

CAPÍTULO 2

ESTRUTURA, COMPOSIÇÃO E PROPRIEDADES DOS GRÃOS

Juarez de Sousa e Silva
Paulo César Corrêa

1. INTRODUÇÃO

Uma noção sobre estrutura, composição e propriedades físicas dos grãos deve ser pré-requisito para o estudo sobre secagem e armazenamento destes. Por exemplo, para umedecer ou secar o produto, o fluxo de água, em forma de vapor, necessariamente deve passar pelas várias camadas dos diferentes tecidos celulares que formam as sementes. Isto significa que, dependendo da composição química dessas camadas, o produto pode apresentar diferentes características quanto ao equilíbrio higroscópico com o ambiente onde estiver armazenado. Assim, os grãos oleaginosos, como soja, amendoim e girassol, devem apresentar teor de umidade mais baixo do que os grãos amiláceos, como arroz, milho, trigo e sorgo, quando armazenados sob as mesmas condições atmosféricas.

O rompimento da película externa da semente provoca aumento na taxa de ganho ou perda de água. Esta película externa protege o grão contra o ataque de microrganismos e, em alguns casos, oferece resistência ao ataque de insetos.

Forma, tamanho, densidade e outras características físicas podem afetar o desempenho das máquinas de limpeza, de secagem e de beneficiamento, enquanto a proporcionalidade relativa entre os componentes químicos das sementes pode afetar as características indispensáveis à industrialização, como ocorre com o milho dentado e o milho duro, durante a separação do gérmen.

2. ESTRUTURA E FUNÇÕES DOS GRÃOS

As sementes das monocotiledôneas (milho, arroz, trigo etc.) e das dicotiledôneas (soja, feijão, café etc.) são formadas basicamente pelo tegumento e embrião (cotilédones e eixo embrionário), além de um terceiro componente, denominado endosperma, algumas vezes ausente. Do ponto de vista funcional, as sementes são compostas de uma cobertura protetora (tegumento), um tecido meristemático (eixo embrionário) e um tecido de reserva (endospermático, cotiledonar ou perispermático), cada parte exercendo funções específicas.

2.1. Cobertura Protetora

Consiste na estrutura externa que delimita a semente. Pode ser composta apenas pelo tegumento e, algumas vezes, também pelo pericarpo. O tegumento é uma cobertura constituída por camadas celulares originárias dos integumentos ovulares. O pericarpo é originário da parede do ovário e, em alguns casos, desenvolve-se intimamente ligado ao tegumento, sendo impossível identificar qualquer ponto delimitante, como no caso das sementes de várias gramíneas.

Recebe, nestas, o nome de cariopse. As sementes das espécies mais conhecidas apresentam tegumento seco.

A cobertura externa tem função protetora, reguladora e delimitante, como especificado a seguir:

- a) Manter unidas as partes internas da semente.
- b) Proteger as partes internas contra choques e abrasões.
- c) Servir como barreira à entrada de microrganismos.
- d) Regular a velocidade de reidratação, evitando ou diminuindo os possíveis danos causados pelas pressões desenvolvidas durante a embebição.
- e) Regular a velocidade das trocas gasosas.
- f) Regular a germinação, provocando dormência nas sementes, em alguns casos.

2.2. Tecido Meristemático

O eixo embrionário é a parte vital da semente, pois apresenta a capacidade de se desenvolver, graças ao tecido meristemático presente em suas duas extremidades. Devido a este fato, apresenta condições de, por meio das divisões celulares, desenvolver-se em dois sentidos, ou seja, o das raízes e o do caule, e originar uma plântula em condições de fixar-se no solo e fotossintetizar as substâncias necessárias a seu desenvolvimento. O cotilédone funciona como tecido de reserva.

Nas dicotiledôneas, o embrião maduro é constituído pelo eixo embrionário e por duas estruturas foliares, os cotilédones. A parte do eixo situada abaixo da inserção dos cotilédones (nó cotiledonar) é denominada hipocótilo, enquanto a porção terminal inferior dá origem ao primórdio da raiz ou radícula. Este primórdio é representado pelo meristema apical da raiz e é revestido pela coifa. A parte do eixo acima do nó cotiledonar é formada pelo epicótilo e pela plúmula, sendo estas, por sua vez, constituídas pela gema apical e por primórdios foliares (Figura 1A).

Nas monocotiledôneas há certa dificuldade de interpretação da morfologia do eixo embrionário. Quando observado no interior de uma cariopse madura, o embrião apresenta-se justaposto ao endosperma por meio de um cotilédone maciço, denominado escutelo (Figura 1B).

2.3. Tecido de Reserva

O tecido de reserva das sementes pode ser constituído por endosperma, cotilédones e, em alguns casos, pelo perisperma. É graças às substâncias acumuladas nestes tecidos que o eixo embrionário, por ocasião da germinação, consegue energia e material metabolizado para se desenvolver e originar uma plântula autotrófica, ou seja, aquela capaz de sintetizar suas próprias substâncias orgânicas por meio da fotossíntese.

