

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE GOIÁS  
UNIDADE UNIVERSITÁRIA DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS  
MESTRADO *STRICTO SENSU* EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

PROPRIEDADES FÍSICAS, TÉRMICAS E AERODINÂMICAS DE GRÃOS  
DE QUINOA (*Chenopodium quinoa* Willd)

Dayanna Martins Calaça Nunes

ANÁPOLIS-GO  
Agosto – 2009

PROPRIEDADES FÍSICAS, TÉRMICAS E AERODINÂMICAS DE  
GRÃOS DE QUINOA (*Chenopodium quinoa* Willd)

DAYANNA MARTINS CALAÇA NUNES

Orientador: PROF. D.S. IVANO ALESSANDRO DEVILLA

Dissertação apresentada à Universidade Estadual de Goiás - UEG, Unidade Universitária de Ciências Exatas e Tecnológicas de Anápolis como parte das exigências do Programa de Pós - Graduação em Engenharia Agrícola – Engenharia de Sistemas Agroindustriais, para obtenção do título de MESTRE.

Anápolis  
Goiás  
2009

PROPRIEDADES FÍSICAS, TÉRMICAS E AERODINÂMICAS DE GRÃOS  
DE QUINOA (*Chenopodium quinoa* Willd)

Por  
Dayanna Martins Calaça Nunes

Dissertação apresentada como parte das exigências para obtenção do título de  
MESTRE EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

Aprovada em: \_\_\_/\_\_\_/\_\_\_

---

Prof. D.S. Ivano Alessandro Devilla  
(Orientador)  
Universidade Estadual de Goiás  
Unidade de Ciências Exatas e Tecnológicas

---

Prof. D.S. Osvaldo Resende  
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano

---

Prof. D.S. Diego Palmiro Ascheri  
Universidade Estadual de Goiás  
Unidade de Ciências Exatas e Tecnológicas

À Deus,  
aos meus filhos, Carlos Eduardo e Luiz Henrique,  
ao meu esposo, Paulo César  
e aos meus pais, Mauro e Maria do Carmo.  
Dedico com muito amor, carinho, respeito, admiração e gratidão.

## AGRADECIMENTOS

À Deus, pela força, coragem, capacidade, misericórdia e permissão de chegar até aqui. O que participou de todos os momentos, O que me viu chorar e O que me fez sorrir, à Ele toda a honra e toda a glória.

Aos meus filhos, Carlos Eduardo e Luiz Henrique, razão para continuar a lutar e não desistir jamais.

Ao meu esposo, Paulo César, pelo apoio, respeito, paciência e principalmente pela motivação.

Aos meus pais, Mauro e Maria do Carmo, pelo auxílio e incentivo.

Ao professor Ivano Alessandro Devilla, pela orientação, confiança e paciência na execução deste trabalho, e ainda, pelo respeito, ética e profissionalismo dedicados à pesquisa.

Ao professor Paulo César Afonso Júnior e ao Sr. Sebastião Conrado pela aquisição das amostras de quinoa, cultivar BRS Piabiru.

Ao professor Paulo Eduardo Narciso Souza, pelo empenho na busca das amostras.

À Jordana Moura e à Poliana Gratão, “minhas filhinhas”, pelo auxílio na condução dos experimentos.

Aos amigos, Josué, Patrícia, Suely, Gracielly, Fernanda, Lucas, Simone, Denise, André, Greice, Renato, Haydeé, Márcia, Josimar e Josianny pelos bons momentos de convivência e trabalho.

Aos colegas de trabalho, Sr. Valdeir, pela valiosa ajuda durante a execução dos experimentos e à Eliete, pela colaboração e pelas palavras de ânimo.

À Universidade Estadual de Goiás pelo curso de Engenharia Agrícola e aos professores Elton Fialho dos Reis, Ivano Alessandro Devilla e Delvio Sandri, pelo esforço e dedicação, em tornar realidade o Mestrado em Engenharia Agrícola.

## SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS .....	vi
LISTA DE FIGURAS .....	vii
RESUMO .....	viii
ABSTRACT .....	ix
INTRODUÇÃO GERAL .....	1
<b>CAPITULO 1</b>	
REVISÃO DE LITERATURA .....	3
1.1. A QUINOA .....	3
1.2. PROPRIEDADES FÍSICAS .....	5
1.3. PROPRIEDADES TÉRMICAS.....	6
1.4. PROPRIEDADES AERODINÂMICAS.....	10
1.5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS .....	12
<b>CAPITULO 2</b>	
PROPRIEDADES FÍSICAS DOS GRÃOS DE QUINOA ( <i>Chenopodium quinoa</i> Willd)	15
2.1. INTRODUÇÃO .....	15
2.2. MATERIAL E MÉTODOS .....	17
2.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	21
2.4. CONCLUSÕES .....	26
2.5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	27
<b>CAPITULO 3</b>	
PROPRIEDADES TÉRMICAS DOS GRÃOS DE QUINOA ( <i>Chenopodium quinoa</i> Willd).....	29
3.1. INTRODUÇÃO .....	29
3.2. MATERIAL E MÉTODOS .....	32
3.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	36
3.4. CONCLUSÕES .....	42
3.5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	43
<b>CAPÍTULO 4</b>	
PROPRIEDADES AERODINÂMICAS DOS GRÃOS DE QUINOA ( <i>Chenopodium quinoa</i> Willd).....	46
4.1. INTRODUÇÃO .....	46
4.2. MATERIAL E MÉTODOS .....	50
4.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	53
4.4. CONCLUSÕES .....	56
4.5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	57

## LISTA DE TABELAS

### CAPÍTULO 2

TABELA 1 – Análise de variância para os eixos ortogonais (a, b e c), diâmetro equivalente, esfericidade e circularidade dos grãos de quinoa.....	21
TABELA 2 – Médias e desvios dos valores dos eixos ortogonais (a, b e c), esfericidade e circularidade dos grãos de quinoa, cultivar brs piabiru, em diferentes teores de água.....	22
TABELA 3 – Análise de variância para a massa específica aparente, massa específica unitária, porosidade e massa de mil grãos de quinoa.....	23
TABELA 4 – Média e desvios da massa específica aparente, massa específica unitária e porosidade dos grãos de quinoa, cultivar brs piabiru.....	24
TABELA 5 – Equações ajustadas aos valores de massa específica aparente, massa específica unitária, porosidade e massa de mil grãos em função dos teores de água.....	25

### CAPÍTULO 3

TABELA 6 – Valores do coeficiente a, intervalo de tempo para determinação do coeficiente a, condutividade térmica da massa de grãos de quinoa cultivar brs piabiru nos diferentes teores de água investigados e seus respectivos desvios-padrão.....	37
--	----

## LISTA DE FIGURAS

### CAPÍTULO 2

- FIGURA 1- Eixos ortogonais dos grãos de quinoa.....18
- FIGURA 2 - Valores dos tamanhos dos eixos ortogonais e do diâmetro equivalente para diferentes produtos agrícolas com teor de água de 15% b.s..... 23

### CAPÍTULO 3

- FIGURA 3 – Equipamentos utilizados para a determinação das propriedades térmicas..... 33
- FIGURA 4 – Valores experimentais, a equação de regressão e o coeficiente de determinação da massa específica aparente dos grãos de quinoa, cultivar brs piabiru, em função do teor de água..... 36
- FIGURA 5 – Valores experimentais, estimados, equação de regressão, e coeficiente de determinação da condutividade térmica dos grãos de quinoa, em função do teor de água..... 38
- FIGURA 6 – Valores da condutividade térmica de grãos de quinoa, cultivar brs piabiru, milho, alpiste, painço e milho..... 39
- FIGURA 7 – Valores experimentais para a difusividade térmica dos grãos de quinoa, para os cinco teores de água, em função do tempo..... 40
- FIGURA 8 – Valores experimentais, estimados, a equação de regressão e o coeficiente de determinação da difusividade térmica dos grãos de quinoa, cultivar brs piabiru, em função do teor de água..... 40
- FIGURA 9 – Valores experimentais, estimados e a equação de regressão para o calor específico dos grãos de quinoa nos diferentes teores de água..... 41

### CAPÍTULO 4

- FIGURA 10 – Desenho esquemático para a determinação experimental da velocidade terminal dos grãos de quinoa..... 51
- FIGURA 11 – Valores experimentais, estimados, a equação de regressão e o coeficiente de determinação da velocidade terminal em função do teor de água..... 55



## RESUMO

O presente trabalho objetivou determinar e modelar as propriedades físicas, térmicas e aerodinâmicas dos grãos de quinoa em diferentes teores de água. Foram utilizados grãos de quinoa, cultivar BRS Piabiru, colhidos na entressafra de 2008, na fazenda Dom Bosco em Planaltina – DF. As propriedades físicas foram investigadas em sete teores de água (12,8; 13,8; 14,8; 15,7; 17,6; 18,3 e 19,7% b.s.), dentre elas, a circularidade, a esfericidade, o diâmetro equivalente, a porosidade, a massa de mil grãos e as massas específicas unitária e aparente, foram determinadas a partir das medidas dos eixos ortogonais e pesagem das massas. As propriedades térmicas foram determinadas em cinco teores de água (10,1; 11,7; 13,5; 16,0; 17,6% b.s.). A condutividade térmica e a difusividade térmica foram determinadas pelo método do cilindro infinito dotado de uma fonte de calor linear central. O calor específico foi determinado pelo método indireto em função da massa específica aparente e das demais propriedades térmicas. As propriedades aerodinâmicas, velocidade terminal e coeficiente aerodinâmico de arrasto dos grãos de quinoa foram determinadas em sete teores de água, utilizando-se um equipamento composto por um ventilador centrífugo conectado a um tubo de acrílico. As propriedades dos grãos de quinoa, cultivar BRS Piabiru, foram avaliadas no delineamento inteiramente casualizado, no qual os tratamentos foram os teores de água. Na escolha do melhor modelo foram considerados: a significância dos coeficientes da regressão, pelo teste T; a magnitude do coeficiente de determinação ajustado ( $R^2$ ) e o erro relativo (P). A análise dos resultados permitiu concluir que a circularidade e a esfericidade são invariáveis com o aumento do teor de água. A massa específica aparente diminui com o aumento do teor de água. A massa específica unitária, a porosidade e a massa de mil grãos aumentam com o aumento do teor de água. A condutividade térmica dos grãos de quinoa aumentou de 0,1878 para 0,2293  $W m^{-1} ^\circ C^{-1}$ , o calor específico aumentou de 2,8 a 3,4  $J Kg^{-1} ^\circ C^{-1}$ , a difusividade diminuiu de 0,00010018 para 0,00010013  $m^2 s^{-1}$ , todos para teores de água entre 10,1 e 17,6% b.s. Para teores de água entre 12,8 e 19,7% b.s., a velocidade terminal experimental e teórica aumentaram de 2,92 para 3,35  $m s^{-1}$  e 1,32 a 1,44  $ms^{-1}$ , para coeficientes aerodinâmicos de arraste experimental e teórico de 0,09 a 0,10 e 0,156 a 0,158, respectivamente, com o aumento do teor de água de 12,8 para 19,7% b.s.

**Palavras Chave:** Armazenamento de grãos, forma e tamanho dos grãos, condutividade térmica e velocidade terminal.

## ABSTRACT

This study aimed to determine and shape the physical, thermal and aerodynamic grain quinoa at different water contents. Beans were used quinoa, BRS Piabiru, harvested during winter 2008, the farm Don Bosco Planaltina - DF. The physical properties were investigated in seven water contents (12.8, 13.8, 14.8, 15.7, 17.6, 18.3 and 19.7% db), among them, roundness, sphericity, the equivalent diameter, porosity, thousand grain weight and true density and apparent, were determined from measurements of orthogonal axes and weighing the masses. The thermal properties were determined at five moisture contents (10.1, 11.7, 13.5, 16.0, 17.6% db). The thermal conductivity and thermal diffusivity were determined using the infinite cylinder fitted with a linear central heat source. The specific heat was determined by indirect method based on the mass density and the other thermal properties. The aerodynamic properties, terminal velocity and drag coefficient of drag of the grains of quinoa were determined in seven levels of water, using a device composed of a centrifugal fan connected to a tube of acrylic. The properties of the grains of quinoa, BRS Piabiru, were evaluated in a randomized design in which treatments were water content. In choosing the best model were considered: the significance of regression coefficients by t test, the magnitude of the coefficient of determination ( $R^2$ ) and relative error (P). The results showed that the roundness and sphericity are invariant with increasing water content. The bulk density decreases with increasing water content. The true density, porosity and thousand grain weight increased with increasing water content. The thermal conductivity of the grains of quinoa increased from 0.1878 to 0.2293  $W m^{-1} C^{-1}$ , the specific heat increased from 2.8 to 3.4  $J kg^{-1} C^{-1}$ , the diffusivity decreased from 0, 00010018 0.00010013 to  $m^2 s^{-1}$ , for all water contents between 10.1 and 17.6% db For water contents between 12.8 and 19.7% db, the experimental and theoretical terminal velocity increased from 2.92 to 3.35  $m s^{-1}$  and 1.32 to 1.44  $ms^{-1}$  for aerodynamic coefficients of experimental and theoretical drag from 0.09 to 0.10 and 0.156 to 0.158, respectively, with increasing water content of 12.8 to 19.7% db

**Keywords:** Grains storage. Size and form of grains. Thermal conductivity. Terminal velocity.

## INTRODUÇÃO GERAL

A diversificação da agricultura gera mecanismos que auxiliam no desenvolvimento de pesquisas sobre novas culturas. A quinoa, de origem andina, vem sendo estudada com o objetivo de ser consolidada na alimentação humana e animal, devido suas propriedades nutricionais e funcionais. O grão de quinoa possui elevado teor de proteína e melhor equilíbrio na distribuição de aminoácidos essenciais. Isso tem contribuído para a popularização da quinoa entre as pessoas que buscam alimentos alternativos com alto valor nutritivo, baixo colesterol e ausência de glúten (SPEHAR e SANTOS, 2007). Tendo em vista o aumento da qualidade do produto final é importante conhecer as propriedades físicas, térmicas e aerodinâmicas da quinoa, para adequar e otimizar os processos desde o dimensionamento de máquinas e equipamentos para o plantio, a colheita, o pré-processamento e o armazenamento.

A cultivar BRS Piabiru é a primeira recomendação de quinoa como cultivo granífero no Brasil. Originou-se da linhagem EC 3, selecionada a partir de uma população procedente de Quito, Equador. A coloração é variável entre verde e rósea, os grãos apresentam pericarpo branco e são de forma cilíndrica e achatada. O perigônio (estrutura que envolve o fruto) é de coloração verde, com ausência de saponina. A estatura média da planta é de 1,90 m, da qual a inflorescência ocupa 0,45 m. O período entre a emergência e a maturação fisiológica é de 145 dias. Os valores médios da produtividade, no período 1998-1999, foram de 2,8 t ha<sup>-1</sup> de grãos e 6,6 t ha<sup>-1</sup> de matéria seca, valores esses, superiores aos obtidos na maior parte da região andina (SPEHAR e SANTOS, 2007).

Para que o cultivo da quinoa seja incorporado aos sistemas de produção agropecuária, torna-se necessário demonstrar sua competitividade. A colheita e o armazenamento devem levar em conta peculiaridades da planta, a fim de garantir a qualidade do produto final e atender às especificidades do consumidor e da indústria de alimentos.

Considerando a necessidade de melhorias tecnológicas no processamento pós-colheita, objetivando produtos de maior qualidade, o conhecimento das propriedades físicas de produtos agrícolas é de fundamental importância para uma correta conservação e para o dimensionamento e operação de equipamentos para as principais operações pós-colheita de produtos agrícolas. A fim de minimizar os custos de produção para maior competitividade e melhoria da qualidade do produto processado, a determinação e o conhecimento do

comportamento das propriedades físicas dos grãos de quinoa são os principais fatores que contribuem para o adequado desenvolvimento de processos e simulações que visem o crescimento e o aperfeiçoamento do sistema produtivo dessa cultura.

Visando a disponibilidade dos dados para o dimensionamento de máquinas para a colheita, processamento e armazenamento de grãos de quinoa, neste trabalho objetivou-se determinar e investigar o comportamento das propriedades físicas, térmicas e aerodinâmicas dos grãos de quinoa, cultivar BRS Piabiru, em função dos diferentes teores de água.

## CAPÍTULO 1

### REVISÃO DE LITERATURA

#### 1.1. A QUINOA

*Chenopodium quinoa* Willd, é um pseudocereal cultivado nas regiões andinas por milhares de anos. Nos tempos pré-incas, a quinoa era utilizada na agricultura e no intercâmbio comercial entre as civilizações peruanas antigas, atingindo posteriormente o nível de cultura sagrada para os incas. A quinoa é, até hoje, uma planta de elevado prestígio entre seus herdeiros, pelo seu alto valor nutricional, medicinal e, sobretudo, pela sua alta resistência às intempéries (TAPIA, 1990).

Um dos fatores que dificultam a inserção dessa granífera ao sistema de produção é o acúmulo de glicosídeos (ácido oleanólico, hederagenina, ácido fitolacagênico e ácido desoxifitolacagênico), genericamente chamados de saponina. A saponina confere gosto amargo ao grão. Os processos empregados na retirada desses compostos – escarificação, aquecimento e lavagem – são caros e trabalhosos, o que os tornam pouco viáveis, dificultando o consumo do grão in natura ou sua industrialização (SOUZA, et al., 2004). Porém, o grão possui elevado teor de proteína e melhor equilíbrio na distribuição de aminoácidos essenciais. Isso tem contribuído para a popularização da quinoa entre as pessoas que buscam alimentos alternativos com alto valor nutritivo e baixo colesterol (SPEHAR e SANTOS, 2007).

Dentre os produtores de quinoa no mundo, a Bolívia é o maior produtor com 46% da produção mundial, seguido pelo Peru, com 42%, e Estados Unidos com 6,3%. No entanto, o Peru possui a maior diversidade de espécies e variedades de quinoa, existentes no mundo, em função da variedade de tipos de solo e altitudes (TEJADA CAMPOS, 2004)

No Brasil, o plantio da quinoa é recente, sua introdução ocorreu nos anos 1990, como parte de um esforço para diversificar o sistema de produção no Bioma Cerrado. A Embrapa-Centro de Pesquisa Agropecuária dos Cerrados, com a participação da Embrapa-Centro Nacional de Pesquisa de Recursos Genéticos e Biotecnologia, da Universidade de Brasília, da Universidade Federal de Goiás, da Escola Superior de Ciências Agrárias de Rio Verde e da Associação de Plantio Direto nos Cerrados, tem realizado trabalho pioneiro com a quinoa, para adaptá-la ao cultivo no país (SPEHAR e SANTOS, 2002).

