Evento: XXII Jornada de Pesquisa

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DA UMIDADE DOS GRÃOS DE MILHO QUANDO EXPOSTOS À DISTINTOS VOLUMES DE ÁGUA[1]
ANALYSIS OF MOISTURE BEHAVIOR OF CORN GRAINS WHEN EXPOSED TO DIFFERENT VOLUMES OF WATER

Saul Vione Winik[2], Oleg Khatchatourian[3], Manuel Osório Binelo[4], Caio Felipe Froner Haas[5], Ricardo Klein Lorenzoni[6], Évelyn Magalhães De Carli[7]

[1] Pesquisa Institucional Desenvolvida no Departamento de Ciências Exatas e Engenharias, Pertencente ao Grupo de Pesquisa em Matemática Aplicada e Computacional
[2] Aluno do Curso de Mestrado em Modelagem Matemática da UNIJUÍ, bolsista CNPq, saul.winik@gmail.com;
[3] Professor Doutor do Departamento de Ciências Exatas e Engenharias, Orientador, olegkha@unijui.edu.br;
[4] Professor Doutor do Departamento de Ciências Exatas e Engenharias, Co-orientador, manuel.binelo@gmail.com;
[5] Aluno do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da UNIJUÍ, bolsista PIBIC/CNPq, caiofelipehaas@gmail.com;
[6] Aluno do Curso de Mestrado em Modelagem Matemática da UNIJUÍ, bolsista UNIJUÍ, ricolorenzoni@gmail.com;
[7] Aluna do Curso de Graduação em Engenharia Civil da UNIJUÍ, evelynmagal@outlook.com.

Resumo: Ao realizar estudos referentes à secagem de grãos, independentemente da cultura, são utilizados diversos tipos de técnicas para interpretar e analisar os dados do sistema. Uma das técnicas frequentemente utilizadas é a coleta de dados através de experimentos práticos em conjunto com a aplicação de modelos matemáticos. Neste contexto, este artigo tem por objetivos a realização do estudo prático do comportamento da absorção de umidade pelos grãos de milho quando submetidos a distintos volumes de água bem como a obtenção da equação que descreve o comportamento estudado através da implementação do método dos mínimos quadrados. Analisando os dados experimentais foi identificado que seu comportamento é similar tanto a uma exponencial quanto a uma meia paraboloide com concavidade para cima. Foi realizado o ajuste polinomial e exponencial dos dados experimentais e utilizou-se o coeficiente de determinação para definir qual o melhor entre dois ajustes. A equação obtida atraves do ajuste polinomial obteve o melhor coeficiente de determinação, sendo assim a definida como a equação característica dos dados experimentais estudados.

Abstract: *When performing studies on grain drying, regardless of the crop, several types of techniques are used to interpret and analyze the system data. One of the frequently used techniques is the collection of data through practical experiments in conjunction with the application of mathematical models. In this context, this article aims to perform the practical study of the behavior of moisture absorption by corn kernels when submitted to different volumes of water as well as to obtain the equation that describes the behavior studied through the implementation of least squares method. Analyzing the experimental data it was identified that its*

behavior is similar to both an exponential and a paraboloid half with concave upwards. The polynomial and exponential adjustment of the experimental data was performed and the coefficient of determination was used to define the best between two adjustments. The equation obtained through the polynomial fit obtained the best coefficient of determination, being thus defined as the characteristic equation of the experimental data studied.

Palavras-chave: *Absorção de Umidade; Homogeneidade; Condições Iniciais; Dados Experimentais; Mínimos Quadrados.*

Keywords: *Moisture Absorption; Homogeneity; Initial conditions; Experimental data; Least Squares.*

INTRODUÇÃO

A aplicação da modelagem matemática e de simulações computacionais são fundamentais para a investigação e análise da transferência de massa de água de dentro dos grãos para o ar de secagem. Muitos trabalhos estudam o processo e os mecanismos de secagem de grãos para criação dos modelos matemáticos de secagem de grãos (BAKKER-ARKEMA et. al.,1974; BOYCE, 1966; BROOKER et al.,1982; INGRAM, 1979; KHATCHATOURIAN, 2012; KHATCHATOURIAN, 2006; MONTROSS et. al, 2000; NAVARRO, 2002).