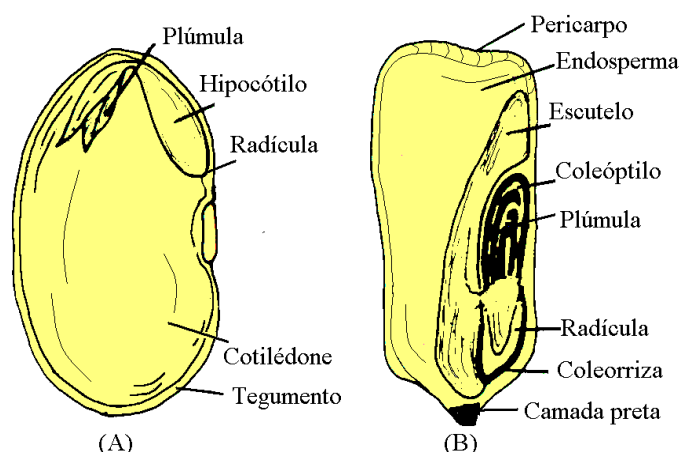


Figura 1 - Estruturas básicas das sementes de feijão (A) e milho (B).

2.3.1. Localização das Reservas

As substâncias de reserva da semente podem se localizar no endosperma, nos cotilédones ou no perisperma.

Endosperma: é encontrado em quantidade variável nas sementes e resulta da fusão dos núcleos polares com um núcleo espermático do grão de pólen, iniciando um processo contínuo de divisões celulares. Quando completamente desenvolvido, sua estrutura varia consideravelmente. Devido ao fato de ter sido utilizado parcial ou completamente para o desenvolvimento do embrião, o endosperma pode não apresentar substâncias de reserva. Em muitas plantas, porém, o endosperma se diferencia como tecido de reserva a ser consumido por ocasião da germinação. O material mais comumente armazenado é o amido, mas o endosperma pode armazenar outros carboidratos, assim como óleos e proteínas.

Nas sementes dos cereais, a camada de aleurona encontrada na periferia do endosperma é viva. Esta camada, além de outros componentes, é rica em proteínas, que se encontram sob duas formas principais: glúten e grãos de aleurona. Durante a germinação, estes servem como substância de reserva e auxiliam a degradação do amido, ativando o processo germinativo das sementes.

Cotilédones: originam-se do próprio zigoto e, juntamente com o eixo embrionário, são partes do embrião. Os cotilédones podem armazenar substâncias de reserva e/ou sintetizá-las. Algumas plantas apresentam cotilédones bem delgados, que não armazenam reservas, mas tornam-se verdes e passam a realizar a fotossíntese após emergirem do solo. Outras plantas, como a maioria das leguminosas, apresentam cotilédones volumosos e armazenam quantidade apreciável de reservas alimentares. Sendo parte do embrião, os cotilédones são tecidos vivos, ou seja, dispõem de todo o aparato enzimático necessário para promover a degradação e o transporte de suas próprias substâncias de reserva, a fim de nutrir o crescimento do eixo embrionário durante o processo de germinação.

Perisperma: resulta de parte da nucela que se conservou, isto é, que não foi totalmente absorvida pelo embrião durante o seu desenvolvimento. O perisperma é comumente encontrado como tecido de reserva em sementes de café e beterraba.

2.3.2. Composição das Sementes

As principais substâncias armazenadas pelas sementes são carboidratos, lipídeos e proteínas. O principal carboidrato de reserva nas sementes é o amido. Quando o amido é a substância de reserva predominante, a semente é denominada amilácea. As sementes são denominadas oleaginosas quando os lipídeos são as substâncias de reserva predominantes e protéicas quando estas substâncias são as proteínas. As principais proteínas de reserva são glúten e grãos de aleurona. Em pequenas quantidades, podem ainda ser encontrados minerais, vitaminas e outras substâncias. Em geral, as sementes de gramíneas possuem alto teor de carboidratos, e as das leguminosas, alto teor de proteínas. Na Tabela 1 encontram-se as composições químicas aproximadas de sementes de algumas espécies de interesse econômico.

3. PROPRIEDADES FÍSICAS DOS GRÃOS

O conhecimento das características físicas dos produtos agrícolas e dos seus princípios tem grande importância para a construção e operação de equipamentos de secagem e armazenagem, bem como para a adaptação de equipamentos já existentes, visando obter maior rendimento nas operações de processamento.

Tabela 1 - Composição aproximada das sementes de algumas espécies de interesse econômico

| Espécie | Carboidratos (%) | Lipídeos (%) | Proteínas (%) |
|----------|------------------|--------------|---------------|
| Algodão | 15 | 33 | 39 |
| Amendoim | 12 | 48 | 30 |
| Arroz | 65 | 2 | 16 |
| Feijão | 57 | 1 | 23 |
| Milho | 64 | 5 | 10 |
| Soja | 18 | 25 | 38 |
| Trigo | 70 | 2 | 11 |
| Girassol | 19 | 26 | 18 |
| Sorgo | 72 | 4 | 10 |
| Mamona | 0 | 64 | 18 |

3.1. Ângulo de Repouso

Pode ser definido como o ângulo máximo do talude formado pelos grãos em relação à horizontal (Figura 2) e é altamente influenciado pelo teor de umidade, pelo tamanho, pela forma e pela constituição externa do grão. O

conhecimento do valor do ângulo de repouso dos grãos é importante para a determinação da capacidade estática dos silos, da capacidade de correias transportadoras e do dimensionamento de moegas, dutos e rampas de descarga de grãos.