A cultivar BRS Piabiru é a primeira recomendação de quinoa como cultivo granífero no Brasil. Originou-se da linhagem EC 3, selecionada a partir de uma população procedente de Quito, Equador. A coloração é variável entre verde e rósea, os grãos apresentam pericarpo branco e são de forma cilíndrica e achatada. O perigônio (estrutura que envolve o fruto) é de coloração verde, com ausência de saponina. A altura média da planta é de 1,90 m, da qual a inflorescência ocupa 0,45 m. O período entre a emergência e a maturação fisiológica é de 145 dias. Os valores médios da produtividade, no período 1998-1999, foram de 2,8 t ha<sup>-1</sup> de grãos e 6,6 t ha<sup>-1</sup> de matéria seca, valores esses, superiores aos obtidos na maior parte da região andina (SPEHAR e SANTOS, 2007).

A quinoa, cultivar BRS Piabiru, pode ser semeada em qualquer época do ano, a depender da finalidade. Quando objetiva-se a produção de grãos, as semeaduras de safrinha e de entressafra (inverno) são as que produzem melhor resultado. Para produção de forragem, pode-se semear no início do período das chuvas. Quando a semeadura é atrasada, a planta pode ser utilizada para produção de grãos, pelo escape do excesso de umidade no final do ciclo da planta. Ela amadurece como a soja ou o trigo, ou seja, a planta inteira seca, o que facilita a colheita. Entretanto, por possuir sementes pequenas, é necessário regular a colhedora para reduzirem-se as perdas.

Os fatores que tornam a quinoa atrativa no sistema de produção são as diferentes utilizações do grão e da planta. De acordo com Tavárez et al. (1995) citado por SPEHAR (2006) a planta pode ser utilizada para o consumo animal e humano, nas fases de seu desenvolvimento. Quando nova, a parte superior pode ser colhida e usada como espinafre. Quando se inicia a diferenciação floral, os botões florais podem ser consumidos como os brócolis: cozidos. Com o avanço na fase reprodutiva, pode-se utilizar a planta triturada, como forragem para os animais domésticos. Em variedades tardias, o corte pode ser realizado pouco antes da floração, pois a planta rebrota e ainda produz grãos.

Os grãos podem ser utilizados de várias formas: em saladas, em molhos ou em sopas. A farinha derivada do grão pode ser utilizada na alimentação infantil e na elaboração de mingaus, pudins, pães enriquecidos, panquecas e biscoitos. Na indústria alimentícia pode-se obter, por extrusão, farinha instantânea e expansos. Cita-se ainda, o emprego da quinoa em dietas especiais para pacientes celíacos, devido à ausência de glúten no grão (SPEHAR, 2006).

Portanto, são muitas as formas de utilização da quinoa, assim como as possibilidades de sua integração ao sistema produtivo. Com o uso, surge a demanda e, daí, surge o mercado; o agricultor passa a cultivá-la, e desencadeia-se o processo produtivo. Essa seqüência

caracterizou o estabelecimento de outras cadeias produtivas importantes no mundo, como a da soja e a do milho.

Para que o cultivo da quinoa seja incorporado aos sistemas de produção agropecuária, torna-se necessário demonstrar sua competitividade. Dentre os fatores primordiais para o sucesso desse cultivo, destacam-se a qualidade da semente, a escolha varietal, época de semeadura. A colheita e o armazenamento devem levar em conta peculiaridades da planta, a fim de garantir a qualidade do produto final e atender às especificidades do consumidor e da indústria de alimentos.

## 1.2. PROPRIEDADES FÍSICAS

Informações referentes às características físicas dos produtos agrícolas, são consideradas de grande importância para estudos envolvendo a movimentação de ar, a transferência de calor e massa em produtos granulares. São parâmetros básicos para o estudo das condições de secagem e armazenagem de produtos agrícolas e, conseqüentemente, possibilitam a predição de perdas de qualidade do material até o momento de sua comercialização (SILVA et al., 2003).

As propriedades físicas dos grãos são características relevantes na otimização dos processos industriais e no desenvolvimento de novos projetos e equipamentos utilizados nas operações pós-colheita. Variações dessas propriedades em função do teor de água e de outros fatores durante a secagem de vários produtos, têm sido investigadas por diversos autores (TEIXEIRA, et al., 2003; RUFFATO et al., 1999; MCMINN e MAGEE, 1997;).

A caracterização do tamanho, forma, massas específicas e porosidade, são dados de entrada, utilizados em projetos de engenharia envolvendo dimensionamento de máquinas e equipamentos para colheita, armazenamento, secagem e aeração de grãos.

A massa específica pode ser definida como a razão entre a massa e o volume ocupado por determinado produto. Este conceito aplicado à massa e ao volume de apenas um grão determina a massa específica real ou unitária. Já a aplicação do conceito para uma determinada massa ou quantidade de produto estabelece a definição da característica massa específica aparente ou granular (PABIS et al., 1998).

A massa específica aparente dos grãos submetidos à secagem, geralmente, aumenta com a diminuição do teor de água do produto, sendo este comportamento dependente da percentagem de grãos danificados, do teor inicial de água, da temperatura alcançada durante a secagem, do teor de água final e da variedade do grão (BROOKER et al., 1992).

A massa específica aparente pode ser utilizada como indicador qualitativo. Decréscimo no seu valor durante o armazenamento pode ser associado à perda de qualidade. Baixo valor na relação massa/volume (peso hectolítrico) em trigo, por exemplo, indica a possibilidade de moagem pobre, baixo rendimento e qualidade inferior da farinha. Silva (1997), afirmou que baixos valores de massa específica são encontrados em grãos que perderam, excessivamente, matéria seca devido à infestação de fungos e/ou de insetos no campo e/ou no armazenamento.

A porosidade de uma massa granular de acordo com Sasseron (1980) é definida como a relação entre o volume de espaços vazios ocupados pelo ar nos espaços intergranulares e o volume total da massa de grãos. Tem grande influência sobre a pressão de um fluxo de ar que atravessa a massa de grãos, refletindo-se no dimensionamento dos ventiladores, nos sistemas de secagem e aeração de grãos, principalmente na potência dos motores. A porosidade pode ser determinada por métodos diretos (volume de líquido acrescentado à massa de grãos) e por métodos indiretos, com o uso de picnômetro de comparação a ar.

Teixeira et al. (2003), determinaram a massa específica aparente pelo método da complementação do volume, o tamanho, a esfericidade, e o volume de grãos de milho das variedades HMD7479 e AG409 e concluíram que os resultados obtidos permitem o dimensionamento e o projeto de máquinas de limpeza a ar.

De acordo com Goneli, et al. (2008), informações a respeito do tamanho, da forma, da porosidade e da massa específica, entre outras características físicas dos produtos agrícolas, são parâmetros utilizados para determinar as condições de secagem e armazenagem de produtos agrícolas e, conseqüentemente, possibilitar a predição de perdas de qualidade do material até o momento de sua comercialização.

Segundo Vilche et al. (2003) a determinação das propriedades físicas de sementes de quinoa, como de outras sementes é útil para melhorar a tecnologia associada às diferentes operações e equipamentos relacionados ao processo de pós-colheita, tais como, limpeza, classificação, transporte, aeração, secagem e armazenagem. O conhecimento da morfologia e da distribuição do tamanho das sementes de quinoa é essencial para a adequada finalidade do equipamento de limpeza, classificação e separação.

### 1.3. PROPRIEDADES TÉRMICAS

O conhecimento das propriedades térmicas de grãos e sementes é essencial para o desenvolvimento das ciências agrícolas e de alimentos, podendo ser empregadas a uma variedade de objetivos, tais como: a predição da taxa de secagem, aquecimento ou



resfriamento, otimização do desempenho de equipamentos de transferência de calor, reidratação e aparatos de esterilização (ITO, 2003).

Segundo Tavman e Tavman (1997), com o aumento da mecanização e a introdução de novos processos de secagem e armazenamento de produtos vegetais tem-se aumentado a importância do cálculo da transferência de massa e calor com a finalidade de se otimizar e facilitar esses processos. Muitos dos problemas encontrados na secagem e armazenagem de produtos vegetais podem ser analisados utilizando-se as equações básicas de transferência de calor. No entanto, para o uso dessas equações, é necessário o conhecimento das propriedades térmicas dos produtos.

A transferência de calor numa massa de grãos é um fenômeno físico que ocorre principalmente por condução ou convecção. O calor é transferido de grão a grão por condução pelo contato entre eles. Além disso, o calor pode ser transferido para outras regiões na massa de grãos por meio da movimentação do ar nos espaços intergranulares (convecção).

Incropera e Witt (1996) definem o calor específico como sendo a quantidade de energia necessária para elevação de um grau Celsius uma determinada unidade de massa, conforme Equação 1.

$$C = \frac{Q}{(\rho V)\Delta t} \quad (1)$$

em que,

C: calor específico,  $\text{JKg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ;

Q: quantidade de calor, W

$\rho$ : massa específica,  $\text{Kg m}^{-3}$ ;

V: volume,  $\text{m}^3$ ; e

$\Delta t$ : gradiente de temperatura,  $^\circ\text{C}$ .

Mohsenin (1980) descreveu alguns métodos utilizados para medir o calor específico de produtos agrícolas:

- Método das Misturas: O calor específico é estimado a partir do equilíbrio térmico entre a água do calorímetro e o produto.
- Método do prato-protegido: uma amostra cercada por isolantes é submetida ao aquecimento elétrico.
- Método de cálculo: no qual o calor específico é determinado por meio de outras propriedades térmicas como a condutividade térmica e a difusividade térmica.

- Método Adiabático: baseia-se na quantidade de calor que é adicionada a um produto agrícola por meio de cabos aquecedores que estão inseridos na amostra.
- Calorímetro scanner diferencial (DSC): baseia-se em determinar o calor específico através dos efeitos da temperatura no sistema a partir de efeitos térmicos produzidos por processos térmicos.

A condutividade térmica de um material é a medida da intensidade de calor que passa de uma região quente para uma região mais fria do referido material. As sementes e grãos possuem a condutividade térmica muito pequena e isto faz com que a transferência de calor do ambiente para a massa de grãos, por condução, seja um processo lento. Esse aspecto é importante para a armazenagem de grãos e sementes, pois uma vez que a massa é resfriada, a sua temperatura pode ser mantida por determinado intervalo de tempo. Assim, grandes massas de grãos e sementes podem manter maior estabilidade térmica do que pequenas massas (DELMITO, 2006).

Dentre os valores de condutividade térmica de grãos disponíveis na literatura, a maioria foi determinada segundo o método estacionário. De modo geral, este não é um método apropriado para produtos biológicos, devido ao fato de os longos intervalos de tempo necessários para as determinações propiciarem modificações significativas no teor de água do produto (ANDRADE et al., 2004).

O cientista francês J.B.J. Fourier, em 1822 propôs o estudo sobre a transmissão de calor onde descreveu que um gradiente de temperatura distribuído ao longo de uma espessura gera um fluxo de calor por unidade de área diretamente proporcional ao gradiente, definindo a constante de proporcionalidade, conhecida como condutividade térmica, podendo ser expressa de acordo com a Equação 2 (INCROPERA e WITT, 1996).

$$\frac{Q}{A} = -K \frac{dT}{dr} \quad (2)$$

em que:

K: condutividade térmica,  $W m^{-1} \text{ } ^\circ C^{-1}$ ;

Q: quantidade de calor, W;

A: área de transferência de calor,  $m^2$ ;

T: temperatura,  $^\circ C$ ;

R: raio, m; e

$dT/dr$ : gradiente de temperatura ao longo do raio,  $^\circ C m^{-1}$ .

Existem muitas referências na literatura, nas quais se discutem vários tipos de aparelhos empregados na medição da condutividade térmica de alimentos e grãos. Ito (2003) faz a citação de alguns deles:

- Método da sonda: consiste em inserir numa amostra cilíndrica uma agulha hipodérmica, dentro do qual estão localizados um termopar e um fio aquecedor.
- Método das placas paralelas: Consiste de três placas superpostas, com a placa quente colocada entre duas placas frias, formando-se uma disposição em forma de sanduíche com o material em teste. A condutividade térmica é dada pela fórmula de Fourier.
- Método do Cilindro Infinito: Um dos métodos mais usados atualmente para determinação da condutividade térmica de produtos agrícolas é baseado na transmissão de calor num cilindro infinito com uma fonte de calor linear central. Essa transferência pode ser analisada em regimes permanentes ou transientes. Esse método consiste na utilização de um cilindro, construído com material resistente e de alta condutividade térmica, de diâmetro e comprimento pré-determinados. Longitudinalmente, no centro do cilindro, coloca-se um fio de resistência elétrica conhecida (fonte linear de calor), que será percorrido por uma corrente (baixa amperagem) quando submetido a uma diferença de tensão. A variação de temperatura do meio é registrada por meio de termopares situados preferencialmente à meia altura do cilindro. O cilindro infinito é uma idealização que possibilita adotar a hipótese da condução unidimensional na direção radial. É uma aproximação razoável se o cilindro tiver altura/raio  $\geq 10$  (INCROPERA e WITT, 1996).

O método do cilindro infinito em regime transiente tem sido utilizado por vários pesquisadores para a determinação da condutividade térmica em grãos agrícolas (HOOPER e LEPPER, 1950; DICKERSON, 1965; MUIR e CHANDRA, 1970; CHANDRA e MUIR, 1971; REIDY e RIPPEN, 1971; JASANSKY e BILANSKI, 1973; SHARMA e THOMPSON, 1973; SUTER et al., 1975; ALMEIDA, 1979; PASSOS, 1982; SINGH, 1982; DROUZAS e SARAVACOS, 1988).

A difusividade térmica expressa a variação da temperatura do material quando submetido a um processo de resfriamento ou aquecimento, sendo descrita em função de outras três propriedades que são a condutividade térmica, a massa específica e o calor específico, Equação 3:

$$\alpha = \frac{K}{(\rho.Cp)} \quad (3)$$

em que,

$\alpha$  = Difusividade térmica,  $\text{m}^2\text{s}^{-1}$ ;

$\rho$  = Massa Específica,  $\text{kg m}^{-3}$ ; e

$C_p$  = Calor específico,  $\text{J kg}^{-1}\text{°C}^{-1}$ .

Nesta equação, o denominador indica a capacidade do produto de absorver calor, ao passo que o numerador indica a capacidade do produto em transferir calor através dele.

#### 1.4. PROPRIEDADES AERODINÂMICAS

O conhecimento das características fluidodinâmicas é de suma importância para o desenvolvimento de máquinas utilizadas nas etapas de colheita, pré-processamento e armazenamento da quinoa. O conhecimento da velocidade terminal e das forças de arraste do produto são importantes no projeto de sistemas de limpeza utilizados nas máquinas de colheita. Um produto colhido com menor teor de impurezas torna mais fácil as operações de pré-processamento do produto, facilita a obtenção de um produto final de melhor qualidade e reduz o consumo de energia, especialmente na secagem. Quanto mais limpo estiver o produto, menor será a quantidade de energia consumida na secagem e mais uniforme será a secagem do produto. O conhecimento da velocidade terminal, forças de arraste e resistência ao fluxo de ar impostas pela massa de quinoa são importantes no projeto de máquinas utilizadas na limpeza, transporte e secagem durante as fases de pré-processamento e de armazenamento. Conhecendo-se essas características pode-se projetar sistemas de movimentação que sejam mais eficientes na realização das operações e que resultem em um menor gasto de energia.

As máquinas de limpeza e pré-limpeza operam, normalmente, baseadas no sistema de separação, utilizando fluxo de ar e conjunto de peneiras. Para o desenvolvimento de máquinas, que utilizam fluxo de ar para separar os grãos das impurezas, é essencial o conhecimento da velocidade terminal e do coeficiente de arraste de todas as partículas que compõem a mistura produto / impureza (MOHSENIN, 1978).

A determinação da velocidade terminal de acordo com Pinheiro (1975), baseia-se no princípio que uma partícula em queda livre em uma corrente de ar ascendente, está sujeita a três tipos de forças:

- Força gravitacional ( $\vec{W}$ )
- Força Devido ao Empuxo do Ar ( $\vec{E}_{ar}$ )
- Força Resistente ( $\vec{F}_r$ )

No instante em que estas grandezas vetoriais se equilibram, a partícula passa a mover-se a uma velocidade constante, denominada velocidade terminal. Quando isso ocorre, pode-se escrever:

$$\text{Peso} - \text{Empuxo} = \text{Força Resistente} \quad (4)$$

ou seja:

$$M \cdot g \cdot \frac{\rho_p - \rho_f}{\rho_p} = \frac{1}{2} \cdot C \cdot \rho_f \cdot A_p \cdot V_t^2 \quad (5)$$

e a velocidade terminal fica assim determinada:

$$V_t = \left[ \frac{2 \cdot W \cdot (\rho_p - \rho_f)}{C \cdot \rho_f \cdot \rho_p \cdot A_p} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

em que:

$V_t$  = Velocidade terminal, m s<sup>-1</sup>;

$W$  = Peso da partícula, N;

$\rho_p$  = Massa específica da partícula, Kg m<sup>-3</sup>;

$\rho_f$  = Massa específica do fluido, Kg m<sup>-3</sup>;

$C$  = Coeficiente de arraste, adimensional;

$A_p$  = Área projetada da partícula, normal ao seu movimento em relação ao fluido, m<sup>2</sup>.

Desta maneira, pode-se determinar a velocidade terminal de uma partícula teoricamente, desde que se conheçam os parâmetros envolvidos. O coeficiente de arraste que aparece na expressão depende tanto da velocidade como do Número de Reynolds, sendo necessário recorrer ao método de ajuste por tentativa, conforme Giles (1972).

