

**UNIVERSIDADE FEDERAL DA GRANDE DOURADOS
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS**

**PROPRIEDADES MECÂNICAS DE GRÃOS DE CÁRTAMO
SUBMETIDOS À SECAGEM**

CRISLAYNE CANDIDO DOS SANTOS

**DOURADOS
MATO GROSSO DO SUL
2016**

PROPRIEDADES MECÂNICAS DE GRÃOS DE CÁRTAMO SUBMETIDOS À SECAGEM

CRISLAYNE CANDIDO DOS SANTOS
Engenheiro Agrícola

Orientador: PROF. Dr. ANDRÉ LUÍS DUARTE GONELI

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Universidade Federal da Grande Dourados, como
parte das exigências para conclusão do curso de
Engenharia Agrícola.

DOURADOS
MATO GROSSO DO SUL
2016

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP).

S237p Santos, Crislayne Candido Dos
PROPRIEDADES MECÂNICAS DE GRÃOS DE CÁRTAMO
SUBMETIDOS À SECAGEM / Crislayne Candido Dos Santos -- Dourados:
UFGD, 2016.
31f. : il. ; 30 cm.

Orientador: André Luis Duarte Goneli

TCC (Graduação em Engenharia Agrícola) -Faculdade de Ciências Agrárias,
Universidade Federal da Grande Dourados.

Inclui bibliografia

1. Carthamus tinctorius L. 2. Compressão uniaxial. 3. Força de ruptura. I.
Título.

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

©Direitos reservados. Permitido a reprodução parcial desde que citada a fonte.

PROPRIEDADES MECÂNICAS DE GRÃOS DE CÂRTAMO SUBMETIDOS À
SECAGEM

Por

Crislayne Cândido dos Santos

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como parte dos requisitos exigidos para
obtenção do título de ENGENHEIRO AGRÍCOLA

Aprovado em: 07 de Outubro de 2016.


Prof. Dr. André Luis Duarte Goneli – UFGD
Orientador – UFGD/FCA


Prof. MSc. Elton Aparecido Siqueira Martins – UFGD
Membro da Banca – UFGD/FCA


Prof. Dr. Roberto Carlos Orlando – UFGD
Membro da Banca – UFGD/FCA

SANTOS, Crislayne Candido. **Propriedades Mecânicas de Grãos de Cártamo Submetidos à Secagem**, 2016. 25f. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados, MS.

RESUMO

O conhecimento das propriedades mecânicas dos produtos agrícolas é fundamental para o correto projeto, dimensionamento e utilização de equipamentos que são utilizados nas principais operações unitárias pós-colheita, como o transporte, processamento, prensagem para extração de óleo, armazenamento, dentre outros. O estudo das características mecânicas dos produtos agrícolas é imprescindível para que os equipamentos possam ser desenvolvidos com vistas a atingir a máxima eficiência sem, contudo, comprometer a qualidade final do produto. Dessa forma, o presente estudo foi desenvolvido com o objetivo de analisar as propriedades mecânicas dos grãos de cártamo para diferentes teores de água em razão do processo de secagem. Os ensaios experimentais de compressão uniaxial dos grãos de cártamo, testados individualmente, foram realizados com uma máquina de ensaio universal de teste modelo “TA Hdi Texture Analyser”, utilizando uma célula de carga de 500 N. Os grãos foram submetidos à compressão uniaxial, entre duas placas paralelas, aplicada em sua posição natural de repouso (horizontal) a uma força de aplicação de força de $0,0001 \text{ m s}^{-1}$. Para cada teor de água, foram utilizados trinta grãos de cártamo, com teores de água variando de 0,06 a 0,53 (b.s.). Baseando-se nos resultados obtidos, conclui-se que a redução do teor de água alterou as principais propriedades mecânicas dos grãos de cártamo, gerando um aumento da força necessária à ruptura, redução da deformação necessária à ruptura, aumento na dureza, aumento da energia necessária à ruptura, aumento do módulo de tenacidade e aumentos nos valores da tangente e secante máxima. Para deformações específicas durante a compressão, a redução do teor de água gerou aumento nas forças de compressão e no módulo proporcional de elasticidade.

Palavras-chave: *Carthamus tinctorius* L., compressão uniaxial, força de ruptura.

SUMÁRIO

	Página
1.INTRODUÇÃO	1
2.REVISÃO DE LITERATURA.....	3
2.1. A Cultura do Cártamo	3
2.2. Secagem.....	4
2.3. Propriedades Mécnicas	4
3.MATERIAL E MÉTODOS.....	6
4.RESULTADOS E DISCUSSÕES	13
5.CONCLUSÕES	23
6.REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	24

1. INTRODUÇÃO

O cártamo (*Carthamus tinctorius* L.) é uma cultura oleaginosa, conhecida, também, pelos nomes de “açafroa”, “açafão bastardo”, safflower, dentre outras denominações. O nome do gênero *Carthamus*, em árabe, refere-se ao pigmento avermelhado extraído de suas flores, o qual pode ser utilizado na coloração de alimentos, tecidos e outros objetos, e a espécie *Carthamus tinctorius* refere-se à tintura ou cor (ABUD et al., 2010; CORONADO, 2010).

Apesar de ainda ser uma cultura de pouca expressão no cenário agrícola brasileiro, o cártamo apresenta um grande potencial para se tornar uma cultura popular no Brasil, não só devido ao fato de seu óleo servir de matéria-prima para a produção de biodiesel, mas também por suas diversas aplicações, como para fins alimentícios, tanto animal como humano, e industrial (EKIN, 2005; EMONGOR, 2010; PADILHA et al., 2012). Em adição, essa é uma cultura com grande capacidade de desenvolvimento em diferentes regiões do Brasil, desde o Nordeste ao Centro-Oeste.

Apesar de seu elevado potencial agrícola, na literatura são escassas as informações do manejo do cártamo, principalmente as relacionadas às operações colheita e pós-colheita, com destaque para a secagem, limpeza, classificação, armazenamento e transporte.

Durante tais operações, os grãos são submetidos a uma série de pressões estáticas de várias magnitudes e dinâmicas, como impactos em altas velocidades, causando escoriações, esmagamento e trincas, aumentando sua suscetibilidade à deterioração durante o armazenamento (BARLAGE al., 1995).