Existem vários dispositivos para a determinação do ângulo de repouso. Dentre eles, um dispositivo simples (Figura 3) consiste em um tambor provido de uma abertura no fundo, sobre o qual se eleva uma plataforma circular, de raio conhecido. Com uma abertura gradual do registro, forma-se um cone de grãos sobre a plataforma. O ângulo de repouso pode ser calculado pelo arco-tangente do quociente do dobro da altura do cone pelo raio da plataforma, conforme a equação 1.

A Tabela 2 fornece os valores de ângulo de repouso para diferentes espécies de grãos ou sementes.

3.2. Massa Específica Granular

Também conhecida como peso hectolítrico (PH) ou densidade granular pode ser definida como a razão entre a massa e o volume de determinada quantidade de produto, incluindo os espaços intergranulares. Mais precisamente, o peso hectolítrico (PH) corresponde à massa de 100 litros do produto. A aplicação do conceito de massa específica granular se dá em comercialização, dimensionamento de silos, secadores, depósitos e sistemas de transportes, podendo também ser utilizado para determinar teores de umidade e danos causados por insetos e pragas nos grãos armazenados. No caso do trigo, ele é um importante índice de avaliação do rendimento em farinha.

Para determinar a massa específica granular de um determinado produto, utiliza-se um volume conhecido de grãos e pesa-se a massa deste volume. No mercado existem aparelhos mais apropriados e conhecidos para determinar a massa de um volume de grãos, os quais são conhecidos como balanças de peso hectolítrico (Figura 4), com capacidade de até 1,0 litro. A utilização de balanças com cilindros de maiores volumes e operada segundo as normas do fabricante fornece resultados mais próximos do real.

A Tabela 3 fornece os valores de massa específica granular para diferentes espécies de grãos em diferentes teores de umidade, e a Tabela 4 dá valores da massa específica granular para grãos em condições de armazenagem. A aplicação do conceito de peso hectolítrico será vista no capítulo 12 – Manuseio de Grãos.

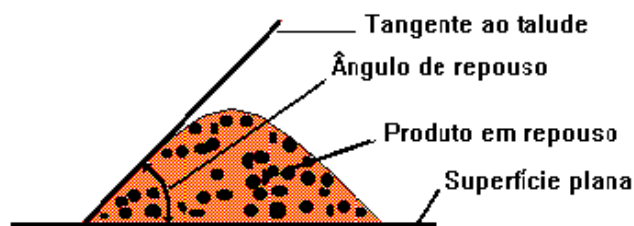
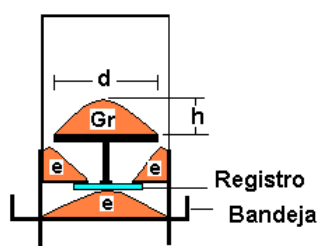


Figura 2 – Representação esquemática do ângulo de repouso.



d = diâmetro do disco
 h = altura de grãos retidos
 e = excesso de grãos

Figura 3 - Dispositivo para determinação do ângulo de repouso.

$$\hat{\text{âng. rep.}} = \text{arc tg} (2h/d) \quad \text{eq.1}$$

Tabela 2 - Ângulo de repouso ou de talude natural (em graus), de algumas espécies de grãos

| Grãos | Umidade (%b.u.) | Ângulo de repouso (°) | Produto | Umidade (%b.u.) | Ângulo de repouso (°) |
|--------|-----------------|-----------------------|---------|-----------------|-----------------------|
| Arroz | 12-16 | 36,0 | Milho | 7,5 | 34,0 |
| Soja | 12-16 | 30,0 | | 13,0 | 34,9 |
| Cevada | 7,9 | 29,0 | | 16,2 | 35,1 |
| | 10,7 | 30,5 | | 19,5 | 39,0 |
| | 13,3 | 31,0 | | 23,1 | 43,5 |
| | 16,2 | 32,2 | | | |
| | 19,5 | 33,0 | Trigo | 7,3 | 29,6 |
| | 23,1 | 33,8 | | 11,0 | 29,3 |
| | | | | 14,1 | 31,0 |
| | | | | 17,1 | 35,6 |
| | | | | 19,3 | 41,0 |

Fonte: BROOKER et al., 1974.

3.3. Porosidade

É a relação entre o volume ocupado pelo ar existente na massa granular e o volume total ocupado por esta massa. 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 e na potência dos motores.

A porosidade pode ser determinada despejando-se um volume conhecido de tolueno ou outro fluido, como óleo de soja, em um recipiente graduado contendo determinado volume de grãos. Pela diferença, obtém-se o espaço granular. A porosidade pode também ser determinada por meio de picnômetros. O esquema de um modelo mostrado na Figura 5 é simples e fornece resultados iguais aos de equipamentos mais sofisticados. O equipamento deve ser operado da seguinte forma:

- Primeiramente certificar-se de que o volume da câmara 1 seja igual ao volume da câmara 2 e que todo o sistema esteja hermético.
- Colocar uma amostra de grão na câmara 2.
- Com a válvula 1 aberta e a válvula 2 fechada, fornecer ar a uma determinada pressão.
- Fechar a válvula 1, esperar que o sistema entre em equilíbrio e fazer a leitura de P1.
- Fechar a válvula 3, abrir a válvula 2, esperar que o sistema entre em equilíbrio e fazer a leitura P2.
- Porosidade = $V_2/V_1 = (P_1 - P_2)/P_2$.