### 1.5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, B. V. **Determinação de propriedades físicas de amêndoas de cacau (*Theobroma cacao*, L.)**. Viçosa, MG. Universidade Federal de Viçosa. Mestrado em Engenharia Agrícola, 70 p. 1979.
- ANDRADE, E. T. ; COUTO, S. M. ; QUEIROZ, D. M. ; PEIXOTO, A. B. Determinação de propriedades térmicas de grãos de milho. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 28, n. 3, p. 490-500, 2004.
- BROOKER, D.B.; BAKKER-ARKEMA, F.W.; HALL, C.W. **Drying and storage of grains and oilseeds**. New York: Van Nostrand Reinhold, 1992. 450 p.
- CHANDRA, S.; MUIR, W. E. Thermal conductivity of spring wheat at low temperature. **Transactions of the ASAE**, Saint Joseph, v. 14, p. 644-646, 1971.
- DELMITO, A.; **Qualidade de sementes de soja resfriadas artificialmente**. Cascavel, PR: Universidade Estadual do Oeste do Paraná. Dissertação de Mestrado, 2006.
- DICKERSON, R. W. An apparatus for the measurement of thermal diffusivity of foods. **Food Technology**, Chicago, p. 198-204, May 1965.
- DROUZAS, A.E.; SARAVACOS, G. D. Effective thermal conductivity of granular starch materials. **Journal of Food Science**, Athens, v. 53, n. 6, p. 1795-1799, 1988.
- GILES, R.V. **Mecânica dos fluidos e hidráulica**. São Paulo, McGraw-Hill do Brasil, 1972. 401p.
- GONELI, A.L.D.; CORRÊA, P.C.; BOTELHO, F. M.; OLIVEIRA, G.H.H. de; SANTOS, E. de S. Propriedades físicas dos frutos de mamona durante a secagem. **Revista Brasileira de Armazenamento**. Viçosa, v.33, n. 2, p.148-155, 2008.
- HOOPER, F. C.; LEPPER, F. R. Transient heat flow apparatus for the determination of thermal conductivities. **Transactions ASHVE**, Saint Joseph, v. 56, p. 309-322, 1950.
- JASANSKY, A.; BILANSKI, W. K. Thermal conductivity of whole and ground soybeans. **Transactions of the ASAE**, Saint Joseph, p. 100-103, 1973.
- INCROPERA, F. P.; WITT, D. P. **Fundamentals of heat and mass transfer**. New York: John Wiley & Sons, 1996. 886 p.
- ITO, A.P. **Determinação de condutividade e difusividade térmica de grãos de soja**. Campinas, SP: Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola. Dissertação de Mestrado, 115p. 2003.
- MCMINN, W. A. M.; MAGEE, T. R. A. Physical characteristics of dehydrated potatoes – part I. **Journal of Food Engineering**, v.33, n.1-2, p.37-48, 1997.

MOHSEENIN, N.N. **Thermal properties of foods and agricultural materials**. London, Gordon & Breach science Publishers, p.407, 1980.

MUIR, W. E.; CHANDRA, S. Thermal conductivity of spring wheat at low temperatures. **Transactions of the ASAE**, Saint Joseph, n. 49, p. 15, 1970.

PABIS, S.; JAYAS, D.S.; CENKOWSKI, S. **Grain drying: theory and practice**. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1998. 303p.

PASSOS, E. F. Condutividade térmica da pasta de mandioca. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 29, n. 162, p. 222-231, 1982.

PINHEIRO, M. C. **Propriedades físicas de frutos de soja UFV-1**. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa, Dissertação de Mestrado, 129p. 1975.

REIDY, G. A.; RIPPEN, A. L. Methods for determining thermal conductivity in foods. **Transactions of the ASAE**, Saint Joseph, v. 14, n. 2, p. 248-254, 1971.

RUFFATO, S.; CORRÊA, P. C.; MARTINS, J. H.; MANTOVANI, B. H. M. SILVA, J. N. Influência do processo de secagem sobre a massa específica aparente, massa específica unitária e porosidade de milho-pipoca. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.3, n.1, p.45-48, 1999.

SASSERON, J.L. **Características dos grãos armazenados**. Viçosa: Centreinar, 1980. 65p.

SHARMA, D. K.; THOMPSON, T. L. Specific heat and thermal conductivity of sorghum. **Transactions of the ASAE**, Saint Joseph, v. 16, n. 1, p. 114-117, 1973.

SINGH, R. P. Thermal diffusivity in food processing. **Food Technology**, Chicago, v. 36, n. 2, p. 87-91, 1982.

SILVA, A. A. L. **Influência do processo de colheita na qualidade do milho (Zea mays L.) durante o armazenamento**. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa. Dissertação de Mestrado em Engenharia Agrícola. 77 p. 1997.

SILVA, F.S.; CORRÊA, P.C.; GONELI, A.L.D.; RIBEIRO, R. M.; AFONSO JÚNIOR, P. C. Efeito do beneficiamento nas propriedades físicas e mecânicas dos grãos de arroz de distintas variedades. **Revista brasileira de produtos agroindustriais**, Campina Grande, v.5, n.1, p.33-41, 2003.

SOUZA, L.A.C.; SPEHAR, C.R.; SANTOS, R. L. B. Análise de imagem para determinação do teor de saponina em quinoa. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 39, n.4, p. 397-401, 2004.

SPEHAR, C.R. Adaptação da Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd) para incrementar a diversidade agrícola e alimentar no Brasil. **Cadernos de Ciência e Tecnologia**. Brasília. V. 23, n. 1 p. 41-62, 2006.

SPEHAR, C.R.; SANTOS, R.L.B. Origem e Importância da Quinoa. In: SPEHAR, C.R. (Ed.). **Quinoa: Alternativa para a diversificação agrícola e alimentar**. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2007. Cap. 1, p. 21-29.

SPEHAR, C.R.; SANTOS, R.L.B. Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd) BRS Piabiru: alternativa para diversificar os sistemas de produção de grãos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 37, n. 6, p. 889-893, 2002.

SUTER, D. A.; AGRAWAL, K. K.; CLARY, B. L. Thermal properties of peanut pods, hulls and kernel. **Transactions of the ASAE**, Saint Joseph, v. 18, n. 2, p. 370-375, 1975.

TAPIA, M. E. **Cultivos Andinos subexplotados y su aporte a la alimentación**. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y Alimentación. FAO. Oficina regional para América Latina y el Caribe. 191p., 1990.

TAVMAN, S., TAVMAN, I. H. Measurement of Thermal Diffusivity of granular Food materials. **International Communicator in Heat and Mass Transfer**, USA, v. 24, n. 7, p. 945-953, 1997.

TEIXEIRA, M. M.; MARTYN, P. J.; HARA, T.; CUNHA, J. P. A. R. Propriedades físicas e aerodinâmicas aplicadas ao projeto de máquinas de limpeza para grãos de milho. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, v.11, n. 1-4, p. 52-57, 2003.

TEJADA CAMPOS, T. **El cultivo de la quinua (*Chenopodium quinoa* Willdenow)**. Série: Manual Técnico. 1ª Edição, Suporte Técnico: Estação Experimental Baños del Inca – INIA Cajamarca, 57p. 2004.

VILCHE, C.; GELY, M.; SANTALLA, E. Physical properties of quinoa seeds. **Biosystems Engineering**. v. 86, n.1, p. 59-65, 2003.



## CAPÍTULO 2

### PROPRIEDADES FÍSICAS DOS GRÃOS DE QUINOA (*Chenopodium quinoa* Willd)

#### 2.1. INTRODUÇÃO

A quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.), da família Chenopodiaceae, é uma espécie domesticada pelos habitantes da cordilheira dos Andes há milhares de anos. Até meados do século passado, a quinoa era considerada cultura de subsistência nas regiões de origem, entretanto vêm se consolidando na alimentação humana e animal devido a suas propriedades nutricionais e funcionais (SPEHAR e SANTOS, 2002).

O grão de quinoa possui elevado teor de proteína e melhor equilíbrio na distribuição de aminoácidos essenciais. Isso tem contribuído para a popularização da quinoa entre as pessoas que buscam alimentos alternativos com alto valor nutritivo e baixo colesterol (SPEHAR e SANTOS, 2007).

Os fatores que tornam a quinoa atrativa no sistema de produção são as diferentes utilizações do grão e da planta. Segundo Spehar (2006), a planta pode ser utilizada para o consumo animal e humano, nas fases de seu desenvolvimento. Os grãos podem ser utilizados de várias formas, em saladas, molhos e sopas. A farinha derivada do grão pode ser utilizada na alimentação infantil e na elaboração de mingaus, pudins, pães enriquecidos, panquecas e biscoitos. Na indústria alimentícia pode-se obter, por extrusão, farinha instantânea e expansos. Cita-se ainda o emprego da quinoa em dietas especiais para pacientes celíacos, devido à ausência de glúten no grão.

Para que o cultivo da quinoa seja incorporado aos sistemas de produção agropecuária, torna-se necessário demonstrar sua competitividade. Dentre os fatores primordiais para o sucesso desse cultivo, destacam-se a qualidade da semente, a escolha varietal, e a época de semeadura. A colheita, a secagem e o armazenamento devem levar em conta peculiaridades da planta, a fim de garantir a qualidade do produto final e a atender às especificidades do consumidor, da indústria de alimentos e de rações.

A cultivar BRS Piabiru é a primeira recomendação de quinoa como cultivo granífero no Brasil. Originou-se da linhagem EC 3, selecionada a partir de uma população procedente de Quito, Equador. A coloração é variável entre verde e rósea, os grãos apresentam pericarpo

branco e são de forma cilíndrica e achatada. O perigônio (estrutura que envolve o fruto) é de coloração verde, com ausência de saponina. A estatura média da planta é de 1,90 m, da qual a inflorescência ocupa 0,45 m. O período entre a emergência e a maturação fisiológica é de 145 dias. Os valores médios da produtividade, no período 1998-1999, foram de 2,8 t ha<sup>-1</sup> de grãos e 6,6 t ha<sup>-1</sup> de matéria seca, valores esses, superiores aos obtidos na maior parte da região andina (SPEHAR e SANTOS, 2007).

Para adequar e otimizar os processos desde o dimensionamento de máquinas e equipamentos para o plantio, a colheita, o pré-processamento e o armazenamento, faz-se necessário a determinação e o conhecimento do comportamento das propriedades físicas dos grãos de quinoa.

A determinação das propriedades físicas de grãos em função do teor de água e de outros fatores durante o processo de secagem tem sido objetivo de vários estudos. Vilche et al. (2003) pesquisaram o tamanho e a forma dos grãos de quinoa, Santalla e Mascheroni (2003), as sementes de girassol, Bhattacharya et al. (2005) pesquisaram grãos de lentilha, Dursun et al. (2007) sementes de beterraba, dentre outros.

De acordo com Goneli et al. (2008), as informações a respeito do tamanho, da forma, da porosidade e da massa específica, entre outras características físicas dos produtos agrícolas, são parâmetros utilizados para determinar as condições de secagem e armazenagem de produtos agrícolas e, conseqüentemente, possibilitar a predição de perdas de qualidade do material até o momento de sua comercialização.

Avaliando o efeito do teor de água nas propriedades físicas dos grãos de feijão da cultivar Vermelho Coimbra, durante a secagem, Resende et al. (2008), determinaram a massa específica aparente e a porosidade utilizando-se uma balança de peso hectolítrico e um picnômetro de comparação a ar, respectivamente. Concluíram que a redução no teor de água pela secagem influencia as propriedades físicas dos grãos, proporcionando a diminuição da porosidade e o aumento das massas específica aparente e unitária.

Ribeiro et al. (2005), avaliando o efeito da secagem nas propriedades físicas dos grãos de soja em função do teor de água, concluíram que a redução do teor de água de 31 para 15% b.s. provoca a diminuição linear da porosidade e o aumento das massas específicas aparente e unitária.

Visando a disponibilidade de dados para o dimensionamento de máquinas para a colheita, processamento e armazenamento de grãos de quinoa, este trabalho determina e investiga o comportamento das propriedades físicas dos grãos de quinoa, cultivar BRS Piabiru, em função dos diferentes teores de água obtidos por absorção.

## 2.2. MATERIAL E MÉTODOS

Os experimentos foram realizados no Laboratório de Secagem e Armazenamento de Produtos Vegetais da Universidade Estadual de Goiás, Anápolis – GO.

Foram utilizados grãos de quinoa (*Chenopodium Quinoa* Willd), cultivar BRS Piabiru, produzidos na Fazenda Dom Bosco, localizada em Planaltina-GO, na entressafra de 2008. Os grãos foram transportados ao laboratório no mês de outubro de 2008. Em seguida, foram armazenados em sacos plásticos e acondicionados em um freezer regulado à temperatura de  $5 \pm 1^\circ\text{C}$  por um período de 3 meses.

O teor de água inicial foi de 12,8% b.s., determinado pelo método padrão da estufa, à temperatura de  $105 \pm 3^\circ\text{C}$ , durante 24 h, em três repetições, de acordo com a Regra para Análise de Sementes (BRASIL, 2009).

O produto foi submetido à limpeza, para a retirada de pequenas flores e pó, utilizando-se uma peneira de crivos quadrados de  $1,18 \times 10^{-3}$  m de lado. Os grãos retidos na peneira foram homogeneizados manualmente e divididos em sete subamostras, de aproximadamente, 300 g, cada.

Devido à falta de produto com diferentes teores de água, as subamostras foram umidificadas, conforme descrito por Vasconcelos (1998). Inicialmente calculou-se a massa seca da amostra a ser umidificada. Sabendo-se a umidade final desejada determinou-se a quantidade de água que foi adicionada por aspersão diretamente sobre o produto, utilizando-se um pulverizador manual. As amostras foram acondicionadas em sacos plásticos e levadas à uma câmara tipo B.O.D. à  $5 \pm 1^\circ\text{C}$ , durante sete dias para que ocorresse a uniformização da umidade. Posteriormente, as propriedades físicas dos grãos de quinoa, cultivar BRS Piabiru, foram determinadas em sete teores de água (12,8; 13,8; 14,8; 15,7; 17,6; 18,3 e 19,7% b.s.).

Na determinação do tamanho dos grãos foram medidas as dimensões dos eixos ortogonais (comprimento, largura e espessura), Figura 1, em cinquenta grãos, com o auxílio de um paquímetro digital com precisão 0,01mm, de acordo com (MOHSENIN, 1986; BENEDETTI, 1987; VASCONCELOS, 1998; VILCHE, 2003).

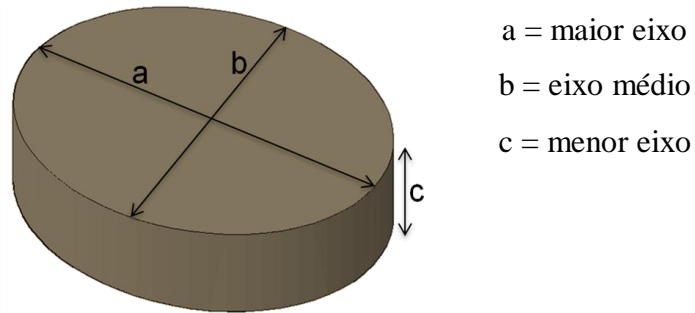


FIGURA 1- Eixos ortogonais dos grãos de quinoa.

A forma dos grãos de quinoa foi estimada, conforme sugerido por Mohsenin (1978), em cinquenta repetições.

Após a determinação das medidas dos eixos ortogonais, a esfericidade foi estimada conforme a Equação 1:

$$S = \frac{(a.b.c)^{\frac{1}{3}}}{a} .100 \quad (1)$$

em que,

S = esfericidade, %;

a = medida do maior eixo do grão, m;

b = medida do eixo normal ao eixo a, m; e

c = medida do eixo normal aos eixos a e b, m.

A circularidade dos grãos de quinoa foi estimada pela Equação 2, conforme sugerido por Mohsenin (1978), considerando a posição de repouso natural dos grãos.

$$C = \left( \frac{d_i}{d_c} \right) .100 \quad (2)$$

em que,

C = circularidade, %

$d_i$  = diâmetro do maior círculo inscrito (eixo b), m; e

$d_c$  = diâmetro do menor círculo circunscrito (eixo a), m.

A determinação da massa específica aparente foi realizada, em quinze repetições, utilizando um cilindro plástico de volume conhecido e uma balança de precisão de 0,01g. Fixou-se uma altura de queda de 0,1m para o enchimento do recipiente. Em seguida pesou-se o recipiente com os grãos e utilizou-se a seguinte equação:

$$\rho_{ap} = \frac{m}{V} \quad (3)$$

em que,

$\rho_{ap}$  = massa específica aparente,  $\text{kg m}^{-3}$ ;

$m$  = massa do produto, kg; e

$V$  = volume do recipiente,  $\text{m}^3$ .

Para determinar a massa específica unitária, quinze grãos de quinoa foram pesados individualmente em balança analítica de precisão de 0,0001g, em seguida mediu-se os três eixos ortogonais (a, b, c). O volume de cada grão foi estimado, para cada teor de água, conforme a expressão sugerida por Mohsenin (1978):

$$V = \frac{\pi(abc)}{6} \quad (4)$$

A massa específica unitária foi calculada dividindo-se a massa de cada grão pelo seu respectivo volume, em  $\text{Kg.m}^{-3}$ .

A porosidade foi estimada, utilizando-se a Equação 5, sugerida por Mohsenin (1978):

$$\varepsilon = 1 - \left( \frac{\rho_{ap}}{\rho_u} \right) \cdot 100 \quad (5)$$

em que,

$\varepsilon$  = porosidade, %;

$\rho_{ap}$  = massa específica aparente,  $\text{kg m}^{-3}$ ; e

$\rho_u$  = massa específica unitária,  $\text{kg m}^{-3}$ .

O diâmetro equivalente dos grãos de quinoa foram estimados pela Equação 6, de acordo com Mohsenin (1978), utilizando-se os valores dos eixos ortogonais (a, b, c), medidos para a determinação do tamanho dos grãos de quinoa, para cada teor de água.

$$De = (abc)^{\frac{1}{3}} \quad (6)$$

A massa de mil grãos foi determinada conforme a Regra para Análise de Sementes, contando e pesando-se mil grãos de quinoa em três repetições (BRASIL, 2009). Essas medições foram feitas para cada teor de água avaliado.

As propriedades físicas dos grãos de quinoa, cultivar BRS Piabiru, foram avaliadas no delineamento inteiramente casualizado, no qual os tratamentos foram sete teores de água. Modelos matemáticos foram ajustados aos dados experimentais da massa específica aparente, massa específica unitária, porosidade e massa de mil grãos. Na escolha do melhor modelo foram considerados: a significância dos coeficientes da regressão, pelo teste T; a magnitude do coeficiente de determinação ajustado ( $R^2$ ) e o erro relativo (P), estimado pela Equação 7.

$$P = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{|Y - \hat{Y}|}{Y} \right) \quad (7)$$

em que,

n = número de observações experimentais;

Y = Valor observado experimentalmente; e

$\hat{Y}$  = Valor calculado pelo modelo.

### 2.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As médias dos teores de água dos grãos de quinoa após a reumidificação, bem como seus desvios, foram:  $12,8 \pm 0,07$ ;  $13,8 \pm 0,04$ ;  $14,8 \pm 0,06$ ;  $15,7 \pm 0,09$ ;  $17,6 \pm 0,06$ ;  $18,3 \pm 0,04$  e  $19,7 \pm 0,05\%$  b.s.

A Tabela 1 mostra a análise de variância para os eixos ortogonais (a, b e c), diâmetro equivalente, esfericidade e circularidade dos grãos de quinoa.