Para realizar o estudo experimental da secagem artificial de grãos existem diversos empecilhos e condições que devem ser resolvidas e garantidas, como garantir a estabilidade das temperaturas do ar de secagem e ambiente, umidade relativa do ambiente e ar de secagem. Um dos principais empecilhos é não se ter grande facilidade em se obter grãos de milho com umidade de 26% a 28% durante todo o ano. Este fato ocorre, pois, apenas em pequenos e determinados períodos do ano é realizado o plantio da cultura do milho.

Para resolver este problema existem técnicas que permitem umedecer os grãos até a umidade relativa desejada. Dentro do estudo realizado, a utilização das técnicas de umidificação está incorporada na etapa de hidratação dos grãos, executada após a seleção da massa total de todas as amostras e anteriormente ao período de repouso da massa total dos grãos e a secagem dos grãos.

A etapa de hidratação altera a textura, reduzindo substancialmente a dureza devido ao aumento de conteúdo de umidade. A taxa de hidratação depende da permeabilidade do grão que é influenciada pela morfologia, composição, estrutura, conteúdo de umidade inicial e pela complexa interação entre os mesmos (BEWLEY, 1994).

Há várias formas de transporte de água em sólidos, das quais se pode citar a difusão líquida (causada pelo gradiente de concentração), difusão de vapor (causada pelo gradiente de pressão de vapor: alta temperatura força a água para as extremidades), escoamento por efusão (causado pelo fato de o caminho livre das moléculas de vapor igualar-se ao diâmetro dos poros, também conhecida como escoamento de Knudsen), movimento líquido (causado pela atração gravitacional - não possui influência significativa na secagem), fluxo de líquido e de vapor (causado por pressão externa, contração, alta temperatura e capilaridade) (ALVARENGA et al., 1980).

Os grãos de milho encontrados no comércio para venda estão com aproximadamente entre 11 e 14% de umidade, portanto para que os grãos tenham a umidade equivalente à dos grãos recém

colhidos, deve-se expor os grãos à algum outro corpo com a umidade relativa maior que a dos grãos, ou ainda, diretamente à determinada quantidade de água. Trindade (2013) realizou um estudo similar ao deste artigo, se diferenciando na quantidade de grãos por experimento e também na cultura utilizada. Em seu estudo utilizou grãos de soja e cada experimento tinha 15Kg de grãos com umidade relativa inicial de 12%b.u..

Este artigo tem como objetivo principal realizar o estudo prático do comportamento da absorção de umidade pelos grãos de milho quando submetidos a distintos volumes de água. Determinando assim a quantidade necessária de água que deve ser inserida em uma camada de grãos para que a mesma atinja a mesma umidade que a literatura menciona com umidade ideal de colheita. Como objetivo específico será realizada a implementação do método dos mínimos quadrados para encontrar a melhor equação que descreva o comportamento dos dados primários mensurados experimentalmente.

METODOLOGIA

O milho é produzido em quase todo o mundo, tendo sua importância econômica através das diversas formas de sua utilização, que vão desde a alimentação animal até a indústria de alta tecnologia (PAES, 2006). A cultura do milho está amplamente disseminada no Brasil, devido à tradição de cultivo deste cereal pelos agricultores brasileiros (MAGALHÃES et al., 2002). Os grãos de milho possuem baixo coeficiente de condutibilidade térmica devido as suas características organolépticas, porosidade, baixa condutibilidade térmica e pequena área de contato entre grãos. Facilitando o armazenamento em silos metálicos.