As trincas e quebras ocorrem nos grãos e sementes se os esforços, aos quais são submetidos, excederem a força de resistência do material (LIU et al., 1990). A quebra dos grãos é a principal causa da acidificação do óleo, comprometendo a sua qualidade. O conhecimento das características dos produtos agrícolas sob compressão torna-se crucial para o projeto de máquinas eficientes para a debulha ou descascamento (GRUPTA e DAS, 2000).

Informações sobre as principais propriedades mecânicas de produtos agrícolas são necessárias para o correto dimensionamento e utilização de equipamentos nas principais operações unitárias pós-colheita, como o transporte, processamento,

prensagem para extração de óleo, armazenamento, dentre outros, sem comprometer a qualidade final do produto.

As principais propriedades mecânicas são a deformação específica requerida para a ruptura inicial, dureza do produto, módulo de tenacidade, módulo proporcional de elasticidade e determinação da secante e tangente máxima. Geralmente, tais propriedades são determinadas em função do teor de água, conforme verificado por diversos autores (DAVIES et al., 2011, FERNANDES et al., 2014, RIBEIRO et al., 2007).

Considerando-se a importância das propriedades mecânicas e da ausência de informações sobre esse tema para a cultura do cártamo, objetivou-se com o presente estudo determinar as principais propriedades mecânicas dos grãos de cártamo em função do teor de água durante a secagem.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Cultura do Cártamo

O cártamo (*Carthamus tinctorius* L.) é uma cultura oleaginosa, conhecida, também, pelos nomes de “açafroa”, “açafraão bastardo”, *safflower*, dentre outras denominações. É uma cultura anual, pertencente à família Asteraceae, de caule ereto, ramificado, altura variando entre 0,3 e 1,5 m, sistema radicular pivotante e bem desenvolvido, podendo atingir até 3 m de profundidade (ABUD et al., 2010; DAJUE e MÜNDEL, 1996; SEHGAL e RAINA, 2005). É uma planta que oferece alta resistência à seca, às elevadas temperaturas e aos solos salinos, com ciclo vegetativo variando de 120 até 150 dias (KIZIL et al., 2008; CORONADO, 2010; PADILHA et al., 2012).

O cártamo é uma planta que apresenta múltiplos usos para a sociedade, inclusive como planta ornamental, visando à produção de flores devido à cor e beleza das mesmas, a qual já é usada com esse propósito na Europa e até mesmo no Brasil (BELLÉ et al., 2012). A planta pode ainda ser usada para a alimentação animal, por meio da confecção do feno ou silagem.

Em termos de alimentação animal, os grãos de cártamo podem ser utilizados para alimentação de pássaros e a torta dos grãos de cártamo, proveniente do esmagamento dos mesmos para extração do óleo, também pode ser usada na alimentação de ruminantes, apresentando em torno de 25% de proteína (EKIN, 2005; EMONGOR, 2010; PADILHA et al., 2012).

O cártamo é uma cultura com grande capacidade de desenvolvimento em diferentes Regiões do Brasil. É uma opção de cultivo nas regiões semi-áridas do país, como no caso do Nordeste, devido a sua rusticidade, podendo ainda ser uma opção para pequenos agricultores, visando à extração de óleo e utilização dos resíduos provenientes do processo de extração para alimentação de seus animais.

Outra vantagem muito importante é que no cultivo e colheita do cártamo pode se fazer o uso das mesmas máquinas utilizadas para as culturas tradicionais, como a soja e o milho, necessitando apenas de algumas regulagens para as devidas operações (MARTINS, 2015).

2.2 Secagem

O processo de secagem é uma das operações unitárias mais antigas que se tem conhecimento. Além de possibilitar a colheita antecipada, a secagem tem por função reduzir o teor de água de determinado produto agrícola, para que o mesmo tenha sua atividade metabólica reduzida, podendo ser estocado por determinados períodos de tempo. Pode ser considerada como a etapa pós-colheita mais importante para a preservação da qualidade e estabilidade desses materiais biológicos.

A secagem pode ser definida como um processo simultâneo de transferência de calor e massa entre o ar de secagem e o produto, onde o ar de secagem fornece calor ao produto a ser secado e esse fornece massa ao ar de secagem na forma de vapor de água (HALL, 1980).

O princípio físico envolvido nesse processo é a remoção de umidade do grão por evaporação, onde é necessário o fornecimento de calor para evaporar a água do produto e a passagem de ar para remover o vapor de água formado na superfície do produto a ser seco. Existem vários meios de se realizar esta remoção, sendo por ar quente um dos mais utilizados. O processo de secagem pode demorar desde algumas horas até vários dias, dependendo do método, temperatura, umidade relativa, velocidade do ar de secagem e tipo de produto (MARTINS, 2015).

A secagem diminui o teor de água do material e esse processo pode determinar a qualidade dos grãos, bem como resultar em alterações em propriedades físicas e mecânicas no produto. Vários autores obtiveram resultados que comprovam a influência do teor de água em cada propriedade (GONELI, 2008).

2.3 Propriedades mecânicas

Durante a colheita, manuseio, transporte e armazenamento, os grãos são submetidos a uma série de pressões estáticas de várias magnitudes e dinâmicas, como impactos em altas velocidades, causando escoriações, esmagamento e trincas, aumentando sua suscetibilidade à deterioração durante o armazenamento (BARLAGE et al., 1995).

A quebra dos grãos é a principal causa da acidificação do óleo, comprometendo a sua qualidade. O conhecimento das características dos produtos agrícolas sob compressão torna-se crucial para o projeto de máquinas eficientes para a debulha ou descascamento (GUPTA & DAS, 2000).

Algumas características mecânicas têm sido estudadas para predição do comportamento dos grãos, em função do teor de água e da temperatura do ar de secagem, a fim de saber se os esforços aos quais os grãos são submetidos excedem a força de resistência do material quando submetidos a diferentes tensões (LIU et al., 1990).