TABELA 1– Análise de variância para os eixos ortogonais (a, b e c), diâmetro equivalente, esfericidade e circularidade dos grãos de quinoa.

Causas da variação	Graus de Liberdade	Quadrado Médio (QM)					
		Eixo a	Eixo b	Eixo c	Diâmetro Equivalente	Esfericidade	Circularidade
Tratamentos	6	0,0309*	0,0216*	0,0101*	0,0121*	4,6185 <sup>ns</sup>	8,1697 <sup>ns</sup>
Erro	343	0,0055	0,0055	0,0026	0,0017	2,6047	2,6047
Total	349						

\* = Significativo a 5% de probabilidade pelo teste F.

ns = Não significativo a 5% de probabilidade pelo teste F.

Verifica-se, na Tabela 1, que os eixos ortogonais e o diâmetro equivalente apresentaram diferenças significativas a 5% de probabilidade. O aumento do teor de água alterou o tamanho dos eixos ortogonais dos grãos de quinoa. Nota-se, ainda, que a circularidade e a esfericidade não apresentaram diferenças significativas a 5% de probabilidade, resultando na invariabilidade da forma dos grãos de quinoa com o aumento do teor de água.

Na Tabela 2 são apresentados os valores médios dos eixos ortogonais (a, b, c), o diâmetro equivalente, a esfericidade e a circularidade dos eixos dos grãos de quinoa em diferentes teores de água, bem como seus respectivos desvios.

TABELA 2 – Médias e desvios dos valores dos eixos ortogonais (a, b e c), esfericidade e circularidade dos grãos de quinoa, cultivar BRS Piabiru, em diferentes teores de água.

Teor de água (% b.s.)	Eixo a (10 <sup>-3</sup> m)	Eixo b (10 <sup>-3</sup> m)	Eixo c (10 <sup>-3</sup> m)	Diâmetro Equivalente (10 <sup>-3</sup> m)	Esfericidade (%)	Circularidade (%)
12,8	1,87 ± 0,06	1,83 ± 0,06	1,10 ± 0,06	1,57 ± 0,05	82,97 ± 1,68	97,77 ± 1,65
13,8	1,88 ± 0,08	1,84 ± 0,08	1,09 ± 0,05	1,56 ± 0,05	82,82 ± 1,85	97,74 ± 1,54
14,8	1,90 ± 0,07	1,85 ± 0,07	1,10 ± 0,05	1,57 ± 0,05	82,55 ± 1,72	97,62 ± 1,70
15,7	1,92 ± 0,08	1,87 ± 0,09	1,13 ± 0,06	1,57 ± 0,06	82,51 ± 1,48	97,05 ± 1,98
17,6	1,94 ± 0,07	1,88 ± 0,07	1,12 ± 0,05	1,60 ± 0,05	82,63 ± 1,36	97,00 ± 2,34
18,3	1,93 ± 0,09	1,89 ± 0,08	1,10 ± 0,05	1,60 ± 0,06	82,91 ± 1,49	97,94 ± 1,88
19,7	1,93 ± 0,07	1,87 ± 0,07	1,10 ± 0,05	1,58 ± 0,05	82,08 ± 1,65	97,06 ± 2,29

De acordo com a Tabela 2, verifica-se, um aumento de 3,21 e 2,18% para o comprimento (eixo a) e a largura (eixo b) dos grãos de quinoa, respectivamente, com o aumento do teor de água. Observa-se, também, que os grãos de quinoa alteram irregularmente suas dimensões em diferentes direções. O mesmo comportamento foi observado para diversos produtos, como: sementes de lentilha, investigadas por Amim et al. (2004), grãos de feijão, observados por Rezende et al. (2005), milho pipoca, estudada por Karababa (2006) e sementes de beterraba estudadas por Dursun et al. (2007).

Os eixos ortogonais (a, b e c) e o diâmetro equivalente dos grãos de quinoa, cultivar BRS Piabiru, quinoa Real (VILCHE, 2003), sementes de quiabo (SAITOO e SRIVASTAVA, 2002), trigo (CORRÊA et al., 2006), soja (RIBEIRO et al., 2005), são mostrados na Figura 2, para um teor de água de 15% b.s. Nota-se que os grãos de quinoa da cultivar BRS Piabiru, possuem o diâmetro equivalente 5 e 53 % maior, quando comparado com o diâmetro equivalente dos grãos de quinoa Real (VILCHE et al., 2003) e amaranto (ABALONE et al., 2004), respectivamente. E, ainda, possuem o diâmetro equivalente 147, 247 e 315% menor que de sementes de quiabo (SAITOO e SRIVASTAVA, 2002), trigo (CORRÊA et al., 2006) e soja (RIBEIRO et al., 2005), respectivamente. Os diferentes valores dos eixos ortogonais e do diâmetro equivalente demonstram a variabilidade do tamanho e da forma para diversos produtos agrícolas, mostrando a necessidade de desenvolver tecnologias apropriadas para cada cultivo e processamento.



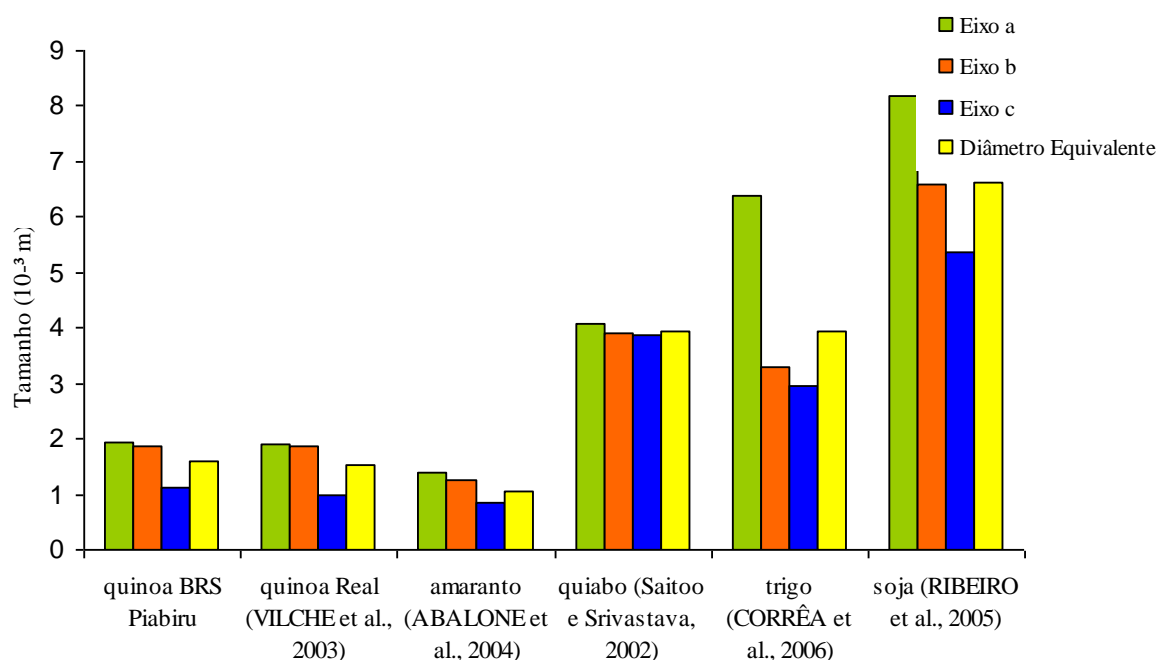


FIGURA 2 - Valores dos tamanhos dos eixos ortogonais e do diâmetro equivalente para diferentes produtos agrícolas com teor de água de 15% b.s.

A análise de variância para a massa específica aparente, massa específica unitária, porosidade e massa de mil grãos de quinoa, são apresentadas na Tabela 3.

TABELA 3 – Análise de variância para a massa específica aparente, massa específica unitária, porosidade e massa de mil grãos de quinoa.

Causas da variação	Massa específica aparente		Massa específica unitária		Porosidade		Massa de mil grãos	
	Graus de Liberdade	Quadrado Médio (QM)	Graus de Liberdade	Quadrado Médio (QM)	Graus de Liberdade	Quadrado Médio (QM)	Graus de Liberdade	Quadrado Médio (QM)
Tratamentos	6	2710,92*	6	5753,93 <sup>ns</sup>	6	60,72*	6	0,029*
Erro	98	9,030	98	11750,77	98	23,94	14	0,004
Total	104		104		104		20	

\* = Significativo a 5% de probabilidade pelo teste F.

ns = Não significativo a 5% de probabilidade pelo teste F.

Os valores da massa específica unitária não apresentaram diferenças significativas ao nível de 5% de probabilidade. Porém, os valores da massa específica aparente, porosidade e massa de mil grãos de quinoa apresentaram diferenças significativas ao nível de 5% de probabilidade.

Os valores da massa específica aparente, massa específica unitária, porosidade e massa de mil grãos de quinoa e seus respectivos desvios, para os diferentes teores de água, são mostrados na Tabela 4.

TABELA 4 – Média e desvios da Massa específica aparente, Massa específica unitária e Porosidade dos grãos de quinoa, cultivar BRS Piabiru.

Teor de água (% b.s.)	Massa Específica Aparente (Kg.m <sup>-3</sup> )	Massa Específica Unitária (Kg.m <sup>-3</sup> )	Porosidade (%)	Massa de mil grãos (10 <sup>-3</sup> Kg)
12,8	703,34 ± 3,16	1235,21 ± 153,26	42,14 ± 7,95	2,60±0,003
13,8	700,06 ± 4,81	1244,57 ± 88,17	43,47 ± 4,20	2,62±0,022
14,8	698,10 ± 1,78	1254,60 ± 75,25	44,17 ± 3,32	2,69±0,057
15,7	697,72 ± 1,82	1275,43 ± 81,46	45,08 ± 3,58	2,72±0,106
17,6	688,47 ± 3,19	1282,39 ± 109,83	45,98 ± 4,22	2,79±0,098
18,3	673,78 ± 2,55	1279,83 ± 91,06	47,11 ± 3,64	2,83±0,040
19,7	669,64 ± 2,46	1284,45 ± 80,62	47,67 ± 3,33	2,85±0,054

Nota-se, na Tabela 4, que há um decréscimo da massa específica aparente de 4,79% e um aumento de 3,98% e 13,12% para a massa específica unitária e porosidade, respectivamente. O aumento do teor de água aumenta a massa e o volume dos grãos de quinoa, alterando positivamente a massa específica unitária. A massa específica aparente diminui, pois a massa de grãos ocupada no mesmo volume é reduzida com o aumento do teor de água, e, conseqüentemente, ocorre o aumento da porosidade, devido a maior presença de espaços vazios na massa de grãos. Estas tendências foram verificadas, também, para quinoa real (VILCHE et al., 2003), milho-pipoca (AFONSO JÚNIOR e CORRÊA, 2000), sementes de girassol (GUPTA e DAS, 1997), grãos de lentilha vermelha (ISIK, 2007) e grãos de café (COUTO et al., 1999). Já para mamona (GONELI et al., 2008), soja (RIBEIRO et al., 2005), feijão (RESENDE et al., 2008), trigo (CORRÊA et al., 2006), milho pipoca (RUFFATO, et al., 1999) observa-se o aumento da massa específica aparente em função do aumento do teor de água.

Verifica-se, ainda, na Tabela 2, que a massa de mil grãos aumentou de 2,60 para 2,85 x 10<sup>-3</sup> Kg com o aumento do teor de água. Esse aumento de 9,6% demonstra a importância de colher os grãos de quinoa com teores de água mais baixos, a fim de diminuir a perda de massa, durante as etapas de secagem e armazenagem dos grãos. Salienta-se que o valor da massa de mil grãos de quinoa cultivar BRS Piabiru, para o teor de água de 12,8% b.s., encontra-se na faixa recomendada por Spehar e Santos (2006), na qual uma das características desejáveis para a adaptação de cultivares de quinoa no Brasil é a massa de mil grãos entre 2,0 e 3,5 x 10<sup>-3</sup> Kg.

Os modelos ajustados aos dados observados de massa específica aparente, massa específica unitária, porosidade e massa de mil grãos, em função do teor de água são apresentados no Tabela 5. Os modelos mostraram-se adequados para estimar essas propriedades dos grãos de quinoa, apresentando elevado coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e baixo erro médio relativo (P).

TABELA 5 – Equações ajustadas aos valores de massa específica aparente, massa específica unitária, porosidade e massa de mil grãos em função dos teores de água.

Variável Analisada	Modelo	$R^2$ (%)	P (%)
Massa específica Aparente	$\rho_{ap} = -5,07Ta + 771,82$	89	0,53
Massa específica Unitária	$\rho_u = 7,62Ta + 1140,80$	95	0,26
Porosidade	$\varepsilon = 0,79Ta + 32,43$	98	0,36
Massa de mil grãos	$M_{1000} = 0,038Ta + 2,12$	97	0,16

## 2.4. CONCLUSÕES

De acordo com os resultados obtidos e nas condições em que foi desenvolvido este trabalho, pode-se concluir que:

- Os eixos ortogonais dos grãos de quinoa, cultivar BRS Piabiru, aumentam proporcionalmente com o aumento do teor de água, fazendo com que a circularidade e a esfericidade sejam invariáveis.
- A massa específica unitária, a porosidade e a massa de mil grãos aumentam de  $1235,21 \text{ Kg m}^{-3}$ ; 42,14%;  $2,60 \times 10^{-3} \text{ Kg}$  para  $1284,45 \text{ Kg m}^{-3}$ ; 47,67%;  $2,85 \times 10^{-3} \text{ Kg}$ , respectivamente, com o aumento do teor de água.
- A massa específica aparente diminui de  $703,34 \text{ Kg m}^{-3}$  para  $669,64 \text{ Kg m}^{-3}$  com o aumento do teor de água.
- A massa específica aparente, massa específica unitária, porosidade e massa de mil grãos podem ser estimadas pelo modelo linear.

## 2.5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABALONE, R.; CASSINERA, A.; GASTÒN, A.; LARA, M. A. Some Physical Properties of Amaranth Seeds. **Biosystems Engineering**. v. 89, n.1, p. 109-117, 2004.

AFONSO JÚNIOR, P.C.; CORRÊA, P.C. Cinética da contração volumétrica dos grãos de duas cultivares de milho-pipoca durante a secagem. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**. Campina Grande, v.2, n.1, p. 61-65, 2000.

AMIN, M. N.; HOSSAIN, M. A.; ROY, K. C . Effect of moisture content on some physical properties of lentil seeds. **Journal of Food Engineering**, v. 65, p. 83–87, 2004.

BENEDETTI, B.C. **Influência do teor de umidade sobre propriedades físicas de vários grãos**. Campinas, SP: Faculdade de Engenharia Agrícola, Unicamp, 1987, 125p. Dissertação de Mestrado.

BHATTACHARYA, S.; NARASIMHA, H.V.; BHATTACHARYA, S. The moisture dependent physical and mechanical properties of whole lentil pulse and split cotyledon. **International Journal of Food Science and Technology** , v.40, p.213-221, 2005.

BRASIL, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Regras para análise de sementes. Brasília, DF, 2009. 399p.

COUTO, S.M.; MAGALHÃES, A.C.; QUEIROZ, D.M.; BASTOS, I.T. Massa específica aparente e real e porosidade de grãos de café em função do teor de umidade. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Campina Grande, v.3, n.1, p. 61-68, 1999.

CORRÊA, P.C., RIBEIRO, D.M., RESENDE, O., BOTELHO, F.M. Determinação e modelagem das propriedades físicas e da contração volumétrica do trigo, durante a secagem. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Campina Grande, v.10, n.3, p.665-670, 2006.

DURSUN, I.; TU RUL, K.M.; DURSUN, E. Some physical properties of sugarbeet seed. **Journal of Stored Products Research** , v.43, p.149-155, 2007.

GONELI, A.L.D.; CORRÊA, P.C.; BOTELHO, F.M.; OLIVEIRA, G.H.H. de; SANTOS, E. de S. Propriedades físicas dos frutos de mamona durante a secagem. **Revista Brasileira de Armazenamento**. Viçosa, v.33, n. 2, p.148-155, 2008.

GUPTA, R.K.; DAS, S.K. Physical properties of sunflower seeds. **Journal Agricultural Engineering Research**, v.66, p.1-8, 1997.

ISIK, E. Some Physical And Mechanical Properties Of Round Red Lentil Grains. **American Society of Agricultural and Biological Engineers**, v. 23, n.4, p. 503-508, 2007.

KARABABA, E., 2006. Physical properties of popcorn kernels. **Journal Food Engineering**, v.72, p. 100–107.

MOHSEIN, N.N. **Physical properties of plant and animal materials** . New York: Gordon and Breach Publishers, 1978. 841p.

RESENDE, O.; CORRÊA, P. C.; GONELI, A. L. D.; CECON, P. R. Forma, tamanho e contração volumétrica do feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) durante a secagem. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**. Campina Grande, v.7, n.1, p. 15-24, 2005.

RESENDE, O.; CORRÊA, P.C.; GONELI, A.L.D.; RIBEIRO, D.M. Propriedades físicas do feijão durante a secagem: determinação e modelagem. **Ciência e Agrotecnologia**. Lavras, v. 32, n. 1, p. 225-230, 2008.

RIBEIRO, D.M.; CORRÊA, P.C.; RODRIGUES, D.H.; GONELI, A.L. Análise da variação das propriedades físicas dos grãos de soja durante o processo de secagem. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**. Campinas, v. 25, n. 3, p.611-617, 2005.

RUFFATO, S.; CORRÊA, P. C.; MARTINS, J. H.; MANTOVANI, B. H. M. SILVA, J. N. Influência do processo de secagem sobre a massa específica aparente, massa específica unitária e porosidade de milho-pipoca. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.3, n.1, p.45-48, 1999.

SAITOO, P. K.; SRIVASTAVA, A. P. Physical Properties of Okra seed. **Biosystems Engineering**, v. 84, n. 4, p. 441-448, 2002.

SANTALLA, E.M.; MASCHERONI, R.M. Physical properties of high oleic sunflower seeds. **Food Science and Technology International** , v.9, p.435-442, 2003.

SPEHAR, C.R.; SANTOS, R.L.B. Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd) BRS Piabiru: alternativa para diversificar os sistemas de produção de grãos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 37, n. 6 , p. 889-893, 2002.

SPEHAR, C.R. Adaptação da Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd) para incrementar a diversidade agrícola e alimentar no Brasil. **Cadernos de Ciência e Tecnologia**. Brasília. V. 23, n. 1 p. 41-62, 2006.

SPEHAR, C.R.; SANTOS, R.L.B. Origem e Importância da Quinoa. In: SPEHAR, C.R. (Ed.). **Quinoa: Alternativa para a diversificação agrícola e alimentar**. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2007. Cap. 1, p. 21-29.