Os grãos perdem umidade com relativa facilidade porem umedece-los novamente é um processo mais árduo. Estas duas características favorecem o processo de secagem, aeração e conservação. Os grãos, independente da cultura são classificados como seres vivos que possuem água na sua constituição e dependem dela para viver. Define-se como umidade, a proporção entre a massa de água presente no corpo (grão) e a massa seca do corpo, podendo ser expressa como base seca (b.s.) ou base úmida (b.u.) (PARK, 2007). Neste artigo os valores da umidade estão em base úmida, por estar utilizando um equipamento que mensura umidade a partir da análise da base úmida do grão.

Existem três tipos de umidade dentro dos grãos, dentre elas estão à umidade superficial, que está localizada na periferia externa do grão, à umidade intersticial, encontrada livre no interior dos grãos nos espaços denominados intersticiais e à umidade de constituição está presente nas células e estão quimicamente ligadas aos componentes dos grãos, como nas vitaminas, proteínas, carboidratos, enzimas e gorduras (WEBER, 2005).

A morfologia, composição e a estrutura são características próprias de cada grão, assim pode-se afirmar que a umidade inicial dos grãos, para este estudo, é a única característica que será garantida igualmente para cada amostra do experimento. Pois foram utilizados grãos de milho disponíveis para compra no mercado especializado. Mensurado a umidade inicial dos grãos a partir da utilização do equipamento G600, presente no Laboratório de Análise de Sementes da UNIJUÍ. Este passo é importante para garantir que toda a massa inicial tenha a mesma umidade inicial. Sabendo que os grãos de milho são colhidos aproximadamente com umidade entre 26% e 28% (WEBER, 2005).

Na sequência, será realizada a separação de 13 amostras de 0,6Kg de grãos de milho em

embalagens plásticas, para garantir uma precisão na equivalência da massa nas amostras foi utilizada uma balança de precisão AL 500C da marca Marte. Esta balança foi escolha por suas características de medição, conseguindo mensurar massas entre a faixa de 0,02g – 500g, apresentando um erro de 0,01g e um desvio padrão equivalente a 0,001g.

Utilizando uma seringa de 20ml, facilmente adequável em uma farmácia, foram separadas amostras de água de distintas quantidades. Neste estudo todas as amostras de água tinham temperaturas idênticas e não haviam sofrido ações de fontes de calor nem de resfriamento. Após separar 13 amostras de água com distintos volumes, cada amostra de grãos recebeu uma amostra de água, então vedando as amostras para que a água não reaja com o ambiente, foi misturado cuidadosamente cada amostra 5 vezes durante um período de 6 horas para que a umidade absorvida por eles seja a mais homogênea possível sem haver nenhuma danificação nos grãos. Após o período de 6 horas foram realizadas 10 medidas da umidade de cada amostra utilizando o equipamento G600, destas 10 medias foi realizada a média aritmética para então poder definir o valor adotado como umidade relativa final da amostra.

Partindo do pressuposto que qualquer conjunto de pontos em um espaço multidimensional apresenta uma tendência regular podendo ser representada por uma função matemática (CUSTODIO, 1997). Para determinar estas funções matemáticas são utilizados diversos métodos, onde preferencialmente é utilizado, por sua facilidade e simplicidade, o método dos mínimos quadrados.

O método de mínimos quadrados determina que a diferença entre os dados estimados/desejados e os dados experimentais seja mínima para que a função dos dados estimados exista (BARROSO et al., 1987; CHAPRA, 2013). A maior facilidade que o método dos mínimos quadrados apresenta é que não é necessária uma bagagem matemática sofisticada, pois não são utilizadas formulas prontas e calculadoras que apliquem regressões (CUSTODIO, 1997). Os dados mensurados experimentalmente neste artigo são classificados como dados primários, isso significa que os dados foram coletados, extraídos ou mensurados diretamente da fonte, sem subterfúgios ou terceiros.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Durante o primeiro mensuramento de umidade, foram realizadas 10 aferições de umidade de cada amostra e identificou-se que todas as 13 amostras tinham umidades relativas variando 0,1%. Então assumiu-se que cada amostra tinha o mesmo valor que a média aritmética de todos os valores aferidos, resultando em 13% b.u.. Após analisar os valores das umidades relativas de cada amostra determinou-se que a média aritmética dos valores mensurados representa a umidade relativa final de cada amostra. Na Tabela 1 estão presentes os volumes de água (50ml até 110ml), a massa final de cada amostra (massa inicial mais volume de água) e a umidade relativa final da amostra.