HENRY et al. (2000a), estudando a resistência da soja à compressão em três orientações e quatro teores de água, observaram que, ao comprimir o grão, a força de ruptura perpendicular à divisão dos cotilédones foi maior comparada às outras orientações e que a resistência à compressão da soja diminuiu com o aumento do teor de água. Além disso, os autores verificaram que maiores velocidades de compressão requerem maiores forças de ruptura e que grãos colhidos na maturidade fisiológica requerem menor força à ruptura e maior deformação, comparados àqueles colhidos cinco semanas após a maturidade fisiológica.

BARLAGE et al. (1995) determinou o módulo de elasticidade e a tensão de contato máxima durante a compressão (placas paralelas) de soja e canola. Os resultados indicaram que os valores destas grandezas decrescem linearmente com um aumento do teor de água dos grãos.

Com a obtenção de curvas de força em função da deformação durante a aplicação de cargas ao produto e considerando a sua deformação total, obtém-se o módulo de elasticidade total do produto e também os parâmetros que caracterizam a resposta do material quando submetido a uma carga.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

O experimento foi conduzido no Laboratório de Pré-Processamento e Armazenamento de Produtos Agrícolas, pertencente à Faculdade de Ciências Agrárias da Universidade Federal da Grande Dourados (FCA/UFGD), Dourados - MS.

Foram utilizados grãos de cártamo (*Carthamus tinctorius* L.) cultivados na Fazenda Experimental de Ciências Agrárias da UFGD. Durante o desenvolvimento da cultura do cártamo foram realizados todos os tratos culturais necessários para o bom desenvolvimento da cultura até a sua colheita.

Os capítulos de cártamo foram colhidos manualmente, selecionando-se apenas os que já haviam atingido a maturação. A debulha foi manual, seguida de uma nova seleção, retirando-se todos aqueles grãos defeituosos, no intuito de se evitar qualquer tipo de influência indesejável que pudesse interferir nos resultados da pesquisa.

Após a debulha, os grãos de cártamo foram acondicionados em embalagem constituída de três camadas de polietileno de baixa densidade, para evitar a troca de água na forma de vapor entre o produto e o ambiente externo, e armazenados em câmara do tipo B.O.D., à temperatura de 3,5 °C, por três dias, visando, manter e homogeneizar o teor de água do produto.

Após esses procedimentos, determinou-se o teor de água dos grãos de cártamo, pelo método de estufa, a 105±1 °C, durante 24 horas (BRASIL, 2009). Os grãos de cártamo, com um teor de água inicial de 0,53 decimal base seca (b.s.) foram submetidos à secagem em estufa de ventilação forçada de ar, a 40 °C, até atingirem teor de água final de, aproximadamente, 0,06 decimal b.s.

As propriedades mecânicas dos grãos de cártamo foram determinadas nos teores de água de 0,53; 0,43; 0,33; 0,25; 0,18; 0,12 e 0,06 decimal b.s., onde 30 grãos eram selecionados aleatoriamente dentro de cada teor de água de avaliação. O acompanhamento da redução do teor de água dos grãos de cártamo foi realizado pelo método gravimétrico (perda de massa), conhecendo-se o teor de água e a massa inicial de cada amostra de grãos.

Os ensaios experimentais de compressão uniaxial dos grãos de cártamo foram realizados individualmente, utilizando-se uma máquina de ensaio universal de teste modelo “TA Hdi Texture Analyser”, utilizando célula de carga de 500 N.

Em cada teor de água, os grãos de cártamo foram submetidos à compressão uniaxial, entre duas placas paralelas, aplicada em sua posição natural de repouso (horizontal), conforme a Figura 1, a uma velocidade de aplicação de força de $0,0001 \text{ m s}^{-1}$.

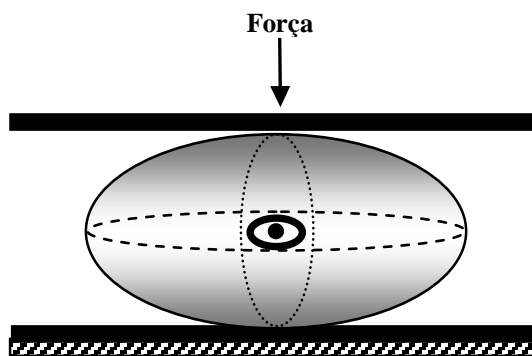


FIGURA 1. Esquema da posição inicial de repouso de grãos de cártamo durante o ensaio de compressão.

O comportamento mecânico das sementes de cártamo, submetidos à compressão uniaxial em função do teor de água, foi avaliado pela força à ruptura do produto, energia necessária à ruptura, deformação requerida para a ruptura, dureza do produto, módulo de tenacidade e do módulo proporcional de elasticidade, além da determinação da secante e tangente máxima.

Os valores da força de ruptura, energia necessária à ruptura e deformação específica para a ruptura inicial foram obtidos a partir de cada curva de compressão dos grãos de cártamo (trinta repetições) para cada teor de água.

Uma típica curva força-deformação obtida para os grãos de cártamo no presente estudo é apresentada na Figura 2(A) e na Figura 2(B) apresentam-se as curvas força-deformação para cada teor de água avaliado.

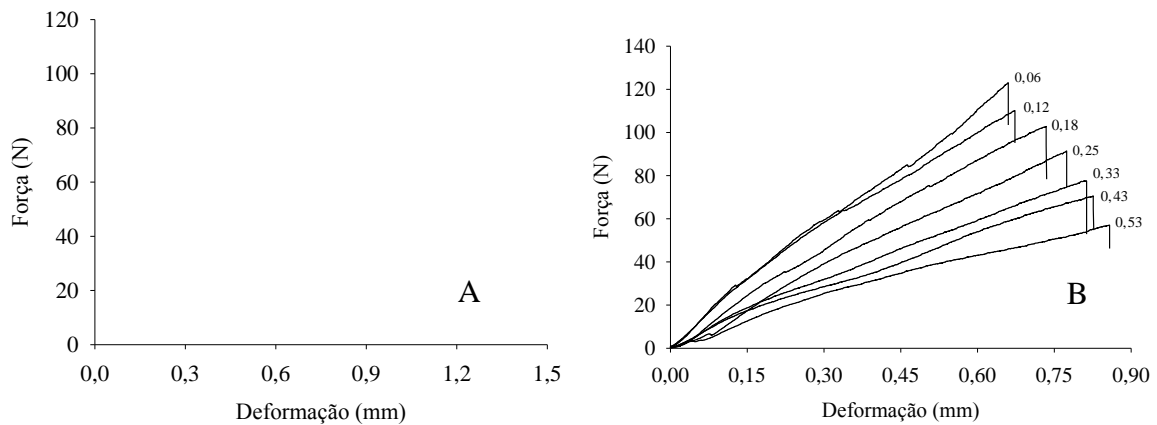


FIGURA 2. Típica curva força *versus* deformação para grãos de cártamo submetidos à compressão (A) e curvas força-deformação para cada teor de água avaliado (B).