VASCONCELOS, L. H. **Determinação das propriedades físicas da canola (*Brassica napus*), variedade Iciola 41, relacionadas à armazenagem**. Campinas, SP: Faculdade de Engenharia Agrícola, Unicamp, 1998, 113p. Dissertação de Mestrado.

VILCHE, C.; GELY, M.; SANTALLA, E. Physical properties of quinoa seeds. **Biosystems Engineering**. v. 86, n.1, p. 59-65, 2003.

## CAPITULO 3

### PROPRIEDADES TÉRMICAS DOS GRÃOS DE QUINOA (*Chenopodium Quinoa* Willd)

#### 3.1. INTRODUÇÃO

A diversificação da agricultura gera mecanismos que auxilia no desenvolvimento de pesquisas sobre novas culturas. A quinoa, (*Chenopodium quinoa* Willd), originária dos Andes vem sendo estudada com o objetivo de ser consolidada na alimentação humana devido suas propriedades nutricionais e funcionais (SPEHAR e SANTOS, 2002).

Característica de destaque da quinoa é a qualidade da sua proteína, comparável à caseína do leite. Por ser mais equilibrada, pode complementar a alimentação de humanos, de aves e suínos. Apresenta demanda crescente no mundo, principalmente por naturalistas, que buscam alternativas de plantas com baixo colesterol e ausência de glúten. Ao ser produzido em larga escala no Brasil, como alternativa de sucessão no sistema plantio direto, o grão será utilizado pelas indústrias de alimentos e rações (SPEHAR, 2006).

A caracterização das propriedades térmicas dos grãos de quinoa é de suma importância para o desenvolvimento de tecnologias, pois são dados de entrada para prever o comportamento dos grãos e a quantidade de energia requerida, quando submetidos a diferentes processos de pré-processamento e armazenamento (ITO, 2003).

A transferência de calor numa massa de grãos é um fenômeno físico complexo. Este fenômeno ocorre principalmente por condução e convecção. O calor é transferido de grãos para grãos por condução, nos pontos de contato entre um e outro. O calor também é transferido de uma sessão para outra da massa por meio de convecção, em decorrência do fluxo de ar intergranular motivado por diferença de temperatura entre pontos da massa de grãos, ou em relação ao meio exterior.

Segundo Rossi e Roa (1980), para determinar ou prever as mudanças de temperatura interna de um produto sujeito aos processos de secagem e armazenamento necessita-se de conhecimento de sua condutividade térmica, da difusividade térmica e do calor específico do produto.

Nos processos de secagem e armazenamento de grãos, a transferência de calor geralmente ocorre na massa de produto, composta de grãos e ar. Em um material homogêneo, o calor se difunde com a mesma velocidade em todas as direções, e as propriedades térmicas não dependem do volume ou da forma do material examinado. Entretanto, quando se trata de um material heterogêneo como uma massa de grãos (material granular e higroscópico), a forma das partículas e a compactação do produto influenciam na quantidade de calor transferido por unidade de área (ANDRADE, 2004).

A massa específica aparente de produtos granulares também influencia a transferência de calor. Por exemplo, o método pelo qual um silo é carregado vai influenciar na condutividade térmica deste produto, pois quanto maior a compactação do material, maior será sua condutividade térmica. A condutividade térmica do ar no espaço intergranular é muito menor que a condutividade térmica da maioria dos produtos agrícolas. Então, condutividade térmica aumenta com a redução da porosidade. Assim, em um teor de água constante a condutividade térmica pode ser uma função linear da massa específica (JAYAS, 1995).

Vários pesquisadores, como, Park et al. (2002), Afonso Junior et al. (2002), Borém et al. (2002), estudaram o comportamento do calor específico e da condutividade térmica, com a variação do teor de água em alguns materiais biológicos. Observaram que esse aumento provoca a elevação dos valores do calor específico e da condutividade térmica. Relatam, ainda, a existência de um comportamento linear dessas propriedades em função do teor de água.

A difusividade térmica mede a relação entre a capacidade do material em conduzir energia térmica e a sua capacidade em armazená-la. Segundo Rahman (1995), algumas das aplicações da difusividade térmica no processamento de alimentos estão ligados à estimativa dos tempos: de congelamento, de aquecimento, de resfriamento e de cozimento.

Ribeiro et al. (2007) conduziram experimentos para determinar as propriedades térmicas do trigo, variedade Aliança com teor de água entre 26 e 11% b.s. As variáveis estudadas foram: o calor específico, obtido pelo método das misturas; a condutividade térmica, obtida pelo cilindro teoricamente infinito; e a difusividade térmica, determinada indiretamente utilizando-se os valores experimentais da massa específica aparente, calor específico e condutividade térmica do trigo. Com base nos resultados obtidos, concluíram que a condutividade térmica do trigo aumentou de 0,1332 para 0,1523  $\text{W m}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ , o calor



específico apresentou valores entre 1,52 e 2,60 ( $\text{kJ kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ ), e a difusividade térmica reduziu de  $11,58 \times 10^{-8}$  para  $8,69 \times 10^{-8}$  ( $\text{m}^2\text{s}^{-1}$ ) em função do aumento do teor de água.

Andrade et al. (2004), estudaram o comportamento das propriedades térmicas do milho (*Zea mays* L.), cultivar *Vencedor*, em relação ao teor de água que variou de 8,6 à 17,1%b.u. Concluíram que o comportamento da condutividade térmica, da difusividade térmica e do calor específico, em função do teor de água, pode ser representado por relações lineares e, que a condutividade térmica e o calor específico dos grãos são diretamente proporcionais ao teor de água do produto, enquanto a difusividade térmica é inversamente proporcional ao teor de água.

O método do Cilindro, teoricamente infinito, foi utilizado por Devilla et al. (2004) para determinar a condutividade e a difusividade térmica dos grãos de milho (*Zea mays* L.). O calor específico da massa de grãos foi determinado por meio analítico. A condutividade térmica dos grãos de milho variou de 0,1540 a 0,1712  $\text{W m}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ , a difusividade térmica de  $9,24 \times 10^{-8}$  a  $1,35 \times 10^{-7}$   $\text{m}^2 \text{ s}^{-1}$  e o calor específico de 1,78 a 2,24  $\text{kJ kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ , para os teores de água na faixa de 11,3 a 18,4% b.u., respectivamente.

De acordo com o exposto objetivou-se, neste trabalho, determinar a massa específica aparente, a condutividade térmica, a difusividade térmica e o calor específico dos grãos de quinoa, cultivar BRS Piabiru, em diferentes teores de água.

### 3.2. MATERIAL E MÉTODOS

Os experimentos foram realizados no laboratório de Secagem e Armazenamento de Produtos Vegetais, da Universidade Estadual de Goiás, em Anápolis-GO.

Foram utilizados grãos de quinoa (*Chenopodium quinoa* Wild), cultivar BRS Piabiru, produzidos na Fazenda Dom Bosco, localizada em Planaltina – GO, na entressafra de 2008. Os grãos chegaram ao laboratório em outubro de 2008, e foram acondicionados em sacos plásticos e, posteriormente armazenados em um freezer regulado à temperatura de  $5 \pm 1^\circ\text{C}$ .

Os grãos foram submetidos à limpeza manual, utilizando-se uma peneira de crivos quadrados ( $5 \times 10^{-7}$  m de lado) e 0,40 m de diâmetro, para a retirada de flores e pó. Após o peneiramento, os grãos retidos na peneira foram homogeneizados e divididos em quatro amostras de 6 quilos, cada.

Foram investigadas amostras em cinco teores de água (10,1; 11,7; 13,5; 16,0; 17,6% b.s.), obtidas por meio de reumidecimento, em que, calculou-se a quantidade de água necessária para o teor de água desejado a partir da massa seca da amostra (BENEDETTI, 1987; VASCONCELOS, 1998; VILCHE, 2003). Dentro de uma bandeja de plástico colocou-se uma fina camada de produto, no qual foi aspergida com água destilada. Os grãos foram colocados em sacos plásticos e acondicionados em um freezer à temperatura de  $5 \pm 1^\circ\text{C}$ , por um período de dez dias para a homogeneização do teor de água.

O teor de água dos grãos, em todas as etapas envolvidas no trabalho, foi determinado pelo método padrão da estufa,  $105 \pm 3^\circ\text{C}$ , durante 24h, com três repetições, de acordo com as Regras para Análise de Sementes (BRASIL, 2009).

Na determinação da condutividade térmica e da difusividade térmica utilizou-se o método do Cilindro Infinito com uma fonte de calor, linear e central de acordo com Andrade et al. (2004). O equipamento consiste de um tubo de Inox com 0,1 m de diâmetro e 0,5 m de altura, isolado nas extremidades superior e inferior com isopor, Figura 3. O cilindro foi construído de maneira a se obter uma transferência de calor, unidimensional, na direção radial, ou seja, mantendo uma relação entre o comprimento e o raio maior ou igual a dez (INCROPERA e WITT, 1996).

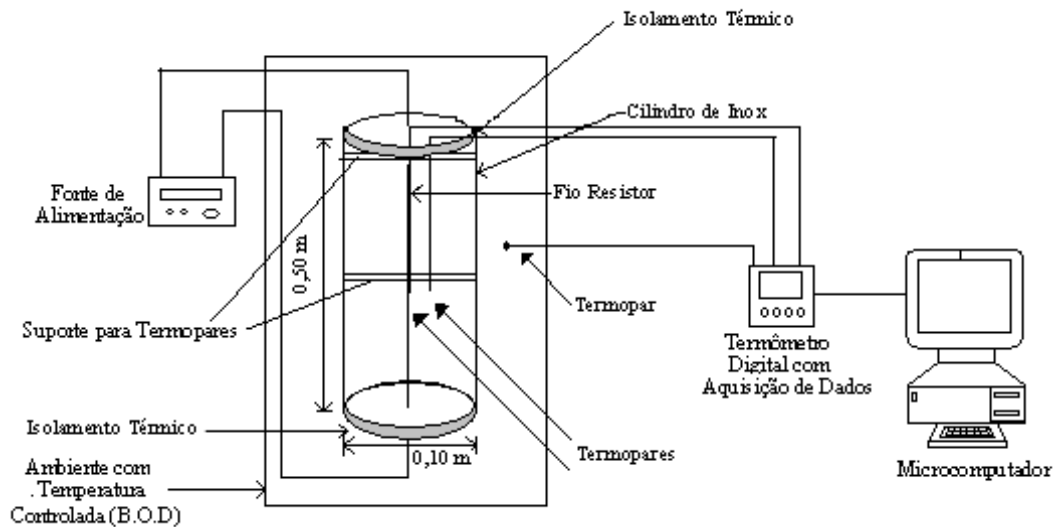


FIGURA 3 – Equipamentos utilizados para a determinação das propriedades térmicas.

No centro do cilindro instalou-se, na direção longitudinal, um fio resistor de níquel-cromo envernizado (resistência, aproximada,  $4,16 \text{ W m}^{-1}$ ), com diâmetro de  $0,0006438 \text{ m}$ . Dois termopares “tipo T” (cobre - constantan) foram instalados na altura média do cilindro, na direção radial. O primeiro termopar encontrava-se na superfície do fio resistor; o segundo, distanciado de  $0,01 \text{ m}$  do primeiro, um terceiro termopar foi instalado na parte interna da B.O.D. Os termopares foram conectados a um termômetro que registrava as temperaturas em intervalos de 1 segundo.

Nas extremidades do fio resistor conectou-se uma fonte alimentadora de tensão e corrente, submetendo-o a uma diferença de tensão de  $3,30\text{V}$ , que proporcionou uma corrente elétrica de  $1,28 \text{ A}$ .

Antes de iniciar a aquisição dos dados, o produto era retirado do freezer e colocado dentro da B.O.D. à temperatura de  $20^\circ\text{C}$ , para atingir o equilíbrio térmico com o sistema. Logo após, o produto era transferido manualmente para o cilindro, com uma altura de queda máxima de  $0,50 \text{ m}$ , onde aguardava novamente o equilíbrio térmico. Em seguida o sistema de aquisição de temperatura era acionado simultaneamente com a fonte de alimentação.

Para estimar a massa específica aparente, utilizou-se a Equação 1. Após o término da determinação das propriedades térmicas, retirava-se o produto do cilindro e pesava-se a sua massa em uma balança de precisão de  $0,01\text{g}$ , em três repetições. O volume foi determinado utilizando-se o volume útil do cilindro, em que foram subtraídos os volumes dos fios de termopares e dos suportes cilíndricos.

$$\rho_{ap} = \frac{m}{V} \quad (1)$$

em que,

$\rho_{ap}$  = massa específica aparente,  $\text{kg m}^{-3}$ ;

$m$  = massa do produto,  $\text{kg}$ ; e

$V$  = volume ocupado do recipiente,  $\text{m}^3$ .

Determinou-se a condutividade térmica dos grãos de quinoa partindo-se da Equação 2, em três repetições, a partir da variação dos valores da temperatura entre a extremidade do fio resistor e a B.O.D., nos intervalos de tempo  $t_1$  e  $t_2$ , quando submetidos ao fluxo de calor gerado pela fonte de alimentação. Para cada repetição, os dados da temperatura em função do tempo eram submetidos à regressão logarítmica, para se obter o coeficiente angular da equação.

$$K = \frac{Q}{4\pi\Delta T} \ln\left(\frac{t_2}{t_1}\right) \quad (2)$$

em que,

$k$  = é a condutividade térmica,  $\text{W.m}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ;

$\Delta T$  = variação de temperatura no ponto especificado,  $^\circ\text{C}$ ;

$Q$  = é a potência dissipada na fonte linear de calor,  $\text{W m}^{-1}$ ; e

$t_1$  e  $t_2$  = são os tempos inicial e final, s.

Isolando  $\Delta T$ , têm-se:

$$\Delta T = \frac{Q}{4\pi K} \ln\left(\frac{t_2}{t_1}\right) \quad (3)$$

$$\text{Fazendo } A = \frac{Q}{4\pi K}, \quad (4)$$

A equação ficará:

$$\Delta T = A \ln\left(\frac{t_2}{t_1}\right) \quad (5)$$

O coeficiente  $A$  foi encontrado por meio da equação de regressão logarítmica (inclinação da reta) para os valores da variação de temperatura em função do tempo experimental. Finalmente, a condutividade térmica foi estimada pela Equação 6.

$$K = \frac{Q}{4\pi A} \quad (6)$$

Determinou-se a difusividade térmica por meio da Equação 7, baseada na metodologia desenvolvida por Andrade (2001), partindo-se da equação descrita por Carslaw e Jaeger,

(1959), envolvendo considerações referente à transferência de calor por condução em regime permanente.

Os dados para prever a difusividade térmica foram coletados com o mesmo aparato experimental utilizado para obter a condutividade térmica, considerando intervalos de tempo de 2300s. Para o gradiente de temperatura, as variações entre a temperatura da fonte linear e a temperatura do termopar localizado à 0,01 m da fonte.

$$\alpha = \frac{e^{\left(\frac{4\Delta T \pi k}{Q} + y\right)}}{4t} \cdot r^2 \quad (7)$$

em que,

$\alpha$  = Difusividade térmica,  $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ ;

$y$  = constante de Euler = 0,5772;

$r$  = distância radial, m;

$Q$  = quantidade de calor gerada pela fonte, W;

$K$  = condutividade térmica,  $\text{W m}^{-1} \text{°C}^{-1}$ ;

$\Delta T$  = gradiente de temperatura no ponto de leitura,  $\text{°C}$ ; e

$t$  = intervalo de tempo em que foram feitas as leituras, s.

Após a determinação da condutividade térmica, difusividade térmica e massa específica aparente, o calor específico foi estimado por meio da Equação 8.

$$C = \frac{K}{\rho \cdot \alpha} \quad (8)$$

em que,

$C$  = Calor específico,  $\text{J Kg}^{-1} \text{°C}^{-1}$ ;

$K$  = Condutividade térmica,  $\text{W m}^{-1} \text{°C}^{-1}$ ;

$\rho$  = massa específica,  $\text{Kg m}^{-3}$ ; e

$\alpha$  = difusividade térmica,  $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ .

### 3.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A massa específica aparente e as propriedades térmicas dos grãos de quinoa, cultivar BRS Piabiru foram determinadas em cinco teores de água: 10,1; 11,7; 13,5; 16,0 e 17,6% b.s.

A equação de regressão ajustados aos dados experimentais, o coeficiente de determinação e os dados experimentais para a massa específica aparente dos grãos de quinoa, cultivar BRS Piabiru, são apresentados na Figura 4.

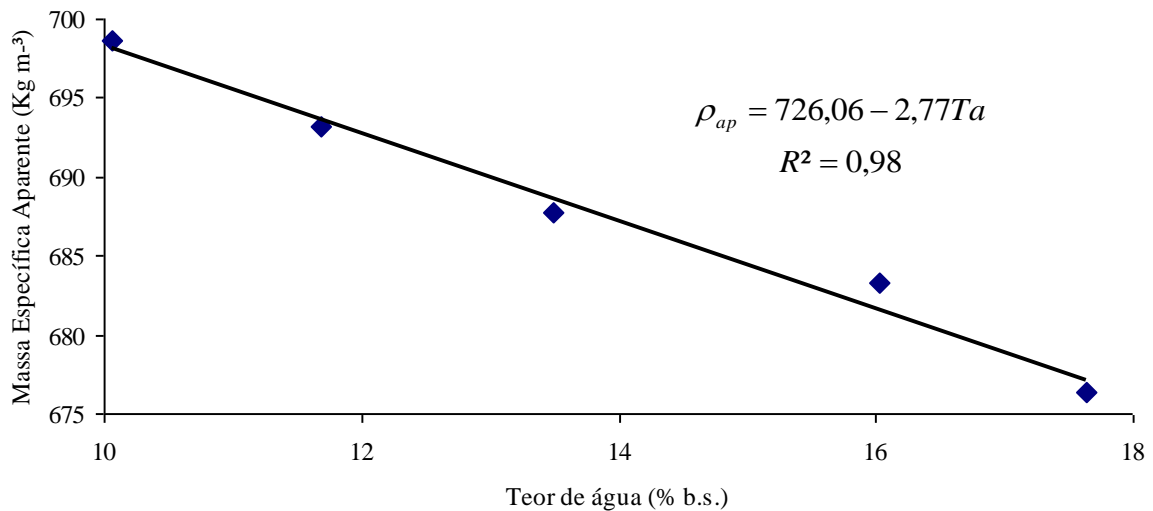


FIGURA 4 – Valores experimentais, a equação de regressão e o coeficiente de determinação da massa específica aparente dos grãos de quinoa, cultivar BRS Piabiru, em função do teor de água ( $T_a$ ).