Figura 4 – Balança para determinação do peso hectolítrico (PH).

Tabela 3 - Massa específica granular, em kg.m⁻³, de algumas espécies de grãos

| Grãos | Umidade (%b.u.) | Massa Específica Granular | Grãos | Umidade (%b.u.) | Massa Específica Granular |
|---------------------------|-----------------|---------------------------|---------------------------|-----------------|---------------------------|
| Cevada ¹ | 7,9 | 585,0 | Arroz ¹ | 12,0 | 586,0 |
| | 10,8 | 593,0 | | 14,0 | 588,0 |
| | 13,3 | 593,0 | | 16,0 | 605,0 |
| | 16,6 | 577,0 | | 18,0 | 615,0 |
| | 19,5 | 569,0 | | | |
| Milho ¹ | 7,3 | 753,0 | Trigo ¹ | 7,3 | 790,0 |
| | 13,0 | 737,0 | | 11,0 | 790,0 |
| | 16,2 | 721,0 | | 14,1 | 756,0 |
| | 19,5 | 689,0 | | 17,1 | 727,0 |
| | 24,9 | 656,0 | | 19,3 | 703,0 |
| Sorgo ¹ | 6,8 | 753,0 | Milho BR 201 ² | 12,5 | 769,2 |
| | 12,0 | 753,0 | | 13,9 | 762,5 |
| | 14,3 | 753,0 | | 14,8 | 757,8 |
| | 18,6 | 737,0 | | 16,7 | 749,8 |
| | 22,1 | 721,0 | | 18,1 | 737,3 |
| Milho-Pipoca ³ | | | | 20,3 | 714,2 |
| | 10,2 | 783,1 | | 23,5 | 696,0 |
| | 11,5 | 772,0 | | 25,9 | 679,8 |
| | 11,7 | 769,0 | | 27,4 | 669,8 |
| | 14,2 | 764,9 | Am. de cacau ⁴ | 12,8 | 855,8 |
| | 17,2 | 750,6 | | 17,2 | 916,8 |
| | 23,5 | 696,0 | | 18,7 | 851,1 |
| | 25,9 | 679,8 | | 20,0 | 897,1 |
| | 27,4 | 669,8 | | 25,6 | 936,8 |
| | | | | 30,2 | 937,4 |
| Café em oco ⁵ | 12,1 | 387,5 | Girassol ⁶ | 42,6 | 942,5 |
| | 16,9 | 394,7 | | 51,3 | 999,5 |
| | 23,3 | 400,8 | | 10,8 | 400,1 |
| | 30,9 | 418,1 | | 13,2 | 392,7 |
| | 40,2 | 466,9 | | 15,9 | 350,7 |
| | 47,2 | 516,9 | | 19,7 | 339,6 |
| | 59,3 | 550,5 | | 23,8 | 336,1 |
| | 65,4 | 566,7 | | | |

(1) BROOKER et al., 1974; (2) FRANCESCHINI et al., (1995); (3) RUFFATO et al., 1999; (4) ALMEIDA, 1979; (5) AFONSO, 1994; (6) BRAGA FILHO, 1986.

Tabela 4 - Massa específica granular, em kg.m^{-3} , utilizada em cálculos de “cubagem”, segundo USA (umidade comercial).

| Espécie | Massa Específica Granular (kg.m^{-3}) |
|----------|---|
| Cevada | 618,0 |
| Milho | 721,0 |
| Aveia | 412,0 |
| Canola | 644,0 |
| Arroz | 579,0 |
| Sorgo | 721,0 |
| Soja | 772,0 |
| Girassol | 309,0 |
| Trigo | 772,0 |

Fonte: BROOKER et al., 1992

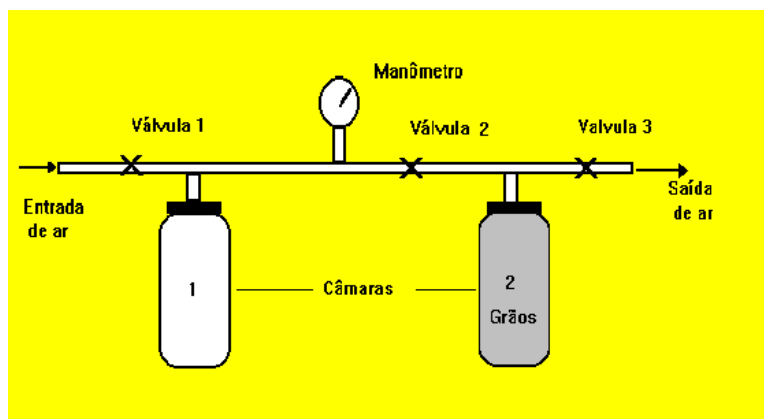


Figura 5 - Esquema de um picnômetro.

A Tabela 5 fornece os valores de porosidade para diferentes tipos de grãos ou sementes em diferentes teores de umidade.

3.4. Velocidade Terminal

A partir do momento em que um corpo em queda livre alcança a velocidade constante, a força do campo gravitacional é anulada, em termos, pelo efeito resultante da força de arraste, ou seja, sua aceleração é nula. Esta velocidade atingida é denominada velocidade terminal e é influenciada pela densidade, pelo tamanho e pela forma do produto.