A energia necessária à ruptura foi determinada pela seguinte equação (BRAGA et al., 1999):

$$E_r = \frac{F_r \times D}{2}$$

(1)

em que:

E_r : Energia necessária à ruptura, mJ;

F_r : Força de ruptura, N;

D : Deformação, mm.

A dureza (Q), que é a relação entre a força de ruptura do produto e a deformação necessária para a ruptura, foi determinada segundo a seguinte expressão:

$$Q = \frac{F_r}{D} \quad (2)$$

em que

Q : Dureza, $N \text{ mm}^{-1}$;

O volume de cada grão, considerado como um corpo cono-esférico, foi calculado com base em suas dimensões características, utilizando a Equação 3, descrita por Jain & Bal (1997), conforme observado na Figura 3.

$$V = \frac{Dc^2 a^2}{6(2a - Dc)} \quad (3)$$

Onde:

$$Dc = (bc)^{0,5} \quad (4)$$

em que:

V: volume do grão, mm³;

a: comprimento, mm;

b: largura, mm;

c: espessura, mm; e

Dc: média geométrica entre as medidas “b” e “c” do produto.

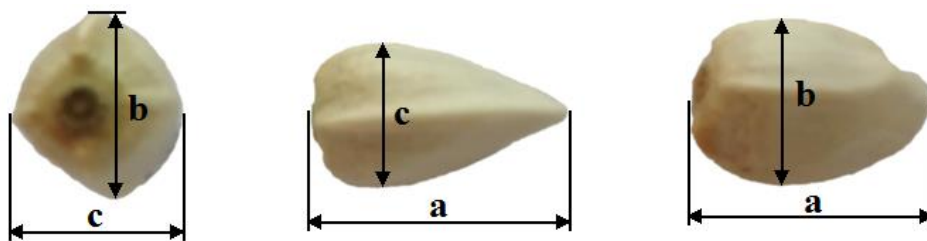


FIGURA 3. Representação dos diâmetros perpendiculares dos grãos de cártamo.

O módulo de tenacidade (P), que é a relação entre a energia necessária à ruptura e o volume da semente, foi determinado de acordo com a seguinte expressão:

$$P = \frac{E_r}{V} \quad (5)$$

em que:

P: módulo de tenacidade, mJ mm⁻³;

E_r : Energia necessária à ruptura, mJ; e

V : Volume do grão, mm^{-3} .

O raio equivalente (r) e o de curvatura (R_c) dos grãos foram obtidos segundo as aproximações descritas pelas Equações 4 e 5, para corpos convexos (ASAE, 2001).

$$R_c = \frac{(c^2 + a^2)}{8c} \quad (6)$$

$$r = \frac{c}{2} \quad (7)$$

em que:

a : comprimento do grão, mm.

c : espessura do grão, mm.

A determinação do módulo proporcional de elasticidade (E_p) foi realizado de acordo com a Equação 8 (COUTO et al., 2002), para diferentes valores de deformações.

$$E_p = \frac{0,531 \times F}{D^{3/2}} \times \left[2 \times \left(\frac{1}{r} + \frac{1}{R} \right)^{1/3} \right]^{3/2} \quad (8)$$

em que:

E_p : módulo proporcional de elasticidade, Pa;

F : força, N;

D : deformação elástica do corpo nos pontos de contato com a placa superior e inferior, m;

R, r : raios de curvatura nos pontos de contato, m.

HENRY et al. (1996) relataram que a força necessária para deformar materiais biológicos pode ser descrita como uma função da deformação de acordo com a série de Taylor:

$$F = dx + ex^2 + fx^3 \quad (9)$$

em que:

x: deformação, mm;

d, e, f: coeficientes elásticos do modelo, unidades de $N.mm^{-1}$, $N.mm^{-2}$ e $N.mm^{-3}$.

A Figura 3 ilustra a curva de força versus deformação representada de acordo com a Equação 9. A utilização deste modelo permite a identificação de três seções distintas ao longo da curva: a seção inicial côncava, a seção intermediária que inclui o ponto de inflexão e a seção convexa em que a inclinação da curva diminui.

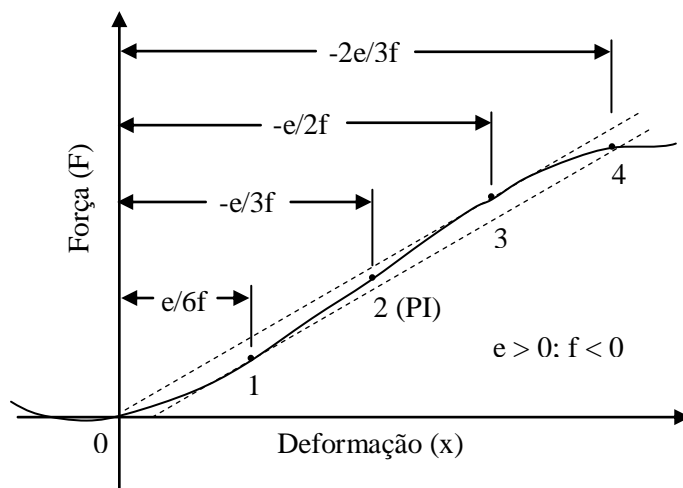


FIGURA 4. Curva força versus deformação do modelo $F = dx + ex^2 + fx^3$; para $e > 0$; $f < 0$; PI = ponto de inflexão (HENRY et al., 1996).

Baseado na Equação 9, a inclinação da curva força-deformação para um ponto qualquer é a tangente (T), pode ser obtida a partir da primeira derivada da Equação 9:

$$T = d + 2ex + 3fx^2 \quad (10)$$

em que:

x: deformação, mm;

d, e, f: coeficientes elásticos do modelo, unidades de $N.mm^{-1}$, $N.mm^{-2}$ e $N.mm^{-3}$.