Nota-se que os valores da massa específica aparente dos grãos de quinoa são inversamente proporcionais ao teor de água. Este comportamento está de acordo com o encontrado para grãos de milho pipoca (RUFATTO et al. 1999) e trigo (CORRÊA et al. 2006) seguindo a mesma tendência da maioria dos produtos agrícolas. Essa diminuição da massa específica aparente infere no aumento da porosidade, alterando os valores das propriedades térmicas, dentre elas a condutividade térmica.

Na Tabela 6, são apresentados os valores obtidos do coeficiente A, o intervalo de tempo utilizado para o cálculo da condutividade térmica, juntamente com os valores de cada repetição e a média da condutividade térmica com seus respectivos desvios padrão nos diferentes teores de água.

TABELA 6 – Valores do coeficiente A, intervalo de tempo para determinação do coeficiente A, condutividade térmica da massa de grãos de quinoa cultivar BRS Piabiru nos diferentes teores de água investigados e seus respectivos desvios-padrão.

Teor de água (% b.s.)	Coeficiente (A)	Tempo (s)	K (W m <sup>-1</sup> °C <sup>-1</sup> )	Média (W m <sup>-1</sup> °C <sup>-1</sup> )
10,1	3,668	300	0,1957	0,1878±0,079
	3,988	300	0,1800	
	3,822	300	0,1878	
11,7	3,626	300	0,1980	0,2188±0,023
	2,946	230	0,2436	
	3,340	250	0,2149	
13,5	3,675	290	0,1953	0,2201±0,025
	2,925	240	0,2454	
	3,269	240	0,2196	
16,0	3,174	290	0,2261	0,2146±0,012
	3,559	290	0,2017	
	3,323	290	0,2160	
17,6	3,310	300	0,2169	0,2293±0,011
	2,991	300	0,2400	
	3,106	300	0,2311	

Nota-se que o coeficiente A variou de 3,988 até 2,925. O intervalo de tempo utilizado na determinação da condutividade térmica variou de 230 à 300 segundos, encontrando-se na mesma faixa utilizada por Andrade et al. (2004), de 200 à 300 segundos, para grãos de milho.

Verifica-se, também, na Tabela 1, que a condutividade térmica variou de 0,1878 à 0,2293 W m<sup>-1</sup> °C<sup>-1</sup>, com o desvio padrão máximo de 0,079 W m<sup>-1</sup> °C<sup>-1</sup> para o teor de água de 10,1% b.s.

Os valores experimentais, a equação de regressão e o coeficiente de determinação da condutividade térmica dos grãos de quinoa em função do teor de água são mostrados na Figura 5.

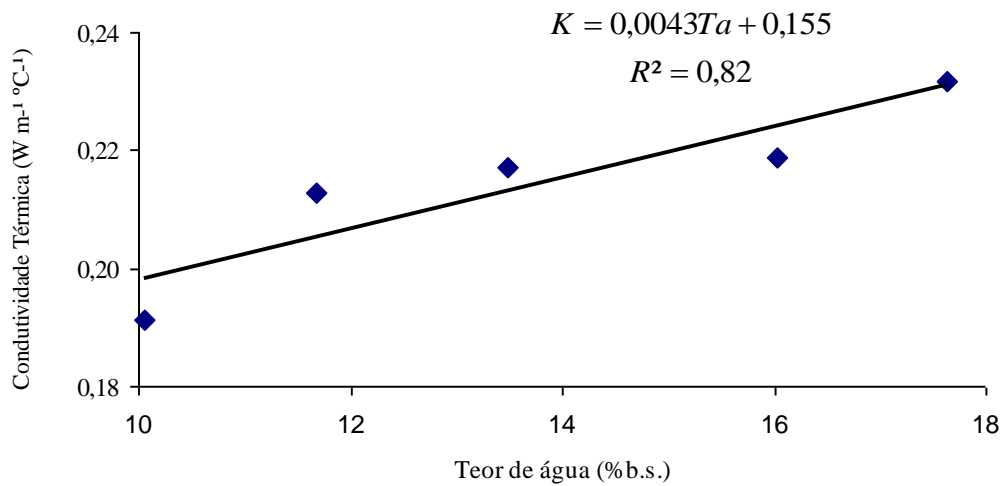


FIGURA 5 – Valores experimentais, estimados, equação de regressão, e coeficiente de determinação da condutividade térmica dos grãos de quinoa, em função do teor de água ( $T_a$ ).

A condutividade térmica dos grãos de quinoa, cultivar BRS Piabiru, aumentou de 0,1878 para 0,2293  $\text{W m}^{-1} \text{°C}^{-1}$ , com o aumento do teor de água de 10,1 para 17,6% b.s. Os valores foram ajustados ao modelo linear, com o coeficiente de determinação ( $R^2$ ), superior a 80%. O aumento da condutividade térmica em função do teor de água é, também, verificado para café, das variedades Acaiá, Rubi, Catuaí, Catucaí Amarelo e Catucaí Vermelho, com teor de água na faixa de 10 à 95% b.s., investigados por Borém et al. (2002); grãos de trigo, com teores de água entre 10 e 25% b.s., avaliados por Ribeiro et al. (2007) e feijão estudadas por Legrand et al. (2007).

Os valores da condutividade térmica de grãos de milho, alpiste, painço (CORRÊA et al. 2004), milho (DEVILLA et al. 2004) e grãos de quinoa, cultivar BRS Piabiru, para teores de água entre 10 e 18% b.s., são mostrados na Figura 6.



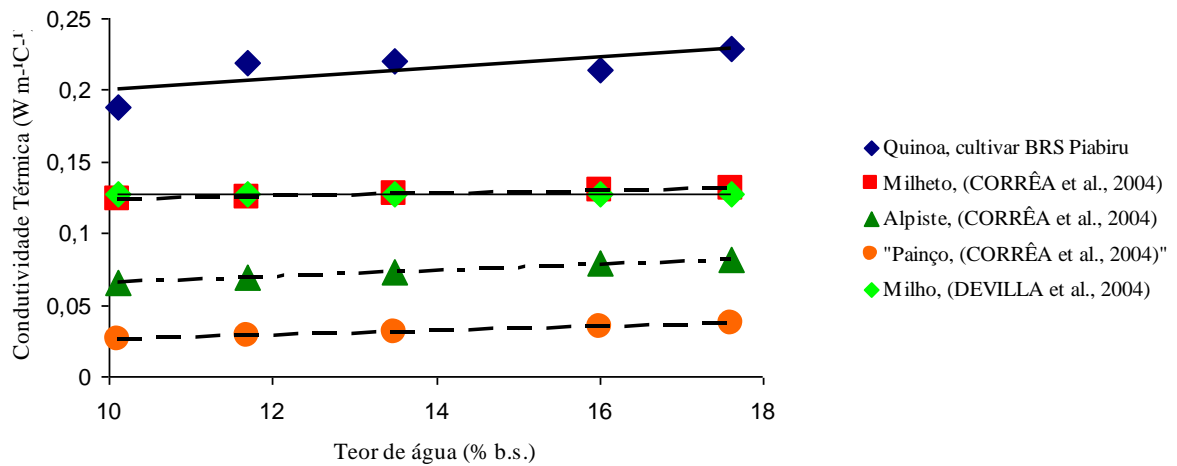


FIGURA 6 – Valores da condutividade térmica de grãos de quinoa, cultivar BRS Piabiru, milho, alpiste, painço e milho, em função do teor de água (Ta).

Nota-se, na Figura 6, um comportamento crescente e linear da condutividade térmica, em função do teor de água, para todos os produtos agrícolas analisados. Porém a condutividade térmica dos grãos de quinoa, cultivar BRS Piabiru, são superiores aos encontrados para milho, alpiste painço e milho. Este resultado pode ser explicado pelo pequeno tamanho dos grãos de quinoa, que proporcionam baixa porosidade, cerca de 22 a 43%, para teores de água entre 9 e 25% b.s., de acordo com Vilche et al. (2003), o que diminui a quantidade de ar na massa de grãos proporcionando o aumento da condutividade térmica.

Na Figura 7 são mostrados os valores experimentais da difusividade térmica dos grãos de quinoa, cultivar BRS Piabiru, para os cinco teores de água, em função do tempo. Nota-se que as curvas são inicialmente exponenciais e que para intervalos de tempo acima de 1500 segundos, os valores da difusividade térmica, tendem à linearidade, corroborando com o comportamento da difusividade térmica de grãos de milho, cultivar Vencedor, investigada por Andrade et al. (2004).

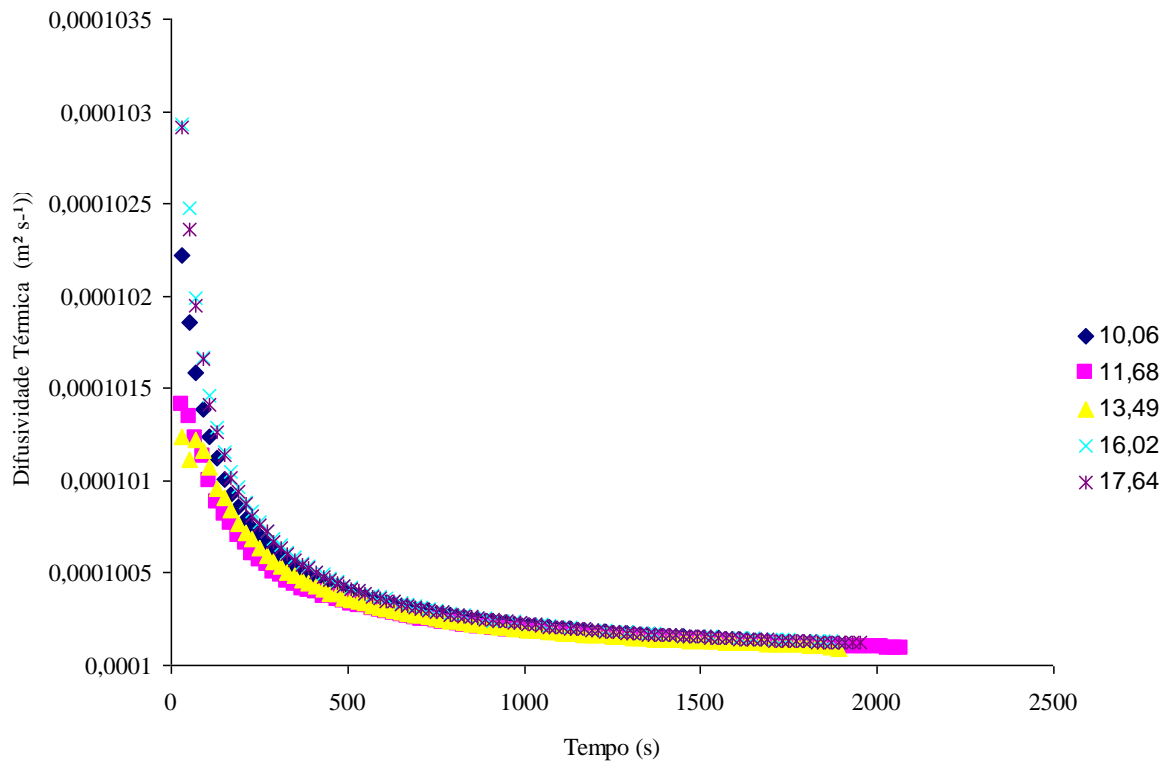


FIGURA 7 – Valores experimentais para a Difusividade térmica dos grãos de quinoa, para os cinco teores de água, em função do tempo.

Os valores da difusividade térmica dos grãos de quinoa em função do teor de água, para intervalos de tempo acima de 1500 segundos são mostrados na Figura 8.

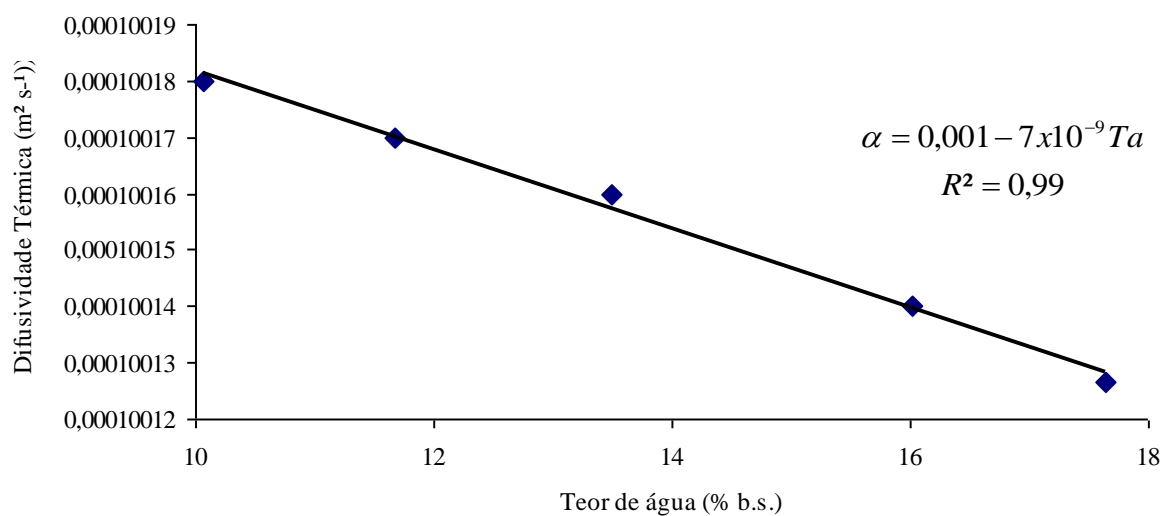


FIGURA 8 – Valores experimentais, estimados, a equação de regressão e o coeficiente de determinação da difusividade térmica dos grãos de quinoa, cultivar BRS Piabiru, em função do teor de água ( $T_a$ ).

Nota-se, na Figura 8, que com aumento do teor de água a difusividade térmica dos grãos de quinoa, cultivar BRS Piabiru, diminui. Essa tendência é similar à encontrada por diversos pesquisadores para outros produtos agrícolas (SHARMA e THOMPSON, 1973; PASSOS, 1982; ROSSI et al., 1982; CHANG, 1986).

Os valores experimentais e a equação de regressão para o calor específico dos grãos de quinoa são mostrados na Figura 9.

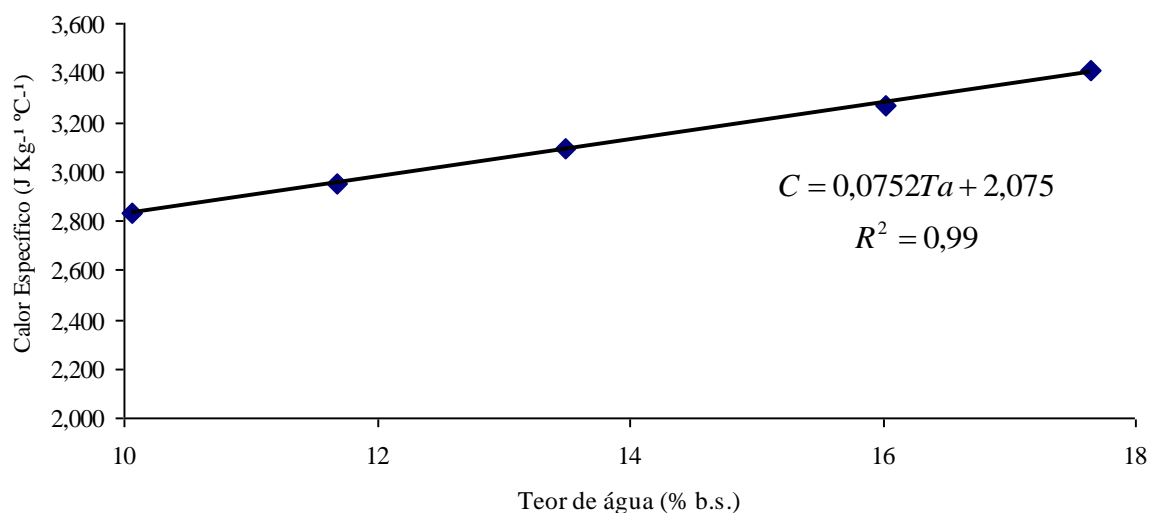


FIGURA 9 – Valores experimentais, estimados e a equação de regressão para o calor específico dos grãos de quinoa nos diferentes teores de água(Ta).

Os valores do calor específico dos grãos de quinoa, cultivar BRS Piabiru, apresentaram diferenças significativas a 5% de probabilidade pelo Teste F, e ajustaram-se ao modelo linear. Verifica-se a variação dos valores do calor específico entre 2,8 e 3,4 J Kg<sup>-1</sup> °C<sup>-1</sup>, para os teores de água entre 10,1 e 17,6% b. s., respectivamente. Esses valores são superiores aos encontrados para milho, 1,78 a 2,24 J Kg<sup>-1</sup> °C<sup>-1</sup>, para teores de água na faixa de 11,3 a 18,4 % b.u. (DEVILLA et al., 2004), porém, ocorrendo o mesmo comportamento linear em função do teor de água.

### 3.4. CONCLUSÕES

De acordo com os resultados obtidos e nas condições em que foi desenvolvido este trabalho, pode-se concluir que:

- Para os grãos de quinoa, cultivar BRS Piabiru, a massa específica aparente diminui com o aumento do teor de água, variando de 698,68 à 676,75 Kg m<sup>-3</sup>, para teores de água de 10,1 a 17,6%b.s., respectivamente;
- Os valores da condutividade térmica dos grãos de quinoa aumentam de 0,1878 para 0,2293 W m<sup>-1</sup> °C<sup>-1</sup> com o aumento do teor de água;
- A difusividade térmica dos grãos de quinoa diminui com o aumento do teor de água;

### 3.5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AFONSO JUNIOR, P. C.; CÔRREA, P. C.; PINTO, F. A. C.; NARDELLI, P. M. Propriedades termofísicas dos frutos e sementes de café: determinação e modelagem. **Revista Brasileira de Armazenamento**, Especial Café. Viçosa – MG, n.4 p.09-15, 2002.

ANDRADE, E. T. **Simulação da variação de temperatura em milho armazenado em silo metálico**. Viçosa, MG: Faculdade de Engenharia Agrícola, UFV, 2001, 148p. Tese de Doutorado.

ANDRADE, E. T. ; COUTO, S. M. ; QUEIROZ, D. M. ; PEIXOTO, A. B. Determinação de propriedades térmicas de grãos de milho. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 28, n. 3, p. 490-500, 2004.

BENEDETTI, B.C. **Influência do teor de umidade sobre propriedades físicas de vários grãos**. Campinas, SP: Faculdade de Engenharia Agrícola, Unicamp, 1987, 125p. Dissertação de Mestrado.