A determinação do valor da velocidade terminal real consiste em submeter uma determinada quantidade de grãos a um fluxo de ar vertical e ascendente, fazendo com que os grãos possam flutuar sem se deslocar de uma determinada seção de um duto vertical (Figura 6). Ela pode ser definida como a velocidade que se pode impor ao ar para que ele não arraste os grãos durante sua

passagem em determinado processo. Esta propriedade é utilizada no dimensionamento de sistemas de separação e limpeza, transportes pneumáticos, secagem, resfriamento, seleção densimétrica, etc.

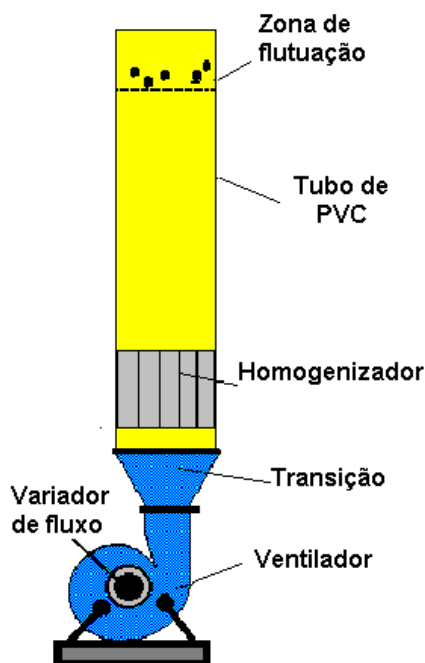


Figura 6 – Sistema para determinação da velocidade terminal.

3.5. Tamanho e Forma dos Grãos

O tamanho e a forma são características específicas de cada produto, definidas geneticamente, que podem ser influenciadas pelo ambiente durante e após o período de sua formação e que influencia as demais propriedades físicas do produto. Esses dados são utilizados para o dimensionamento do tamanho e da forma dos furos das peneiras em equipamentos destinados à separação e classificação.

O tamanho é determinado pelas medições dos eixos perpendiculares do grão, e, quanto mais irregular, maior o número de medições (Figura 7). Já a forma é determinada pela comparação com um formato-padrão predeterminado. Por exemplo, o grão é comparado visualmente com formas esférica, cilíndrica, oval, cônica, etc.

A circularidade e a esfericidade são os principais parâmetros a serem definidos, ou seja, quanto mais próximos da unidade estiverem estes valores, mais próximos de um círculo ou de uma esfera estará o grão em estudo. A circularidade é a razão entre a maior área projetada do grão em repouso natural (A_p) e a área do menor círculo circunscrito (A_c). Já a esfericidade é a razão entre o diâmetro do maior círculo inscrito (d_i) e o diâmetro do menor círculo circunscrito (d_c) (Figura 8). A Tabela 6 mostra valores de X, Y e Z para algumas espécies de grãos.

Tabela 5- Porosidade, em %, de algumas espécies de grãos

| Grão | Umidade (%b.u.) | Porosidade (%) | Grão | Umidade (%b.u.) | Porosidade (%) |
|-----------------------------------|-----------------|-------------------|------------------------------|-----------------|----------------|
| Arroz ¹ | 12,0 | 59,6 | Milho | 13,4 | 40,1 |
| | 14,0 | 59,3 | | 14,9 | 39,6 |
| | 16,0 | 57,9 | | 16,8 | 40,5 |
| Sorgo ¹ | 18,0 | 56,9 | Milho BR 201 ² | 19,4 | 42,7 |
| | 14,3 | 42,0 | | 22,7 | 48,7 |
| | 18,6 | 43,0 | | 25,4 | 50,9 |
| Milho- pipoca ³ | 22,1 | 45,5 | Canola ⁶ | 26,9 | 51,3 |
| | 10,2 | 41,8 | | 28,4 | 51,7 |
| | 11,5 | 42,1 | | 6,5 | 38,4 |
| Amêndoas de cacau ⁴ | 12,4 | 42,2 | Trigo duro ⁶ | 6,7 | 38,9 |
| | 14,4 | 42,3 | | 9,8 | 42,6 |
| | 19,4 | 43,8 | Trigo mole ⁶ | 9,8 | 39,6 |
| | 12,8 | 51,8 | Milheto ⁶ | 9,4 | 36,8 |
| | 17,2 | 53,3 | Girassol ⁵ | 10,8 | 44,5 |
| | 18,7 | 50,7 | | 15,9 | 45,5 |
| 20,0 | 49,1 | 19,7 | 56,5 | | |
| 30,2 | 45,4 | Soja ¹ | 23,8 | 49,7 | |
| 42,6 | 44,0 | | 7,0 | 36,1 | |
| | | | Aveia ¹ | 10,3 | 55,5 |

(1) BROOKER et al., 1974; (2) FRANCESCHINI et al., (1995); (3) RUFFATO et al., 1999; (4) ALMEIDA, 1979; (5) BRAGA FILHO, 1986; (6) ASAE STANDARDS, 1998.