A tangente máxima é obtida no ponto de inflexão da curva, em que $x = -e/3f$, sendo considerada um indicador da dureza do produto. A secante (S), inclinação da reta que passa pela origem e por um ponto qualquer da curva, será expressa da seguinte forma:

$$S = d + ex + fx^2 \quad (11)$$

A secante máxima corresponde ao ponto onde o valor de deformação x é $-e/2f$, descrevendo a elasticidade em diferentes níveis de deformação.

Os dados de propriedades mecânicas serão submetidos à análise de regressão e seleção do modelo matemático adequado para expressar a relação entre as variáveis estudadas. Para análise do grau de ajuste de cada modelo, serão consideradas as magnitudes do coeficiente de determinação ajustados (variância explicada).

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na Figura 5, são apresentados os valores da força (N) necessária para a ruptura dos grãos de cártamo com diferentes teores de água submetidos à compressão uniaxial na posição natural de repouso.

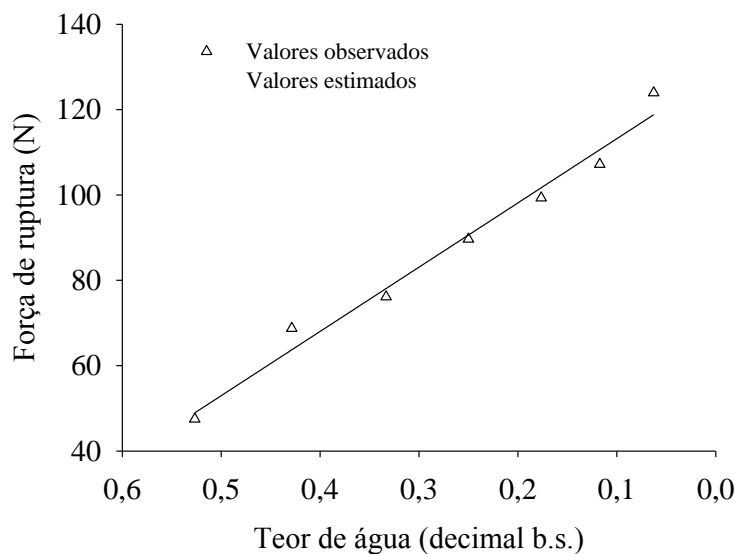


FIGURA 5. Força para a ruptura dos grãos de cártamo na posição natural de repouso em função do teor de água.

A redução do teor de água, pelo processo de secagem, resultou no aumento linear da força necessária para a ruptura do tegumento dos grãos de cártamo na posição natural de repouso (horizontal), onde os valores estimados pelo modelo de regressão (Tabela 1) variaram de 48,5 a 119,2 N em faixa de teor de água de 0,53 a 0,06 decimal b.s. Resultados similares foram verificados para grãos de mamona (GONELI, 2008), girassol (GUPTA e DAS, 2000) e arroz em casa e descascado (RESENDE et al., 2013).

Com a perda de água os grãos de cártamo se tornam mais rígidos, necessitando de elevadas forças para o rompimento do pericarpo do produto, favorecendo, assim, uma maior proteção do cotilédone, local onde se encontra o óleo do produto.

Na Figura 6 percebe-se que, com a redução do teor de água, houve decréscimo linear dos valores da deformação na ruptura, onde os valores estimados pelo modelo de

regressão (Tabela 1) variaram de $8,7 \times 10^{-4}$ a $6,7 \times 10^{-4}$ m, em uma faixa de teor de água de 0,53 a 0,06 decimal b.s.

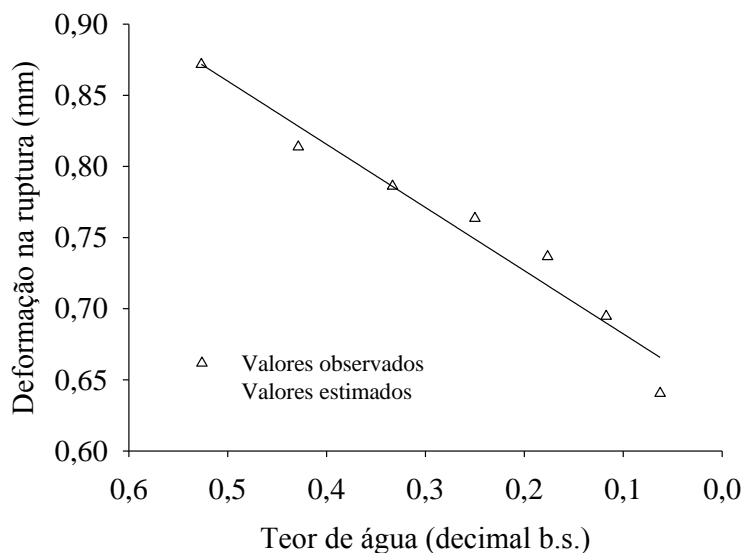


FIGURA 6. Deformação na ruptura dos grãos de cártamo na posição de repouso em função do teor de água.

Os maiores valores de deformação na ruptura dos grãos de cártamo encontrados nos maiores teores de água (Figura 6) se devem a menor rigidez do produto quando o mesmo se encontrou com elevado conteúdo de água. Entretanto, com a redução do teor de água, o material apresentou maior rigidez (Figura 7) e, conseqüentemente, menor foi sua capacidade de deformar sem que houvesse ruptura do seu pericarpo.

Conforme verificado na Figura 7, o decréscimo do teor de água dos grãos de cártamo resultou no aumento da dureza dos mesmos, onde os valores estimados pelo modelo de regressão (Tabela 1) variaram de 51,8 a 177,6 N mm^{-1} , em uma faixa de teor de água de 0,53 a 0,06 decimal b.s. Isso, possivelmente, se deve em função de que, com a redução do teor de água, há uma melhor organização das células do pericarpo do produto, conferindo-lhe maior rigidez.