BORÉM, F. M.; RIBEIRO, R. C. M. S.; CÔRREA, P. C.; PEREIRA, R. G. F. A. Propriedades térmicas de cinco variedades de café cereja descascado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Campina Grande – PB, v. 6, n. 3, p.475-480, 2002.

BRASIL, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Regras para análise de sementes. Brasília, DF, 2009. 399p.

CARSLAW, H. S.; JAEGER, N. C. **The conduction of heat in solids**. 2. ed. London: Oxford University, 1959. 510 p.

CHANG, C.S. Thermal conductivity of wheat, corn, and grain sorghum as affected by bulk density and moisture content. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v.29, n.5, p.1447-1450, 1986.

CORRÊA, P. C., RIBEIRO, D.M., RESENDE, O., BOTELHO, F.M. Determinação e modelagem das propriedades físicas e da contração volumétrica do trigo, durante a secagem. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Campina Grande, v.10, n.3, p.665-670, 2006.

CORRÊA, P. C.; ANDRADE, E. T.; AFONSO JÚNIOR, P. C. Propriedades térmicas da massa granular de milheto, alpiste e painço: determinação e modelagem. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**. Campina Grande, v. 6, n. 1, p. 39-45, 2004.

DEVILLA, I. A. ; COUTO, S. M. ; PEIXOTO, A. B. . Propriedades térmicas de grãos de milho. **Ciência & Engenharia**, Uberlândia - MG, v. 13, n. 1, p. 39-44, 2004.

INCROPERA, F. P.; WITT, D. P. **Fundamentals of heat and mass transfer**. New York: John Wiley & Sons, 1996. 886 p.

ITO, A.P. **Determinação de condutividade e difusividade térmica de grãos de soja.** Campinas, SP: Faculdade de Engenharia Agrícola, Unicamp, 2003, 115p. Dissertação de Mestrado.

JAYAS, D.S.; WHITE, N. D.G.; MUIR, W.E. **Stored-Grain Ecosystems.** Marcel Dekker, Inc. New York. 1995, 756p.

LEGRAND, A.; LEULIET, J. C.; DUQUESNE, S.; KESTELOOT, R.; WINTERTON, P.; FILLAUDEAU, L. Physical, mechanical, thermal and electrical properties of cooked red bean (*Phaseolus vulgaris* L.) for continuous ohmic heating process. **Journal of Food Engineering**, v. 81, p. 447-458, 2007.

PARK, K. J.; ITO, A. P.; LEITE, J. T. C. Influência da granulometria, do diâmetro e do comprimento de amostras de grãos triturados de soja na determinação de coeficientes simultâneos de transferência. **Ciência e tecnologia de alimentos**, Campinas, v. 22, n. 2, p. 136-142, 2002.

PASSOS, E.F. Condutividade térmica da pasta de mandioca. **Revista Ceres**, Viçosa, v.29, n.162, p.222-231, 1982.

RAHMAN, S. **Food properties Handbook.** New York: CRC press, 1995, 500p.

RIBEIRO, D. M.; CORREA, P. C.; RESENDE, O. Propriedades térmicas de grãos de trigo: determinação e modelagem. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 31, n. 2 p. 462-467, 2007.

ROSSI, S. J.; ROA, G. **Secagem e armazenamento de produtos agropecuários com o uso de energia solar e ar natural.** Publicação ACIESP n. 22 São Paulo, SP. Academia de Ciência do Estado de São Paulo, 1980. 295p.

ROSSI, S.J.; FIOREZE, R.; OLIVEIRA, A.M.C.; MALZAC, H.F. Propriedades térmicas de castanha de caju e raspa de mandioca. **Revista Brasileira de Armazenamento**, Viçosa, v.7, n.1, p.51-56, 1982.

RUFFATO, S.; CORRÊA, P. C.; MARTINS, J. H.; MANTOVANI, B. H. M. SILVA, J. N. Influência do processo de secagem sobre a massa específica aparente, massa específica unitária e porosidade de milho-pipoca. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.3, n.1, p.45-48, 1999.

SHARMA, D.K.; THOMPSON, T.L. Specific heat and thermal conductivity of sorghum. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v.16, n.1, p.114-117, 1973.

SPEHAR, C.R.; SANTOS, R.L.B. Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd) BRS Piabiru: alternativa para diversificar os sistemas de produção de grãos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 37, n. 6 , p. 889-893, 2002.

SPEHAR, C.R. Adaptação da Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd) para incrementar a diversidade agrícola e alimentar no Brasil. **Cadernos de Ciência e Tecnologia**. Brasília, v. 23, n. 1 p. 41-62, 2006.

VASCONCELOS, L. H. **Determinação das propriedades físicas da canola (*Brassica napus*), variedade Iciola 41, relacionadas à armazenagem.** Campinas, SP: Faculdade de Engenharia Agrícola, Unicamp, 1998, 113p. Dissertação de Mestrado.

VILCHE, C.; GELY, M.; SANTALLA, E. Physical properties of quinoa seeds. **Biosystems Engineering**. v. 86, n.1, p. 59-65, 2003.

## CAPÍTULO 4

### PROPRIEDADES AERODINÂMICAS DOS GRÃOS DE QUINOA (*Chenopodium quinoa* Willd).

#### 4.1. INTRODUÇÃO

A quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd), da família *Chenopodiaceae*, é originária dos Andes, onde tem sido cultivada há milênios. No Brasil, a quinoa é de introdução recente, década de 90, como parte de um esforço para diversificar o sistema de produção no Cerrado. As primeiras tentativas de adaptá-la ao cultivo se deram por seleção em populações híbridas, provenientes de Cambridge, Inglaterra (SPEHAR e SOUZA, 1993).

Desde a implantação da cultura até as etapas de pré-processamento e beneficiamento da quinoa é necessário que os equipamentos sejam projetados de acordo com suas características físicas, porém a falta desses equipamentos específicos leva ao uso inadequado de maquinários que são destinados a outras culturas, podendo ocorrer perdas qualitativas e quantitativas desde a colheita até o armazenamento (COUTO et al., 2003).

Por mais evoluída que esteja a ciência no momento, não é possível produzir sementes com uma precisão de forma e tamanho. No entanto, é possível otimizar a Engenharia para empregá-la na produção agrícola. Essa otimização se dá por meio das novas informações das propriedades físicas e aerodinâmicas que surgem da evolução das ciências agrárias, possibilitando a formulação e a evolução de novos projetos de máquinas e equipamentos, evitando, dessa maneira, desperdício do produto desejado.

O conhecimento das propriedades aerodinâmicas dos produtos agrícolas, e entre elas da velocidade terminal é de fundamental importância no projeto e dimensionamento de equipamentos utilizados, nas operações de colheita e pós-colheita. Grande parte desses equipamentos utiliza ar ou água para transportar ou separar o produto desejável das impurezas, principalmente nas operações de colheita, seleção, limpeza, secagem, armazenamento, beneficiamento e classificação do produto (SILVA et al., 2003). A velocidade terminal é essencial para o desenvolvimento de máquinas em que se utiliza um fluxo de ar para separar os grãos das impurezas, tais como, palha, sementes silvestres e folhas (MOHSENIN, 1986).



Magalhães (2003), avaliando uma máquina pneumática recolhadora de café, afirma que o tamanho e a massa dos frutos são os parâmetros mais importantes no recolhimento do produto, sendo o fluxo de ar intimamente influenciado pela massa. Para o desenvolvimento adequado da máquina recolhadora, é importante conhecer as características aerodinâmicas, como velocidade terminal e coeficiente de arrasto.

Para a avaliação das operações que envolvem o uso de fluxos de ar, torna-se necessária a determinação da velocidade terminal do produto. Um objeto em queda livre, imerso em uma corrente de ar ascendente e com densidade inferior à do material, está sujeito à ação de três tipos de força: a força gravitacional, a força devido ao empuxo do fluido e a força de resistência ao arraste do material. No momento em que essas grandezas vetoriais se equilibram, o objeto passa a deslocar-se com velocidade constante, denominada velocidade terminal (MOHSEIN, 1986). A força resistente é dada por:

$$F_r = \frac{1}{2} \cdot C \cdot A_p \cdot \rho_a \cdot V_t^2 \quad (01)$$

Portanto,

$$m \cdot g - \rho_a \cdot g \cdot V_p = \frac{1}{2} \cdot C \cdot A_p \cdot \rho_a \cdot V_t^2 \quad (02)$$

Assim, a velocidade terminal pode ser determinada por:

$$V_t = \left[ \frac{2 \cdot m \cdot g \cdot (\rho_p - \rho_a)}{\rho_p - \rho_a \cdot C \cdot A_p} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (03)$$

Podemos então calcular teoricamente a velocidade terminal de uma partícula desde que se conheçam os parâmetros envolvidos. Tanto o coeficiente aerodinâmico de arraste (C), quanto a velocidade terminal (Vt) são funções da forma da partícula e do número de Reynolds (Re).

Segundo Mohsenin (1986),

$$R_e = \frac{D_{eq} \cdot V_t \cdot \rho_a}{\mu} \quad (04)$$

Deste modo,

$$V_t = \frac{R_e \cdot \mu}{D_{eq} \cdot \rho_a} \quad (05)$$

Combinando as equações 03 e 05, temos que:

$$C R_e^2 = \frac{2 \cdot m \cdot g \cdot D_{eq}^2 \cdot \rho_a \cdot (\rho_p - \rho_a)}{\mu^2 \cdot A_p \cdot \rho_p} \quad (06)$$

em que:

C= Coeficiente aerodinâmico de arraste, adimensional;

m= massa da partícula, kg;

$g$ = aceleração da gravidade,  $m\ s^{-2}$ ;

$Deq$ = diâmetro equivalente da partícula,  $m$ ;

$\rho_a$ = massa específica do ar,  $Kg\ m^{-3}$ ;

$\rho_p$ = massa específica da partícula,  $Kg\ m^{-3}$ ;

$\mu$ = viscosidade do ar,  $Kg\ ms^{-1}$ ;

$Ap$  = área projetada da partícula,  $m^2$ .

Uma vez conhecido o valor de  $CR_e^2$  e com o auxílio da Figura 01, é possível a determinação de  $Re$  e  $C_e$ , por meio deles, a velocidade terminal teórica.

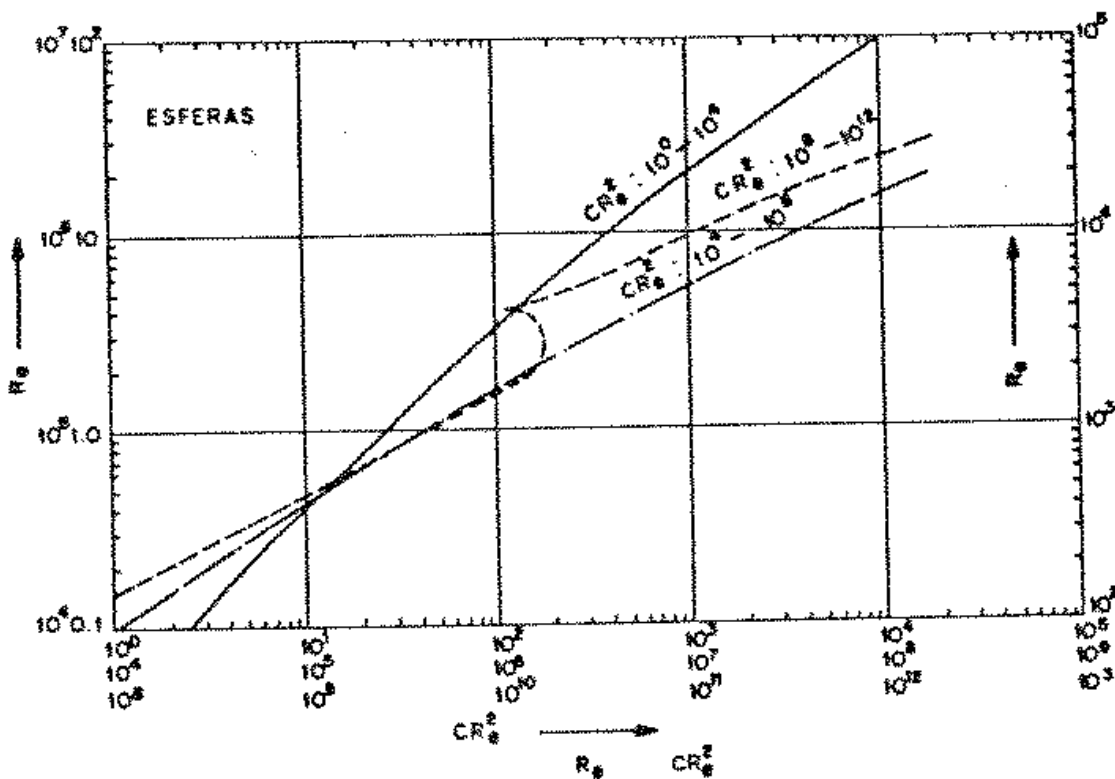


FIGURA 01 – Número de Reynolds versus  $CR_e^2$  - Fonte: Mohsenin (1986).

De acordo com De Baerdemaeker e Segerlind (1974), citados por MAGALHÃES (2003), a velocidade terminal de um produto pode ser determinada experimentalmente, colocando-se os materiais para flutuar em uma corrente ascendente de ar. A velocidade necessária para o equilíbrio do material no fluxo de ar constante é igual à velocidade terminal do produto.

Uhl e Lamp (1966) investigaram o efeito da velocidade do ar na separação das impurezas contidas em amostras de trigo, milho e soja. As faixas de velocidade do ar determinadas para a separação pneumática foram 5,79-9,14; 7,92-12,80 e 9,14-18,29  $m\ s^{-1}$

para milho, trigo e soja, respectivamente. Ao utilizarem um único fluxo de ar no processo de separação das impurezas, verificaram a ocorrência de uma separação completa para o trigo e a soja, mas para o milho ocorreram enormes perdas de grão.

Couto et al. (2003) estudaram o comportamento da velocidade terminal de frutos de café em função do estágio de maturação na colheita (verde e cereja), época de colheita, variedade, teor de água dos frutos e número de frutos contidos na amostra usada para as determinações da velocidade. Sendo que os parâmetros que influenciaram significativamente os valores da velocidade terminal foram os teores de água do produto, estágio de maturação dos frutos e tamanho das amostras usadas nas determinações.

Muitos pesquisadores comentam que a velocidade das partículas é um fator importante para determinar o tipo de fluxo e para determinar a perda de pressão que ocorre durante o transporte pneumático. Prem Chand & Ghosh, citados por Portella (1991), reconheceram a importância da velocidade da partícula e desenvolveram um método de prever esta velocidade baseado nas propriedades físicas do sistema, como, diâmetro equivalente da partícula, massa específica unitária do produto, massa específica do fluido, área projetada da partícula, viscosidade do ar e velocidade gravitacional, coeficiente de arrasto e Número de Reynolds.

Um dos primeiros trabalhos a serem desenvolvidos foi o de Sheed, citado por Portella (1991), que apresentou dados do coeficiente de arrasto em termos do número de Reynolds, para algumas partículas irregulares. Após muitos estudos sobre transporte pneumático, os mais notáveis e que podem ser provados teoricamente, estão na região laminar. No entanto, a maior parte destes trabalhos foram feitos com modelos simplificados e com partículas de formato bem definido, como esferas ou elipsóides.

Diversos pesquisadores realizaram testes aerodinâmicos com diferentes produtos agrícolas e relataram ser a velocidade terminal função do teor de umidade (Joshi *et al.*, 1993; Suthar & Das, 1996; Gupta & Das, 1997; Nimkar & Chattopadhyay, 2001; Baryeh, 2002). Tendo em vista a velocidade a ser uma propriedade aerodinâmica, importante característica para o projeto e operação de equipamentos, e a disponibilidade de poucas informações para grãos de quinoa cultivar BRS Piabiru, este trabalho foi desenvolvido objetivando determinar e analisar o comportamento da velocidade terminal experimental e teórica para grãos desta espécie, em função de diferentes teores de água.

#### 4.2. MATERIAL E MÉTODOS

Este trabalho foi realizado no Laboratório de Secagem e Armazenagem de Produtos Vegetais do curso de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Goiás, em Anápolis-GO.

Para a execução dos experimentos utilizou-se grãos de quinoa, cultivar BRS Piabiru, produzidas na Fazenda Dom Bosco, localizada em Planaltina-GO, na entressafra de 2008. Os grãos foram transportados ao laboratório no mês de Outubro de 2008. Logo após, foram armazenados em sacos plásticos e acondicionados em um freezer regulado à temperatura de  $5 \pm 1^\circ\text{C}$  pelo período de 3 meses.

O produto foi submetido à limpeza, utilizando-se uma peneira de crivos quadrados de  $1,18 \times 10^{-3}$  m de lado. Os grãos retidos na peneira foram homogeneizados manualmente e divididos em sete subamostras de aproximadamente 300 g, cada.

As subamostras foram submetidas ao reumidecimento, conforme Vasconcelos (1998), em que, inicialmente calculou-se a massa seca da amostra a ser umidificada. Sabendo-se a umidade final desejada determinou-se a quantidade de água que foi adicionada por aspersão diretamente sobre o produto, utilizando-se um pulverizador manual. As amostras foram acondicionadas em sacos plásticos e levadas à uma câmara tipo B.O.D. à  $5 \pm 1^\circ\text{C}$ , durante sete dias para que ocorresse a uniformização da umidade.

Posteriormente, determinou-se o teor de água pelo método padrão da estufa, à temperatura de  $105 \pm 3^\circ\text{C}$ , durante 24 h, em três repetições, de acordo com a Regra para Análise de Sementes (BRASIL, 2009).

Para a determinação experimental da velocidade terminal dos grãos de quinoa, utilizou-se um equipamento, Figura 10, composto por um ventilador centrífugo, conectado a um tubo de acrílico transparente, com diâmetro de 0,15m e 2 m de comprimento. A 1m da parte superior instalou-se uma tela perfurada, para colocação do produto. E a 1,75m acoplou-se um reticulador, para uniformizar a distribuição da velocidade do ar na seção transversal do tubo. O ventilador era acionado por um motor trifásico de 0,735 kW e o controle da vazão do fluxo de ar realizado por meio de um inversor de frequência.