Tabela 1 – Dados dos experimentos Práticos.

Volume de àgua (mL)	Massa Final (g)	Umidade Relativa Final (%b.u.)
50	650	19,65
55	655	20,15
60	660	20,38

Volume de àgua (mL)	Massa Final (g)	Umidade Relativa Final (%b.u.)
65	665	21,20
70	670	21,78
75	675	22,78
80	680	24,25
85	685	25,00
90	690	26,20
95	695	27,25
100	700	29,40
105	705	31,20
110	710	32,94

Fonte: Próprio Autor

Para definir uma equação que caracterize os valores obtidos experimentalmente, foi utilizado o método dos mínimos quadrados. A Equação 1 apresenta o quadrado do desvio entre os dados experimentais e os dados estimados.

$$D = \sum_{i=1}^{n} Y_i^{exp} - Y_i^{est} \quad (1)$$

A partir da análise da terceira coluna da Tabela 1 pode-se afirmar que o comportamento dos dados primários coletados é equivalente tanto a uma exponencial quanto a uma meia parábola com sua concavidade para cima. Primeiramente será realizado neste estudo o ajuste polinomial para uma equação de segundo grau utilizando os dados da primeira coluna da Tabela 1 como X_i e os dados da terceira coluna como Y_i^{exp}. A Equação 2 apresenta o modelo da equação característica que se deseja determinar.

$$Y_i^{est} = a \cdot X_i^2 + b \cdot X_i + c \quad (2)$$

Substituindo a Equação 2 na Equação 1 encontra-se a Equação 3. Para encontrar os valores dos coeficientes "a", "b" e "c" do polinômio deve-se utilizar a Equação 4 que representa as condições para a minimização da soma do desvio quadrático.

$$D = \sum_{i=1}^{n} Y_i^{exp} - a \cdot X_i^2 + b \cdot X_i + c \quad (3)$$

$$\frac{\delta D}{\delta a} = \frac{\delta D}{\delta b} = \frac{\delta D}{\delta c} = 0 \quad (4)$$

Ao derivar a Equação 3 em relação a cada um dos coeficientes do polinômio, conforme a Equação 4 apresenta, obtém-se a expressão numérica de cada coeficiente. As quais podem ser rearranjadas na forma de uma simples operação matricial, conforme Equação 5.

$$A \cdot X = B \tag{5}$$

Onde a matriz A é preenchida apenas por valores dos somatórios do vetor das quantidades de volume de água (X_i) e a matriz B é preenchida pelo somatório dos dados de umidade mensurados experimentalmente (Y_i^{exp}) juntamente com os somatórios das multiplicações dos dados e umidade mensurados experimentalmente com os dados de quantidade de volume de água.

Ao ser realizado os somatórios apresentados anteriormente utilizando os valores da terceira coluna da Tabela 1 na Equação 5 obteve-se 27,7734 para o valor da constante "a", -2,2426 para a constante "b" e 0,2397 para a constante "c". Aplicando os valores numéricos das soluções obtidos através da Equação 5 na Equação 2, resulta na Equação 6 que descreve matematicamente o comportamento das umidades relativas finais de cada amostra.

$$Y_i^{est} = 27,7734 \cdot X_i^2 + 2,2426 \cdot X_i + 0,2397 \tag{6}$$

Para o ajuste exponencial serão utilizados os mesmos dados implementados no ajuste polinomial, com o intuito de obter uma expressão matemática equivalente a Equação 7. Onde "a" e "b" são as constantes da função do ajuste exponencial que se deseja determinar.