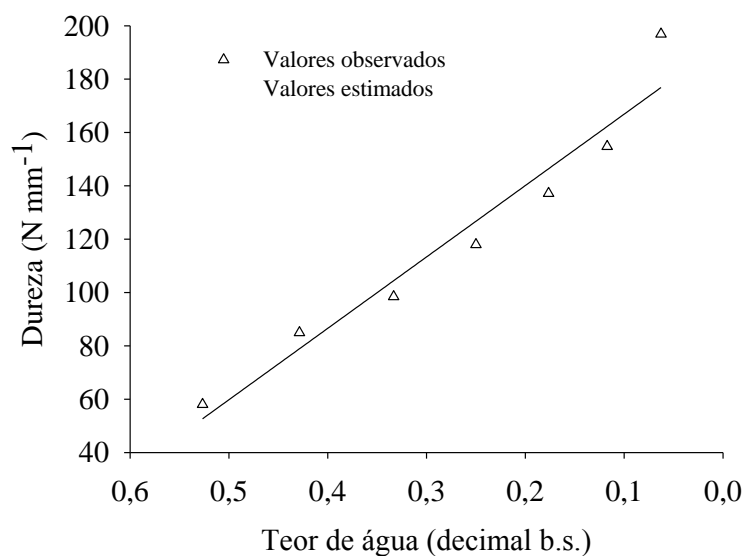


FIGURA 7. Dureza dos grãos de cártamo na posição natural de repouso em função do teor de água.

Os resultados obtidos para a característica de dureza (Figura 7) justificam os encontrados para a força à ruptura (Figura 5), visto que quanto maior a dureza do pericarpo dos grãos de cártamo, maior a força necessária para ruptura dos mesmos. Resultados similares aos encontrados por GONELI (2008), com grãos de mamona.

Com a redução do teor de água, houve aumento linear dos valores da energia para a ruptura dos grãos de cártamo (Figura 8), onde os valores estimados pelo modelo de regressão (Tabela 1) variaram de 22,1 a 41,2 mJ, em uma faixa de teor de água de 0,53 a 0,06 decimal b.s.

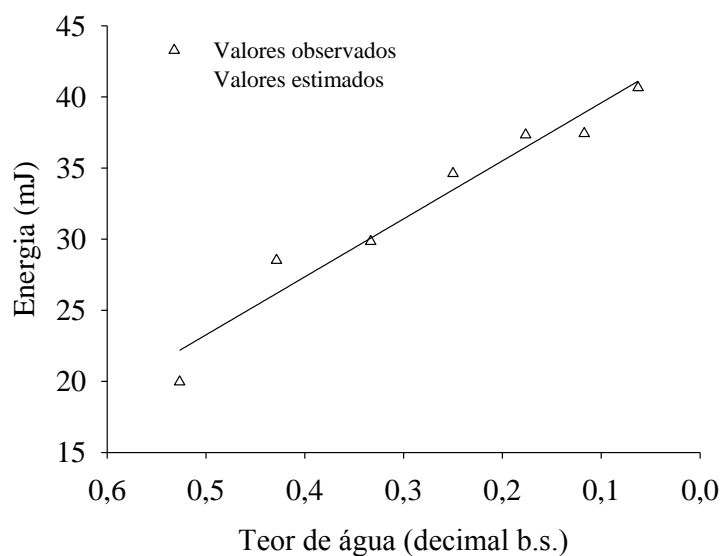


FIGURA 8. Energia necessária para a ruptura dos grãos de cártamo na posição natural de repouso em função do teor de água.

Com a redução do teor de água, maior foi a dureza apresentada pelos grãos de cártamo (Figura 7) e, também, maior foi a força requerida para a ruptura dos mesmos (Figura 5), o que pode justificar o aumento nos valores de energia necessária para a ruptura do pericarpo do produto (Figura 8).

MALIK e SAINI (2016) obtiveram resultados semelhantes avaliando o teor de água nas propriedades de engenharia de sementes de girassol, onde o produto foi mais resistente à ruptura com a redução do teor de água e a energia necessária para a ruptura foi maior.

Os valores do módulo de tenacidade dos grãos de cártamo aumentaram com a redução do teor de água (Figura 9), onde as magnitudes estimadas pelo modelo de regressão (Tabela 1) variaram de 0,43 a 0,96 (adimensional), em uma faixa de teor de água de 0,53 a 0,06 decimal b.s.

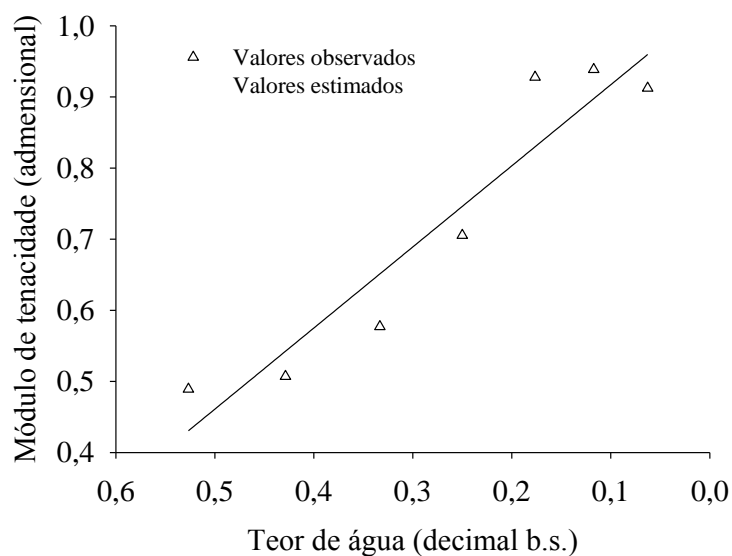


FIGURA 9. Módulo de tenacidade dos grãos de cártamo em posição de repouso em função do teor de água.

Na Tabela 1 encontram-se as equações ajustadas às propriedades mecânicas dos grãos de cártamo sob compressão uniaxial na posição natural de repouso, onde é possível verificar que as equações ajustaram-se satisfatoriamente aos dados experimentais, apresentando elevados valores de coeficiente de determinação e níveis de significância superiores a 99%. Isso indica que as propriedades mecânicas dos grãos de cártamo avaliadas neste estudo são altamente dependentes do teor de água, considerando-se a faixa de conteúdo de água avaliada.

Tabela 1. Equações ajustadas às propriedades mecânicas dos grãos de cártamo na posição de repouso em função do teor de água.