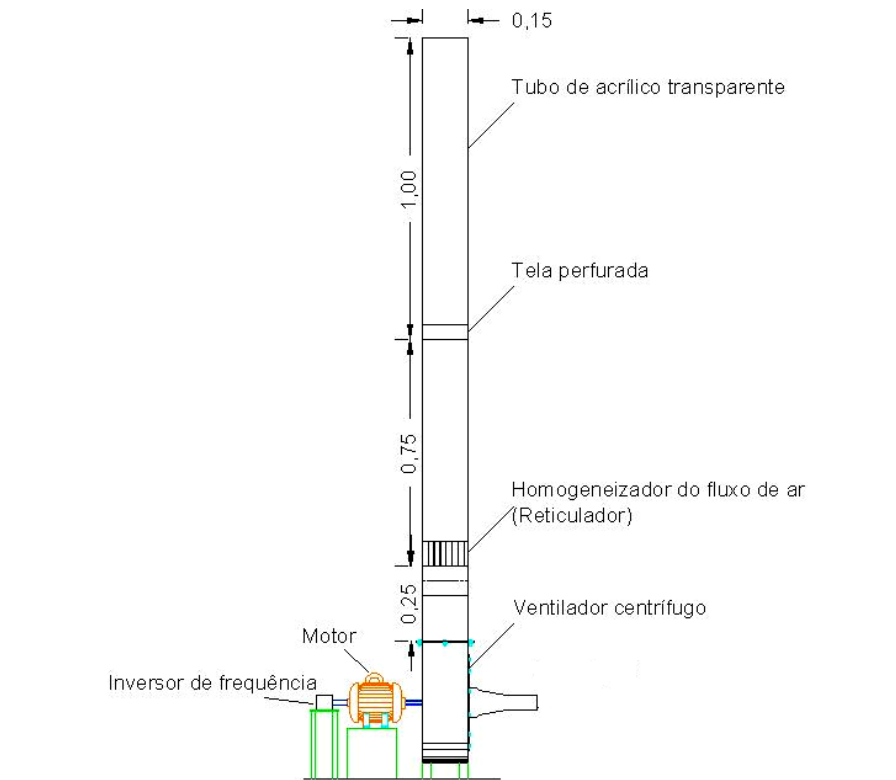


FIGURA 02 – Desenho esquemático do equipamento utilizado para a determinação da velocidade terminal experimental dos grãos de quinoa.

Na parte central da tela perfurada colocou-se 5 gramas de grãos de quinoa, logo após, regulava-se o fluxo de ar até o início do processo de flutuação do produto. Nesse momento realizava-se as leituras da velocidade do ar, por meio de um anemômetro digital, disposto na parte superior e central do cilindro de acrílico. A velocidade terminal experimental foi determinada em cinco repetições para os sete teores de água. O coeficiente aerodinâmico de arraste foi determinado por meio da Equação 3, utilizando-se a velocidade terminal experimental e as propriedades do produto e do sistema.

A velocidade terminal teórica e o coeficiente aerodinâmico de arraste foram calculados conforme, Portella (1991), em que são consideradas as características físicas do produto e do sistema. O diâmetro equivalente foi calculado conforme a seguinte expressão:

$$Deq = (a \cdot b \cdot c)^{1/3} \quad (7)$$

em que:

Deq= diâmetro equivalente da partícula, m;

a, b, c = valores dos eixos ortogonais da partícula, m.

A área projetada foi calculada para uma partícula na forma de um disco fino, devido às características físicas da quinoa, conforme Mohsenin (1986), de acordo com a seguinte expressão:

$$A_p = \frac{\pi \cdot D_{eq}}{4} \quad (8)$$

em que:

$A_p$  = área projetada, m<sup>2</sup>,

$D_{eq}$  = diâmetro equivalente, m.

Os valores de  $CR_e^2$ , foram obtidos conforme a Equação 6 em função das características do sistema.

As propriedades aerodinâmicas dos grãos de quinoa, cultivar BRS Piabiru, foram avaliadas no delineamento inteiramente casualizado, no qual os tratamentos foram sete teores de água. Foram ajustadas equações de regressão aos dados de velocidade terminal experimental, teórica e coeficiente aerodinâmico de arraste experimental e teórico, considerando-se a magnitude do coeficiente de determinação ( $R^2$ ), a magnitude do erro médio relativo (P).

$$P = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{|Y - \hat{Y}|}{Y} \right) \quad (9)$$

em que:

n = número de observações experimentais;

Y = Valor observado experimentalmente, e

$\hat{Y}$  = Valor calculado pelo modelo.

#### 4.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A velocidade terminal dos grãos de quinoa, cultivar BRS Piabiru, foi determinada em sete teores de água: 12,8; 13,8; 14,8; 15,7; 17,6; 18,3 e 19,7% b.s.

Na Tabela 1 encontram-se as médias dos valores das velocidades terminal experimental e do coeficiente aerodinâmico de arraste experimental. Nota-se um aumento da velocidade terminal experimental em função do aumento do teor de água. Já os valores do coeficiente aerodinâmico de arraste em função do teor de água não apresentaram diferenças significativas a 5% de probabilidade pelo teste F.

TABELA 1 – Médias e desvios dos valores das velocidades terminal experimental.

Teor de água (%) b.s.	Velocidade terminal experimental (m s <sup>-1</sup> )	Coeficiente Aerodinâmico de arraste experimental (C)
12,8	2,92±0,06	0,10
13,8	3,04±0,04	0,09
14,8	3,07±0,02	0,09
15,7	3,09±0,03	0,10
17,7	3,23±0,01	0,10
18,3	3,27±0,02	0,10
19,7	3,35±0,03	0,09

Na Tabela 2 encontra-se a análise de variância para os valores da velocidade terminal experimental, dos grãos de quinoa, cultivar BRS Piabiru. Nota-se que os valores experimentais da velocidade terminal dos grãos de quinoa apresentaram diferenças significativas a 5% de probabilidade pelo teste F.

TABELA 2 - Análise de variância para os valores da velocidade terminal experimental ( $V_{t_{\text{experimental}}}$ ) e Coeficiente aerodinâmico de arraste ( $C_{\text{experimental}}$ ) dos grãos de quinoa, cultivar BRS Piabiru.

Causas da Variação	Graus de Liberdade	Quadrado médio (QM)	
		$V_{t_{\text{experimental}}}$	$C_{\text{experimental}}$
Tratamentos	6	0,116*	$5,18 \cdot 10^{-6}$ Ns
Erro	28	0,0011	$1,17 \cdot 10^{-5}$
Total	34		

\* = Significativo a 5% de probabilidade pelo teste F.

Ns = Não significativo a 5% de probabilidade pelo teste F.

Na Tabela 3 encontra-se os valores da massa específica unitária, diâmetro equivalente da partícula, área projetada da partícula, coeficiente de arrasto e Número de Reynolds, parâmetros utilizados para o cálculo da velocidade terminal teórica.

Os valores de Re foram encontrados na Figura 01, em função de  $CRe^2$ . A velocidade terminal teórica foi determinada por meio da Equação 05.

TABELA 3 – Médias dos valores da massa específica unitária, diâmetro equivalente da partícula, área projetada da partícula, coeficiente aerodinâmico de arrasto teórico ( $C_t$ ), Número de Reynolds (Re) e velocidade terminal teórica para os grãos de quinoa, cultivar BRS Piabiru, em função do teor de água.

Teor de água (% b.s.)	Massa específica unitária ( $\text{kg m}^{-3}$ )	Diâmetro Equivalente (m)	Área projetada ( $\text{m}^2$ )	$C_t$	Re	Velocidade terminal teórica ( $\text{ms}^{-1}$ )
12,8	1234,19	$1,54 \cdot 10^{-3}$	$1,215 \cdot 10^{-3}$	0,156	145	1,32
13,8	1244,73	$1,54 \cdot 10^{-3}$	$1,213 \cdot 10^{-3}$	0,156	146	1,32
14,8	1252,06	$1,55 \cdot 10^{-3}$	$1,217 \cdot 10^{-3}$	0,157	147	1,33
15,7	1261,10	$1,58 \cdot 10^{-3}$	$1,241 \cdot 10^{-3}$	0,158	153	1,36
17,7	1280,41	$1,61 \cdot 10^{-3}$	$1,266 \cdot 10^{-3}$	0,158	161	1,40
18,3	1278,80	$1,61 \cdot 10^{-3}$	$1,266 \cdot 10^{-3}$	0,159	160	1,39
19,7	1284,80	$1,61 \cdot 10^{-3}$	$1,260 \cdot 10^{-3}$	0,158	165	1,44

Os valores da velocidade terminal teórico e os valores do coeficiente aerodinâmico de arraste teórico dos grãos de quinoa, cultivar BRS Piabiru, apresentaram diferenças significativas a 5% de probabilidade, conforme a análise de variância na Tabela 4.

TABELA 4 – Análise de variância para os valores da velocidade terminal teórica ( $V_{t\text{teórica}}$ ) e do coeficiente aerodinâmico de arraste ( $C_{\text{teórico}}$ ), dos grãos de quinoa, cultivar BRS Piabiru.

Causas da Variação	Graus de Liberdade	Quadrado médio (QM)	
		$V_{t\text{teórica}}$	$C_{\text{teórico}}$
Tratamentos	6	0,0107*	$5,63 \cdot 10^{-6}$ *
Erro	28	0,0095	$9,42 \cdot 10^{-6}$
Total	34		

\* = Significativo a 5% de probabilidade pelo teste F.

Os valores da velocidade terminal teóricos e experimentais dos grãos de quinoa, cultivar BRS Piabiru, em função do teor de água, são mostrados na Figura 3, juntamente com a equação de regressão e o coeficiente de determinação. São apresentados, também, a velocidade terminal dos grãos de quinoa real, sorgo e milho para diferentes teores de água.



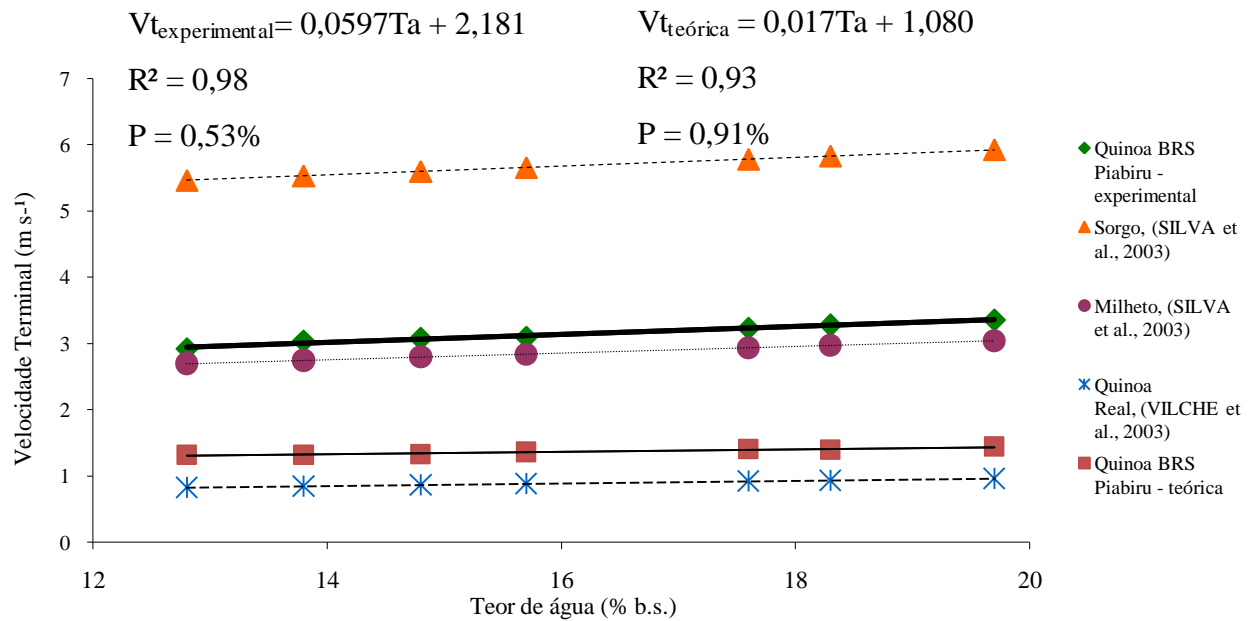


FIGURA 0310 – Valores experimentais, da velocidade terminal experimental e teórico dos grãos de quinoa, cultivar BRS Piabiru e valores da velocidade terminal dos grãos de quinoa real, sorgo e milho, em função do teor de água (Ta).

Nota-se, na Figura 03, que o modelo linear ajustou-se adequadamente aos dados da velocidade terminal experimental e teórico, com elevado coeficiente de determinação ( $R^2$ ), próximo de 1 e baixo erro médio relativo (P), abaixo de 10%, conforme Mohapatra e Rao (2005). Verifica-se, ainda, que a velocidade terminal experimental e teórica dos grãos de quinoa, cultivar BRS Piabiru, são diretamente proporcional ao aumento do teor de água do produto. Verifica-se, também, que o comportamento da velocidade terminal, em função do teor de água, para os grãos de quinoa Real, sorgo, milho e quinoa BRS Piabiru, apresentaram tendência semelhante à observada para a maioria dos grãos agrícolas, ou seja, a velocidade terminal aumenta com a elevação do teor de água dos grãos. O aumento do teor de água altera as características físicas do produto, principalmente a massa e o volume. O aumento dessas características faz com que a resistência ao deslocamento, quando o produto é imerso no fluxo de ar, seja maior, aumentando a velocidade terminal dos grãos de quinoa.

Na Figura 03, observa-se que a velocidade terminal experimental é maior que os valores da velocidade terminal teórica dos grãos de quinoa, cultivar BRS Piabiru, da quinoa Real, investigada por Vilche et al. (2003) e milho, investigada por Silva et al. (2003). Porém é menor que a velocidade terminal encontrada para sorgo, de acordo com Silva et al. (2003). Demonstrando que a forma e a massa específica dos grãos são fatores que influenciam a velocidade terminal dos grãos.

#### 4.4. CONCLUSÕES

De acordo com os resultados obtidos e nas condições em que foi desenvolvido este trabalho, pode-se concluir que:

- A velocidade terminal experimental dos grãos de quinoa, cultivar BRS Piabiru, variou de 2,92 para 3,35 m s<sup>-1</sup>, para um coeficiente aerodinâmico de arraste entre 0,09 e 0,10, no teor de água entre 12,8 para 19,7% b.s.
- A velocidade terminal teórica e o coeficiente aerodinâmico de arraste teórico dos grãos de quinoa, cultivar BRS Piabiru, variaram de 1,32 para 1,44 m s<sup>-1</sup> e de 0,156 para 0,158, respectivamente, com a elevação do teor de água de 12,8 para 19,7% b.s.
- O modelo linear ajustou-se adequadamente aos dados experimentais para prever a velocidade terminal;
- A velocidade terminal dos grãos de quinoa, cultivar BRS Piabiru, é maior que a velocidade terminal dos grãos de quinoa real e do milheto, porém é inferior a de grãos de sorgo.

#### 4.5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BARYEH, E.A. Physical properties of millet. **Journal of Food Engineering**, London, v.51, n.1, p. 39 - 46, 2002.

BRASIL, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Regras para análise de sementes. Brasília, DF, 2009. 399p.

COUTO, S. M.; MAGALHÃES, A. C.; QUEIROZ, D. M. de; BASTOS, I.T. Parâmetros relevantes na determinação da velocidade terminal de frutos de café. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.7, n.1, p.141- 148, 2003.

COUTO, S. M.; SANTOS, A. E. O. dos; VIEIRA, S. M. J.; SILVA, D. J. P. da. Determinação da força de arrasto e da velocidade terminal de frutos de café pela técnica de elementos finitos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.8, n.2/3, p.274-283,2004.

GUPTA, R. K.; DAS, S. K. Physical properties of sunflower seeds. **Journal of Agricultural Engineering Research**, London, v.66, n. 1, p. 1 - 8, 1997.

JOSHI, D. C.; DAS, S. K.; MUKHERJEE, R. K. Physical properties of pumpkin seeds. **Journal of Agricultural Engineering Research**, London, v. 54, n. 3, p. 219 - 229, 1993.

MAGALHÃES, A. C. **Desenvolvimento e avaliação de uma máquina recolhadora de café em terreno utilizando transporte pneumático**. Viçosa: MG: Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, 2003. 110p. Dissertação de Mestrado. em Engenharia Agrícola.

MOHAPATRA, D.; RAD, P.S. A thin layer drying model of parboiled wheat. **Journal of Food Engineering**. P. 513-518, 2005.

MOHSENIN, N.N. **Physical properties of plant and animal materials**. New York: Gordon and Breach Publishers, 1986. 841p.

NIMKAR, P. M.; CHATTOPADHYAY, P. K. Some physical properties of green gram. **Journal of Agricultural Engineering Research**, London, v. 80, n. 2, p.183 - 189, 2001.

PORTELLA, J. A. **Transporte unitário de grãos agrícolas por processo pneumático em dutos de pequeno diâmetro**. Campinas, SP: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 1991. 170p. Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica.

SILVA, F. S.; CORRÊA, P.C.; JÚNIOR, P. C. A.; GONELI, A. L. D. Influência do teor de umidade na velocidade terminal de grãos de sorgo e milheto. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, Sete Lagoas, v.2, n.3, p.143-147, 2003

SPEHAR, C. R.; SOUZA, P. I. M. Adaptação da quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) ao cultivo nos cerrados do Planalto Central: resultados preliminares. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 28, n. 5, p. 635-639, 1993.

SPEHAR, C.R. Adaptação da Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd) para incrementar a diversidade agrícola e alimentar no Brasil. **Cadernos de Ciência e Tecnologia**. Brasília. V. 23, n. 1 p. 41-62, 2006.

SRIVASTAVA, A.K.; GOERING, C.E. e ROHRBACH, R.P. **Engineering principles of agricultural machines**. St. Joseph: American Society of Agricultural Engineers. 1993. 601p.

SUTHAR, S. H.; DAS, S. K. Some physical properties of karingda [*Citrullus lanatus* (Thumb) Mansf] seeds. **Journal of Agricultural Engineering Research**, London, v. 65, n. 1, p.15 - 22, 1996.

TEIXEIRA, M.M. **Limpeza de grãos**. Viçosa: CENTREINAR, 1995. 31p.

UHL, J.B.; LAMP, B.J. Pneumatic separation of grain and straw mixtures. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v.9, n.2, p.244-246, 1966.

VASCONCELOS, L. H. **Determinação das propriedades físicas da canola (*Brassica napus*), variedade Iciola 41, relacionadas à armazenagem**. Campinas, SP: Faculdade de Engenharia Agrícola, Unicamp, 1998, 113p. Dissertação de Mestrado.

VILCHE, C.; GELY, M.; SANTALLA, E. Physical properties of quinoa seeds. **Biosystems Engineering**. v. 86, n.1, p. 59-65, 2003.

ZANINI, H. L. H. T.; DUARTE, M. E. M.; MATA, M. E. R. M. C.; PIMENTEL, L.W. Influência do tamanho e da forma da coluna de queda na velocidade terminal de grãos de milho e feijão. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v.10, n.1, p.53-61, 2008.