$$Y_i^{est} = a \cdot e^{b \cdot X_i} \tag{7}$$

A Equação 7 é uma função não-linear, de modo que é necessário realizar uma linearização antes da aplicação do método dos mínimos quadrados. O objetivo desta linearização é transformar a Equação 7 em uma equação linear de primeiro grau. Neste contexto se aplica o logaritmo natural em ambos os lados da Equação 7, resultando na Equação 8.

$$\ln\left(Y_i^{est}\right) = \ln(a) + b \cdot X_i \tag{8}$$

Afirmando que as equivalências apresentadas no sistema da Equação 9 são verídicas, pode-se determinar que a Equação 10 é equivalente a equação 7. No formato da Equação 10 pode-se aplicar o ajuste linear para determinar os valores de A e B. O sistema presente na Equação 11 apresenta as equações para obter as constantes "A" e "B", respectivamente.

$$\begin{cases} \ln\left(Y_i^{est}\right) = & Y \\ \ln(a) = & B \\ b = & A \end{cases} \tag{9}$$

$$Y = A \cdot X_i + B \tag{10}$$

$$\begin{cases} A = \dfrac{\sum_{i=1}^{n}(X_i^2) \bullet \sum_{i=1}^{n}(Y_i^{exp}) - \sum_{i=1}^{n}(X_i) \bullet \sum_{i=1}^{n}(X_i \bullet Y_i^{exp})}{n \bullet \sum_{i=1}^{n}(X_i^2) - \left(\sum_{i=1}^{n}(X_i)\right)^2} \\ B = \dfrac{n \bullet \sum_{i=1}^{n}(X_i \bullet Y_i^{exp}) - \sum_{i=1}^{n}(X_i) \bullet \sum_{i=1}^{n}(Y_i^{exp})}{n \bullet \sum_{i=1}^{n}(X_i^2) - \left(\sum_{i=1}^{n}(X_i)\right)^2} \end{cases} \tag{11}$$

Resolvendo as duas equações em conjunto com o sistema da Equação 9 encontrou-se o valor de 0,1213 para a constante “a” e 8,7562 para a constante “b”. Estes dois valores substituídos na Equação 7 através das equivalências apresentadas no sistema da Equação 9, encontrou-se a Equação 12.

$$Y_i^{est} = 0{,}1213 \cdot e^{8,7562 \cdot X_i} \tag{12}$$

Para realizar a validação das Equações 6 e 12, implementou-se os valores apresentados na primeira coluna da Tabela 2, que está preenchida pelos dados dos incrementos de volume de água, nas Equações 6 e 12 para assim preencher a segunda e terceira coluna da Tabela 2 com as umidades relativas estimadas pelas equações obtida através do método dos mínimos quadrados.

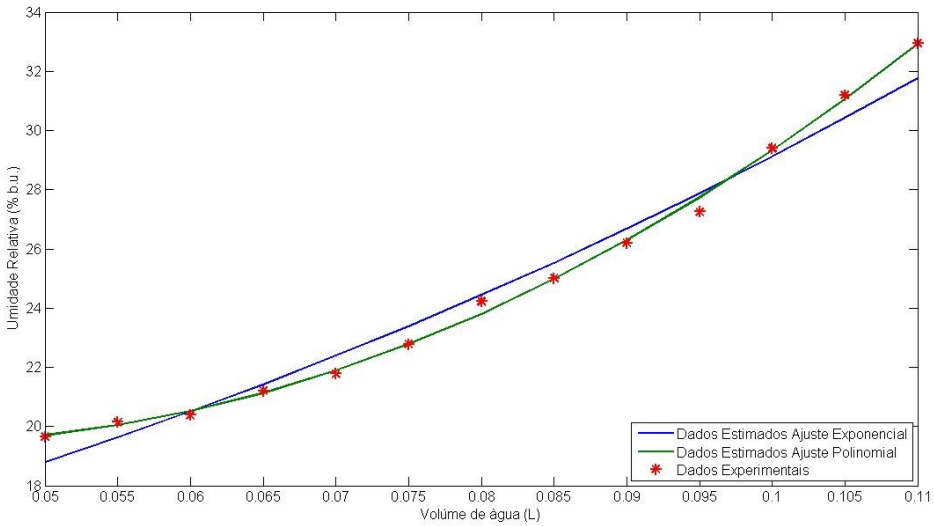
Tabela 2 – Umidades Relativa Estimadas dos Grãos de Milho.