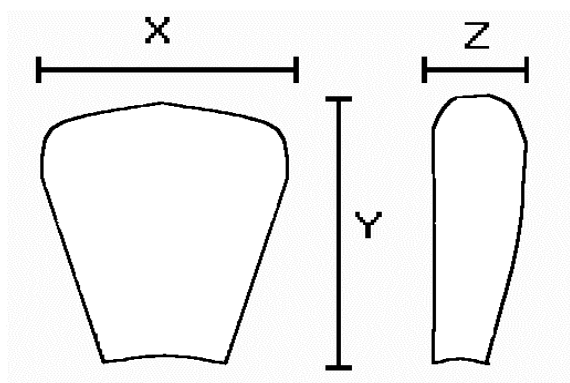


Figura 7 – Eixos perpendiculares para avaliação do tamanho.

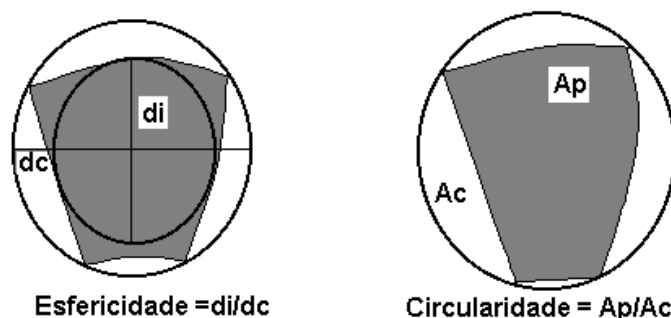


Figura 8 – Determinação aproximada da esfericidade e da circularidade.

Tabela 6 - Forma e tamanho de algumas espécies de grãos

| Grão | Umidade (%b.u.) | Esfericidade (%) | Y (mm) | X (mm) | Z (mm) |
|---------|-----------------|------------------|--------|--------|--------|
| Cevada | 7,8 | 44,5 | 10,4 | 3,5 | 2,7 |
| Linho | 6,5 | 45,1 | 5,2 | 2,6 | 1,0 |
| Aveia | 8,7 | 34,2 | 12,9 | 2,9 | 2,3 |
| Arroz | 8,9 | 46,7 | 8,5 | 3,1 | 2,3 |
| Trigo | 7,7 | 61,5 | 6,6 | 3,2 | 3,1 |
| Alfafa | 5,8 | 65,6 | 2,3 | 1,5 | 1,0 |
| | 6,3 | 63,4 | 2,4 | 1,4 | 1,0 |
| | 6,6 | 63,3 | 2,5 | 1,4 | 1,0 |
| Milheto | 9,2 | 84,7 | 4,3 | 4,1 | 2,8 |

Fonte: MOSHENIN, 1978.

3.6. Condutividade Térmica

Denomina-se condutividade térmica a taxa de calor que flui por condução normal a uma superfície e por unidade de tempo, quando é estabelecido um gradiente de temperatura entre esta superfície e outra paralela.

Esta propriedade dos materiais biológicos é variável segundo o próprio produto, o seu teor de umidade e a temperatura. A condutividade térmica dos grãos e das sementes de cereais varia direta e linearmente com o seu teor de umidade na faixa de 0 a 35 % (b.u.) e para temperaturas de 20 a 45 °C.

A determinação desta propriedade para os produtos agrícolas torna-se bastante complexa, devido, principalmente, ao transporte simultâneo de calor e massa e às alterações químicas e de estrutura que podem ocorrer nas diversas operações unitárias que compõem o processamento e durante a sua conservação pós-colheita. São utilizados, basicamente, dois métodos para se determinar a condutividade térmica: o estacionário e o transitório.

O método estacionário consiste na solução da equação de calor para um regime estacionário em placas paralelas, cilíndricas ou esferas concêntricas contendo a amostra do produto em estudo.

O método transitório ou transitório consiste em introduzir na amostra do

produto uma fonte linear de energia e medir o incremento de temperatura no ponto médio desta fonte.

3.7. Difusividade Térmica

A difusividade térmica pode ser definida como a variação de temperatura produzida num volume unitário de determinada substância pela quantidade de energia fluindo entre duas faces na unidade de tempo.

Esta propriedade, nos produtos agrícolas, aumenta com teor de umidade, pelo fato de a difusão térmica da água ser superior à destes produtos. O método para se obter a difusividade térmica consiste na determinação conjunta desta propriedade e da condutividade, utilizando-se o processo da fonte linear (método transiente).

3.8. Calor Específico

O calor específico de um corpo é definido como a razão entre a capacidade térmica e a massa deste corpo. Denomina-se capacidade térmica a razão entre o calor fornecido ao corpo e a correspondente variação de temperatura. Os principais processos para a determinação do calor específico são:

- a) Pela relação entre a condutividade térmica, a massa específica e a difusividade térmica.
- b) Processo de misturas.
- c) Calorímetro de varredura diferencial.
- d) Calorímetro de gelo.
- e) Bomba calorimétrica.

O primeiro método consiste na determinação inicial da condutividade, da massa específica e da difusividade térmica da amostra e no cálculo do calor específico pela relação:

$$c = k / \rho\alpha \quad \text{eq. 2}$$

em que

- c = calor específico;
- k = condutividade térmica;
- ρ = massa específica; e
- α = difusividade térmica.