Propriedade mecânica	Equação	R ²	P _{level}
Força para a ruptura	Fr= 128,2654 - 150,5933 U	0,98	<0,01
Energia para a ruptura	Er = 43,6618 - 40,7871 U	0,95	<0,01
Dureza	Q= 193,6533 - 267,7196 U	0,94	<0,01
Deformação na ruptura	D= 0,63789 + 0,4442 U	0,95	<0,01
Módulo de tenacidade	P = 1,0312 - 1,1404 U	0,90	<0,01

U: teor de água (decimal, b.s.)

Na Tabela 2 são apresentados os valores médios dos raios de curvatura dos grãos de cártamo em função do teor de água, onde é possível verificar que os raios de curvatura variaram com o teor de água do produto. Entretanto, não foi constatada tendência clara em função dessa variável (teor de água).

Tabela 2. Valores médios dos raios de curvatura (r e Rc) dos grãos de cártamo na posição de repouso em função do teor de água.

Teor de água (decimal, b.s.)	R (mm)	Rc (mm)
0,06	1,78643	3,50772
0,12	1,79304	3,54385
0,18	1,76786	3,51866
0,25	1,92482	3,69023
0,33	1,97089	3,06075
0,43	1,95750	3,76546
0,53	1,83960	2,94986

Verifica-se na Figura 10 que, independentemente do teor de água, maiores foram os valores médios da força máxima para a compressão dos grãos de cártamo com o aumento da magnitude de deformação dos mesmos. Também, que, a redução do teor de água do produto elevou as magnitudes da força máxima para a compressão dos grãos de cártamo, com destaque para as deformações de 0,0003; 0,0004 e 0,0005 m.

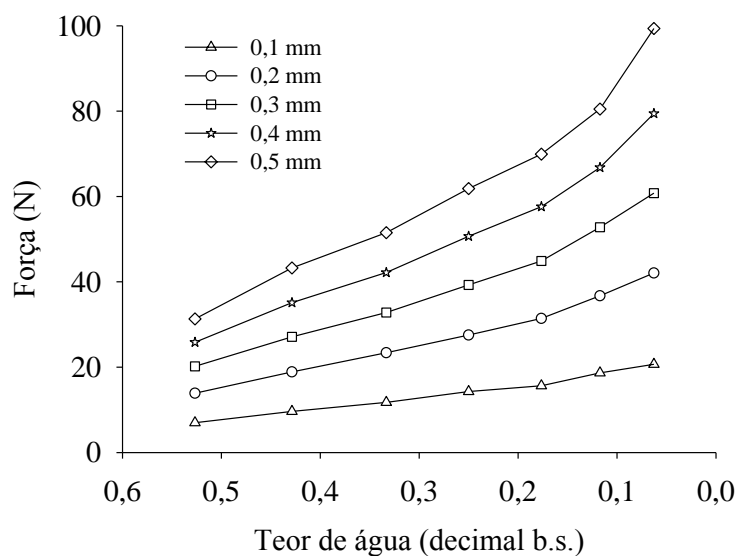


Figura 10. Força máxima de compressão para os grãos de cártamo na posição de repouso para diferentes deformações e teor de água.

Os grãos com teores de água maiores oferecem menor resistência à compressão, aumentando proporcionalmente com a redução do teor de água. Esta tendência deve-se, possivelmente, a uma mudança gradual na integridade da matriz celular com a redução do teor de água (GUPTA e DAS, 2000). Resultados similares foram encontrados por FERNANDES et al. (2014), com grãos de trigo.

Os valores do módulo proporcional de elasticidade dos grãos de cártamo se elevaram com a redução do teor de água, independentemente do nível de deformação (Figura 11). Ainda é possível verificar que, quanto menor o grau de deformação, maiores foram os valores do módulo proporcional de elasticidade, independentemente do teor de água dos grãos de cártamo.

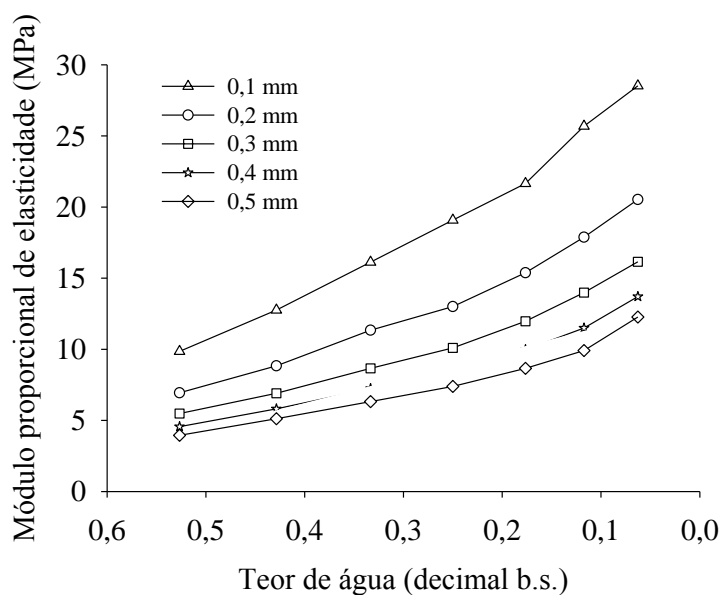


Figura 11. Módulo proporcional de elasticidade dos grãos de cártamo na posição de repouso para diferentes deformações e teor de água.

Resultados similares foram encontrados por BARLAGE (1995), estudando o comportamento reológico de canola e trigo, em que o módulo de elasticidade e tensão máxima de compressão diminui linearmente com o aumento do teor de água.

A Tabela 3 apresenta os valores dos coeficientes elásticos do modelo proposto por HENRY et al. (1996), assim como os valores da tangente e secante máximas para os grãos de cártamo com diferentes teores de água submetidos ao teste de compressão na posição natural de repouso.

Tabela 3 - Valores observados dos coeficientes elásticos d, e e f além dos valores da tangente e secante máximas obtidos a partir da curva força deformação dos grãos de cártamo com diferentes teores de água.