Volume de àgua (mL)	**Umidade Relativa Estimada Pela Equação Polinomial (%b.u.)**	**Umidade Relativa Estimada Pela Equação Exponencial(%b.u.)**
50	19,71	18,79
55	20,04	19,63
60	20,52	20,51
65	21,13	21,43
70	21,89	22,39
75	22,78	23,39
80	23,81	24,44
85	24,98	25,53
90	26,29	26,68
95	27,74	27,87
100	29,32	29,12
105	31,05	30,42
110	32,91	31,78

Fonte: Próprio Autor

Foi utilizada a ferramenta computacional MATLAB para a realização da análise dos resultados obtidos. A Figura 1 apresenta a comparação gráfica dos dados coletados experimentalmente e dos dados estimados a partir das Equações 6 e 12, apresentados na terceira coluna da Tabela 1 e segunda e terceira coluna da Tabela 2 respectivamente.

Figura 1 – Comparação dos Dados Experimentais e Estimados.



Fonte: Próprio Autor.

Notou-se que a curva dos dados estimados pela Equação 6 apresentam o mesmo comportamento dos dados mensurados experimentalmente, no entanto a curva dos dados estimados pela Equação 12 apresentou um comportamento com uma menor similaridade com os dados experimentalmente mensurados. Para obter uma qualificação numérica das Equações 6 e 12, foi utilizada a Equação 13 que representa o coeficiente de determinação (r^2). Este coeficiente classifica numericamente a qualidade da equação conforme seu valor. Quanto mais próximo de 1 o valor do coeficiente mais próximos são os resultados calculados por ela e os dados experimentais (BARROSO *et al.*, 1987; CHAPRA, 2013).

$$r^2 = 1 - \frac{n \bullet \sum_{i=1}^{n} \left(Y_i^{exp} - Y_i^{est}\right)^2}{n \bullet \sum_{i=1}^{n} \left(\left(Y_i^{exp}\right)^2\right) - \left(\sum_{i=1}^{n} \left(\left(Y_i^{exp}\right)\right)\right)^2} \qquad (13)$$

O resultado do coeficiente de determinação para a Equação 6 foi de 0,9979 e para a Equação 12 foi de 0.9792, significando que as duas equações obtidas pelo método dos mínimos quadrados