Os demais métodos citados são baseados no equilíbrio térmico estabelecido entre a amostra cujo calor específico será determinado e uma outra substância com esta propriedade conhecida.

A Tabela 7 fornece as principais propriedades térmicas para os diferentes tipos de grãos em função do teor de umidade.

3.9. Condutividade

Quando uma corrente elétrica flui através de um condutor, há uma relação direta entre a diferença de potencial no condutor e a intensidade da corrente, ou

seja, a razão entre a voltagem e a corrente é igual a uma constante, conhecida como a resistência deste condutor. Esta relação, denominada Lei de Ohm, se resume na seguinte expressão:

$$R = V / I \quad \text{eq. 3}$$

em que

R = resistência elétrica;

V = voltagem; e

I = corrente.

Os metais, em sua maioria, são bons condutores de eletricidade, por apresentarem baixa resistência elétrica; nos produtos agrícolas esta propriedade está intimamente relacionada com o teor de umidade. Com base neste princípio, vários modelos de determinadores de umidade, principalmente para grãos e sementes, foram projetados e atualmente são bastante populares nos sistemas de comércio, na indústria e na conservação destes produtos. O teor de umidade de uma amostra submetida à passagem de uma corrente elétrica é inversamente proporcional ao logaritmo da resistência elétrica:

$$U = k(1 / \log R) \quad \text{eq. 4}$$

em que

U = teor de umidade;

K = constante para cada produto; e

R = resistência elétrica.

3.10. Propriedades Dielétricas

Os condensadores são constituídos de duas placas metálicas paralelas e separadas por um material isolante chamado de dielétrico e são capazes de armazenar cargas elétricas. Ao se conectar estas placas a uma fonte elétrica, uma das placas adquire carga positiva, e a outra, carga negativa, originando uma diferença de potencial entre elas, segundo a relação:

$$C = Q / V \quad \text{eq. 5}$$

em que

C = capacitância;

Q = carga; e

V = voltagem.

As propriedades dielétricas dos alimentos estão gradativamente chamando a atenção dos setores de pesquisa e produção, principalmente devido aos processos de aquecimento dielétrico e por microondas.

Nesse contexto, as propriedades de maior interesse são: a constante dielétrica, ϵ' e o fator dielétrico de perda, ϵ'' . A constante dielétrica, ϵ' de uma amostra é definida como a relação da capacitância do material com a capacitância

do ar ou do vácuo sob as mesmas condições do ensaio. À medida que se aumenta a constante dielétrica, aumenta a capacidade de armazenamento de energia do condensador. Assim, o processo de medida da capacitância pode ser utilizado para medir as propriedades dielétricas.

A constante dielétrica depende de vários fatores do ambiente e de características da amostra, principalmente a temperatura, o teor de umidade e a frequência aplicada.

O fator dielétrico de perda, ϵ'' , é a medida da energia que um componente dissipará quando este é submetido a um campo elétrico alternado. Em um circuito de corrente alternada com um condensador ideal, o ângulo entre a corrente e a voltagem é de 90° . Quando um material dielétrico é introduzido no condensador, este ângulo geralmente é reduzido. A redução medida em graus recebe o nome de ângulo de perda (δ).

O fator de perda dielétrico pode ser relacionado com a constante dielétrica, pela seguinte equação:

$$\epsilon'' = \epsilon' (\text{tg } \delta) \quad \text{eq. 6}$$

Tabela 7 - Propriedades térmicas de algumas espécies de grãos.

| Grão | Umidade (%b.u.) | Calor específico (kJ. kg ⁻¹ . K ⁻¹) | Condutividade térmica (W.m ⁻¹ . K ⁻¹) | Difusividade térmica (m ² . h ⁻¹) 10 ⁻⁴ |
|-------------------------|-----------------|--|--|---|
| Milho ¹ | 1,0 | 1,532 | 0,1405 | 3,67 |
| | 5,1 | 1,691 | 0,1466 | 3,54 |
| | 9,8 | 1,834 | 0,1520 | 3,55 |
| | 14,7 | 2,026 | 0,1591 | 3,26 |
| | 20,1 | 2,223 | 0,1636 | 3,12 |
| | 24,7 | 2,374 | 0,1700 | 3,20 |
| | 30,2 | 2,462 | 0,1724 | 3,33 |
| Trigo duro ¹ | 9,2 | 1,549 | 0,1402 | 4,14 |
| Trigo mole ¹ | 9,2 | 1,398 | 0,1170 | 3,34 |
| Cacau ² | 12,8 | 2,449 | 0,0918 | 5,40 |
| | 17,2 | 2,567 | 0,0928 | 5,12 |
| | 18,7 | 2,688 | 0,0970 | 4,99 |
| | 20,0 | 2,738 | 0,0981 | 4,90 |
| | 25,6 | 2,805 | 0,0991 | 4,72 |
| | 30,2 | 2,876 | 0,1044 | 4,25 |
| | 42,7 | 3,090 | 0,1259 | 4,64 |
| | 51,3 | 3,538 | 0,1659 | 5,32 |

(1) ASAE STANDARDS, 1998; (2) ALMEIDA, 1979.

A Tabela 8 fornece as propriedades elétricas de algumas espécies de grãos.

