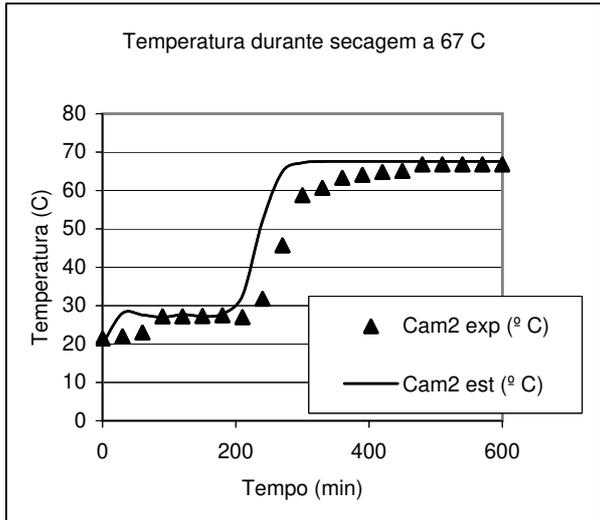
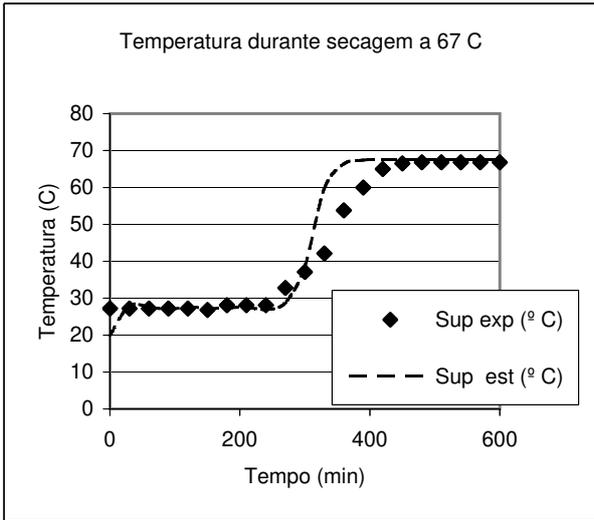
Secagem experimental e simulação de secagem  
Curvas estimadas e pontos experimentais  
(camadas individualizadas)