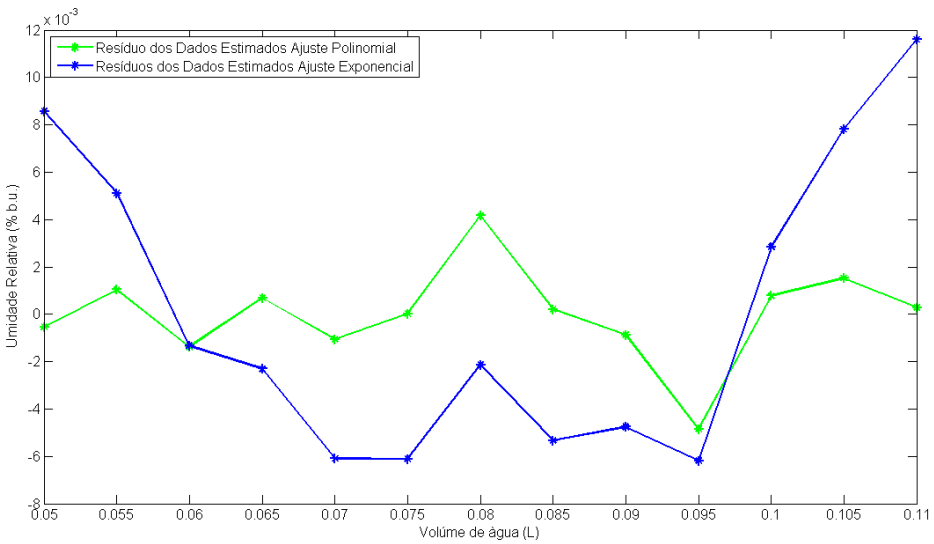
correspondem a equação característica dos dados primários experimentalmente coletados, pois os dois valores são muito próximos de 1. No entanto o coeficiente de determinação da Equação 6 é superior ao coeficiente de determinação da Equação 12, podendo se afirmar que a curva dos dados obtidos através da Equação 6 apresenta melhor resultados do que a curva dos dados obtida através da Equação 12.

Além de qualificar as equações obtidas pelo ajuste polinomial e ajuste exponencial realizados utilizando o coeficiente de determinação pode-se realizar o estudo dos resíduos, que tem como intuito verificar a adequação do modelo. Este estudo consiste na comparação de cada valor mensurado experimentalmente com os respectivos valores preditos com as Equações 6 e 12, realizando a diferença entre estes valores (BARROSO et al., 1987; CHAPRA, 2013). A Equação 14 apresenta a formula do resíduo.

$$r_i = Y_i^{exp} - Y_i^{est} \tag{14}$$

Quanto mais próximo de zero é o valor de cada resíduo, melhor é a adequação do modelo aos dados experimentais. A Figura 2 apresenta o resultado do comportamento dos resíduos das Equações 6 e 12 para os dados primários mensurados experimentalmente. Foi escolhido o resíduo como forma de analisar as duas equações pois ele compara separadamente cada valor estimado com seu valor mensurado experimentalmente, assim podendo-se verificar em quais pontos o modelo apresenta uma menor compatibilidade com os dados experimentais.

Figura 2 – Comportamento dos Resíduos.



Fonte: Próprio Autor.

Após analisar os resultados do resíduo da Equação 6, pode-se afirmar que o maior resíduo

encontrado não ultrapassou o valor de 0,05. Isso significa que a maior diferença entre os dados experimentais e os dados estimados foi inferior a 0,5% de umidade relativa em base úmida. Em uma análise mais cautelosa, notou-se que dos 13 resíduos calculados, 2 apresentaram valores próximos a 0,5% b.u. e os outros 11 resíduos apresentaram valores variantes entre -0,14% b.u. e 0,15% b.u..

Em contrapartida, os resíduos resultantes da Equação 12 apresentaram valores superiores a 0,0013 de distância do eixo das abscissas, o que caracteriza uma diferença de 0,13% entre o valor mensurado experimentalmente e o valor predito pela Equação 12. O maior resíduo da Equação 12 foi de 0,0116, resultando numa diferença de 1,16% entre o valor mensurado experimentalmente e o valor predito pela Equação 12.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Apesar dos dois coeficientes de determinação serem próximos a 1, pode-se concluir que a Equação 6 encontrada utilizando o método dos mínimos quadrados representa matematicamente os dados primários encontrados experimentalmente, pois apresenta menor resíduo e maior coeficiente de determinação. Referente ao comportamento da absorção de umidade relativa pelo grão de milho, constatou-se que sua representação gráfica é equivalente à uma meia parábola com sua concavidade voltada para cima, porém deve-se ressaltar que esta afirmação é verídica apenas para a faixa de umidade relativa estudada. Pois cada tipo de cultura tem um limite de umidade que suporta, todo e qualquer contato com água após atingir este limite não interfere na umidade do grão.