Tabela 8 - Propriedades dielétricas de algumas espécies de grãos

| Espécie | Umidade (%b.u.) | | Frequência (kHz) | | | | |
|----------------------|--------------------|--------------|------------------|------|------|------|------|
| | | | 0,25 | 1,0 | 5,0 | 10,0 | 20,0 |
| Alfafa | 6,8 | ϵ' | 5,5 | 4,3 | 4,0 | 3,8 | 3,7 |
| | | ϵ'' | 3,33 | 1,48 | 0,53 | 0,39 | 0,26 |
| Milho | 12,0 | | 12,0 | 8,5 | 6,3 | 5,6 | 5,3 |
| | | | 4,4 | 3,6 | 2,0 | 1,5 | 1,1 |
| | 14,2 | | 17,8 | 13,6 | 9,6 | 8,3 | 7,2 |
| Algodão (semente) | 7,9 | | 6,1 | 5,1 | 3,6 | 3,0 | 2,6 |
| | | | 10,5 | 8,1 | 4,8 | 3,9 | 3,4 |
| | 9,9 | | 2,2 | 3,5 | 2,8 | 2,0 | 1,5 |
| Sorgo | 12,0 | | 11,9 | 10,6 | 7,8 | 6,2 | 5,0 |
| | | | 2,6 | 2,4 | 3,2 | 3,1 | 2,6 |
| | 15,1 | | 11,2 | 8,6 | 6,2 | 5,8 | 5,4 |
| Aveia | 12,6 | | 2,5 | 3,0 | 1,8 | 1,3 | 1,0 |
| | | | 14,2 | 13,9 | 12,4 | 11,1 | 9,4 |
| | 14,0 | | 0,8 | 1,1 | 2,6 | 3,0 | 3,1 |
| Soja | 7,8 | | 15,9 | 13,5 | 9,1 | 7,1 | 5,6 |
| | | | 2,6 | 3,9 | 4,3 | 3,8 | 3,9 |
| | 9,5 | | 18,7 | 16,9 | 13,1 | 11,1 | 8,8 |
| | | | 3,0 | 3,4 | 4,5 | 4,6 | 4,3 |
| | | | 4,9 | 3,8 | 3,3 | 3,2 | 3,1 |
| | | 2,4 | 1,3 | 0,6 | 0,5 | 0,3 | |
| | | | 11,0 | 8,2 | 5,5 | 4,8 | 4,4 |
| | | | 2,8 | 3,2 | 2,2 | 1,7 | 1,3 |

FONTE: ASAE STANDARDS, 1998; ALMEIDA, 1979.

4. LITERATURA CONSULTADA

1. AFONSO, A.D.L. **Gradiente de pressão estática em camadas de frutos de café (*Coffea arabica* L.) com diferentes teores de umidade.** Viçosa, 68p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) Universidade Federal de Viçosa, 1994.
2. ALMEIDA, B.V. **Determinação das propriedades físicas de amêndoas de cacau (*Thebroma cacao* L.).** Viçosa, 70p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) Universidade Federal de Viçosa, 1979.
3. ASAE. STANDARDS 1998. **American Society of Agricultural Engineers.** St. Joseph, Michigan, 979p, 1998.

4. BRAGA FILHO, J.M. **Curvas de secagem em camada delgada e propriedades físicas de girassol (*Helianthus annus* L.)**. Viçosa, 100p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) Universidade Federal de Viçosa, 1986.
5. BROOKER, D.B.; BAKKER-ARKEMA, E.W.; HALL, C.W. **Drying cereal grains and their products**. Westport, Connecticut, The AVI Publishing Company, 265 p.1974.
6. BROOKER, D.B.; BAKKER-ARKEMA, E.W.; HALL, C.W. **Drying and storage of grains and oilseeds**. New York, The AVI Publishing Company, 450p.1992.
7. CARVALHO, N.M. & NAKAGAWA, J. **Sementes: ciência, tecnologia e produção**. 3. ed. Campinas, Fundação Cargill, 1988. 424p.
8. COPELAND, L.O. **Principles of seed science and technology**. Minneapolis, Burgess Publishing Company, 1976. 369p.
9. ESAU, K. **Anatomia das plantas com sementes**. São Paulo, Edgard Blücher, 1974. 293p.
10. FRANCESCHINI, A.S.; CORRÊA, P.C.; RAMOS, M.G. Determinação de algumas propriedades físicas de milho híbrido BR-201. **Revista Brasileira de Armazenamento**, Viçosa, v. 21, nº 1 e 2, p. 22-27, 1996.
11. LEWIS, M.J. **Physical properties of foods and food processing systems**. Ellis Harwood Ltd. Publisher, Chichester, England, 495p, 1993.
12. LUCENA, E.M.P & SILVA, J.S, **Estrutura, composição e propriedades das sementes**. In: Pré-processamento de produtos agrícolas, Juiz de fora, Instituto Maria, 1995. 509p.
13. MOHSENIN, N.N. **Physical properties of plant and animal materials**. 2.ed. New York, Gordon & Breach Sci. Pub.Inc., 1978. 742p.
14. POPINIGIS, F. **Fisiologia da semente**. 2.ed. Brasília, AGIPLAN, 1985. 289p.
15. SASSERON, J.L. **Características dos grãos armazenados**. Viçosa, CENTREINAR, 1980. 65p.
16. 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, nº. 1, 1999.