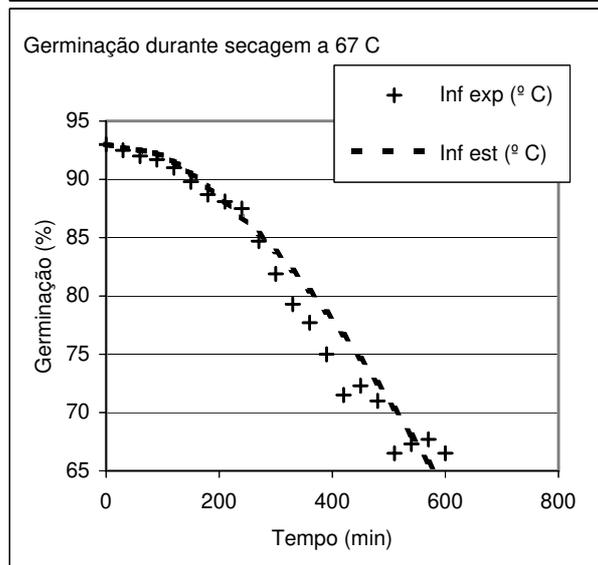
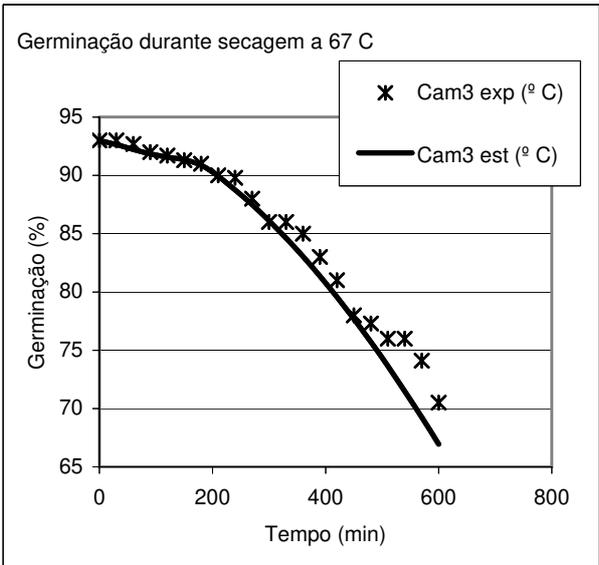
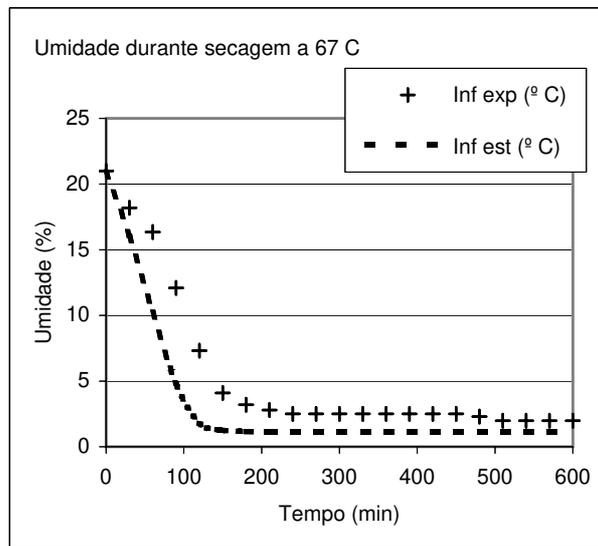
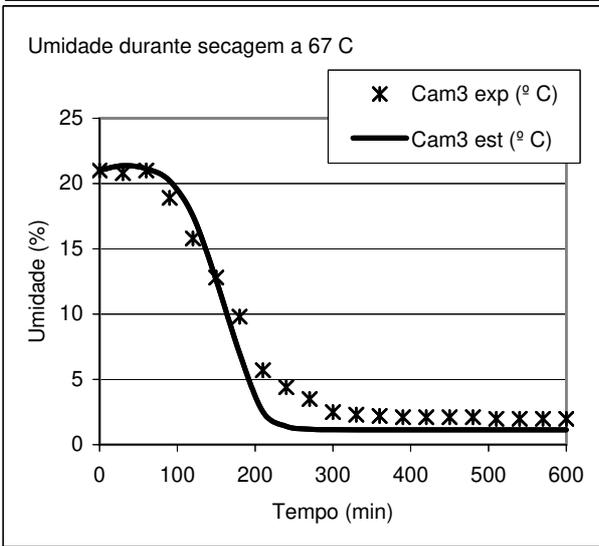
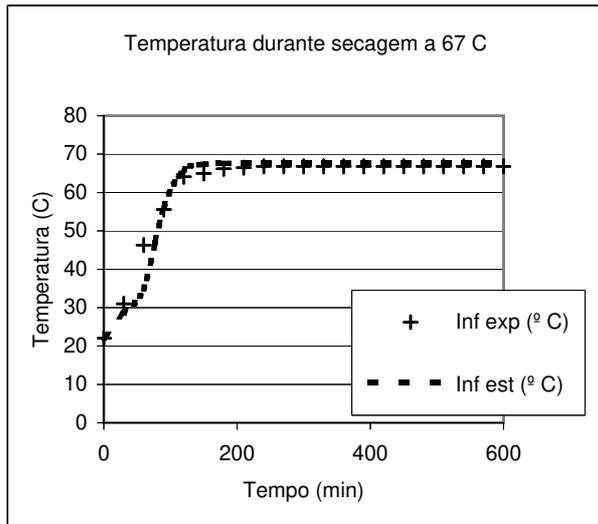
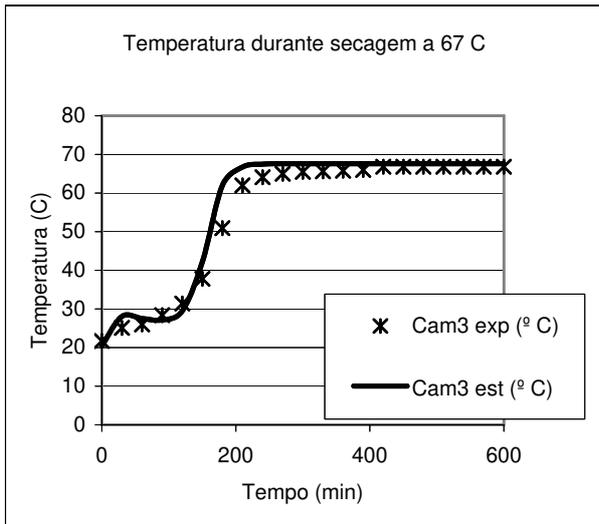












## APÊNDICE 06

### Rotina de Qualidade *Dres*