Para que 0,6Kg de grãos de milho, vendidos com umidade 13% b.u., atinjam a umidade entre 26% e 28% é necessário que sejam submetidos ao contato direto, de pelo menos 90ml de água e no máximo de 100ml. É compreendido que os resultados deste artigo são referentes a um dos estudos metodológicos que necessitam ser executados e compreendidos para que possa se dar continuidade ao estudo da secagem artificial de grãos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq e a UNIJUÍ pelas bolsas de estudo e pesquisa.

REFERÊNCIAS

ALVARENGA, L. D. de, Fortes, M., Pinheiro, J.B., Hara, T., Transporte de umidade no interior de grãos de feijão preto sob condições de secagem. Revista Brasileira de Armazenamento, N.1, Viçosa, 1980.

BAKKER-ARKEMA, F.W., Lerew, L.E. Deboer, S. F., Roth M.G, Grain dryer simulation, agricultural experimentsStation report, N. 224. Michigan State University, East Lansing.

BARROSO, Leônidas Conceição et al. Cálculo Numérico (com aplicações). São Paulo: Harbra, v. 384, p. 2ª, 1987.

BEWLEY, J. Derek; BLACK, Michael. Seeds. In: Seeds. Springer Us, 1994. p. 1-33.

BOYCE, D. S. Heat and moisture transfer in ventilated grain. Journal of Agricultural Engineering Research, v. 11, n. 4, p. 255-265, 1966.

BROOKER, D. B., Bakker-Arkema, F. W., & Hall, C. W. (1982). Drying cereal grains. Westport, CT: AVI Publishing Co.

CHAPRA, Steven C. Métodos Numéricos Aplicados com MATLAB® para Engenheiros e Cientistas-3. AMGH Editora, 2013.

CUSTODIO, Rogério; ANDRADE, JC de; AUGUSTO, Fábio. O ajuste de funções matemáticas a dados experimentais. Quim. Nova, v. 20, p. 219-225, 1997.

INGRAM, G. W. Solution of grain cooling and drying problems by the method of characteristics in comparison with finite difference solutions. Journal of Agricultural Engineering Research, v. 24, n. 3, p. 219-232, 1979.

MAGALHÃES, P. C. et al. Fisiologia da planta de milho. Embrapa Milho e Sorgo Sete Lagoas, MG, 2002. Disponível em Acessado em 28 mar. 2017.

MONTROSS, M. D. et al. Simulated performance of conventional high-temperature drying, dryeration, and combination drying of shelled corn with automatic conditioning. Transactions of the ASAE-American Society of Agricultural Engineers, v. 43, n. 3, p. 691-700, 2000.

NAVARRO, Shlomo; NOYES, Ronald T. (Ed.). The mechanics and physics of modern grain aeration management. CRC press, 2001.

KHATCHATOURIAN, O A. Experimental study and mathematical model for soya bean drying in thin layer. Biosystems engineering, v. 113, n. 1, p. 54-64, 2012.

KHATCHATOURIAN, O. A.; DE OLIVEIRA, F. A. Mathematical modelling of airflow and thermal state in large aerated grain storage. Biosystems Engineering, v. 95, n. 2, p. 159-169, 2006.

PAES, M. C. D. Aspectos físicos, químicos e tecnológicos do grão de milho. Embrapa Milho e Sorgo Sete Lagoas, MG, 2006. Disponível em Acessado em 25 mar. 2017.

PARK, K. J.; ANTONIO. G. C; OLIVEIRA. R. A; PARK. K. L. B., Conceitos de processo e equipamentos de secagem. CT&EA, Campinas – SP 2007.

TRINDADE, Marcelo da Silva. Secagem de soja em camada espessa: modelagem matemática e simulação numérica. 2013.

WEBER, E. A. Excelência em beneficiamentoe armazenagem de grãos. Canoas, RS. Editora Salles, 2005.