Teor de água (decimal b.s.)	d (Nmm ⁻²)	e (Nmm ⁻²)	f (Nmm ⁻³)	Tangente Maxima (N mm ⁻¹)	Secante Maxima (N mm ⁻¹)
0,06	221,61	-90,30	87,90	190,68	198,41
0,12	197,72	-77,05	6,16	-123,17	-42,95
0,18	166,38	-59,03	11,31	63,68	89,35
0,25	152,67	-92,57	69,24	111,42	121,73
0,33	128,72	-80,95	58,71	91,51	100,81
0,43	102,95	-55,20	44,33	80,03	85,76
0,53	72,729	-16,55	-7,60	80,03	81,73

A descrição do modelo indicado por HENRY et al. (1996) infere que os sinais dos coeficientes “e” e “f” identificam condições especiais do material e do teste. Para espécies não danificadas, o sinal esperado para os coeficientes deverá ser positivo para “e”, assim como negativo para “f”. Além disso, um valor positivo de “d” é sempre requerido para uma inclinação inicial positiva da curva. De acordo com a Tabela 3 observa-se que estas características tiveram resultados contrários para “e” e “f” em toda a faixa de teor de água estudada neste trabalho, que variou de 0,53 a 0,06 b.s.

Segundo HENRY et al. (2000a), os sinais esperados para tangente, secante e os coeficientes elásticos “e” e “f” podem não ser obtidos ou anormais quando ocorre: (1) deslizamento do grão entre as placas de compressão; (2) grãos apresentando danos físicos não detectáveis ao olho nu; e (3) grãos apresentando teor de água elevado, dificultando, assim, a detecção do ponto de ruptura devido à sua maciez.

Assim, no caso deste trabalho, o fato do parâmetro de ajuste f ter apresentado valores positivos se justifica principalmente pela alternativa 3 apresentada, ou seja, o produto possuía um teor de água muito elevado, justificando o valor negativo para a

tangente e a secante no teor de água 0,12 b.s., BOTELHO (2009) obteve resultados semelhantes para grãos de milho.

Como pode ser visto na Tabela 3, a redução do teor de água, em geral, resultou em um aumento nos valores da tangente e secante máximas, principalmente para os menores valores de teor de água. Observa-se também que os valores da secante máxima apresentaram a mesma tendência dos valores da tangente máxima, embora com menor magnitude. Isto significa que a secante máxima não é apenas o valor máximo da curva força-deformação em que a tangente passa pela origem, mas também é o valor da tangente da curva na seção côncava onde começa a haver redução da força em relação à deformação (HENRY et al., 1996).

A seção côncava (ponto 3), apresentada na Figura 3, representa o ponto onde a curva força-deformação começa a diminuir excessivamente, antes que entre em colapso, ou seja, ela indica o ponto onde o comportamento do produto passa de elástico para plástico. Assim, o valor máximo da secante também representa a habilidade de resistir à deformação antes de o valor elástico máximo ser encontrado (HENRY et al., 2000a).

5. CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos neste trabalho, pode-se concluir que:

- 1) A redução do teor de água alterou as principais propriedades mecânicas dos grãos de cártamo, gerando um aumento da força necessária à ruptura, redução da deformação necessária à ruptura, aumento na dureza, aumento da energia necessária à ruptura, aumento do módulo de tenacidade e aumentos nos valores da tangente e secante máxima.
- 2) Para deformações específicas durante a compressão, a redução do teor de água gerou aumento nas forças de compressão e no módulo proporcional de elasticidade.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABUD, H.F.; GONÇALVES, N.R.; REIS, R.G.E.; GALLÃO, M.I.; INNECCO, R. Morfologia de sementes e plântulas de cártamos. **Revista Ciência Agronômica**, v.41, n.2, p.259-265, 2010.

ASAE STANDARDS 2001. American Society of Agricultural Engineers. **Standards Engineering Practices Data**, St Joseph: Michigan, 2001. 1027 p.

BARGALE, P.C.; IRUDAYARAJ, J.; MARQUIST, B. Studies on rheological behaviour of canola and wheat. **Journal Agricultural of Engineering Research**, v.61, p.267-274, 1995.

BELLÉ, R.A.; ROCHA, E.K.; BACKES, F.A.A.L.; NEUHAUS, M.; SCHWAB, N.T. Safflower grown in different sowing dates and plant densities. **Ciência Rural**, v.42, n.12, p.2145-2152, 2012.

BOTELHO, F.M., Absorção de água por grãos de milho com diferentes níveis de danificação mecânica. **Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia Agrícola). Universidade Federal de Viçosa**. 81p. 2009.

BRAGA, G.C.; COUTO, S.M.; HARA, T.; ALMEIDA NETO, J.T.P. Mechanical behaviour of macadâmia nut under compression loading. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v.72, p.239-245, 1999.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Regras para análise de sementes. **Secretaria de Defesa Agropecuária**. Brasília, DF: MAPA/ACS, 2009. 395 p.

CORONADO, L.M. El cultivo del cártamo (*Carthamus tinctorius* L.) en México. **Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias**, México, 2010. 96p.

COUTO, S.M.; BATISTA, C.S.; PEIXOTO, A.B.; DEVILLA, I.A. Comportamento mecânico de frutos de café: módulo de deformidade. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v.6, p.285-294, 2002.

DAJUE, L.; MÜNDEL, H. H. Safflower (*Carthamus tinctorius* L.). Promoting the conservation and use of underutilized and neglected crops. **International Plant Genetic Resources, Italy**, 1996. 83p.

DAVIES, R. M. Effects of moisture content on physical and mechanical properties of three varieties of cowpea. **CIGR Journal, Department of Agricultural and Environmental Engineering**, Niger Delta University, Wilberforce Island, Bayelsa State, Nigeria vol. 13, n.13. 2011. 8p.

EKIN, Z. Resurgence of Safflower (*Carthamus tinctorius* L.) Utilization: A Global View. **Journal of Agronomy**, v.4, n.2, p.83-87, 2005.

EMONGOR, V. Safflower (*Carthamus tinctorius* L.) the Underutilized and Neglected Crop. A Review. **Asian Journal of Plant Sciences**, v.9, n.6, p.299-306, 2010.

FERNANDES, L. S., CORRÊA, P.C., DINIZ, M.D.M.S., LEITE, D.M., VASCONCELLOS, D.S.L. **Influência do teor de água nas propriedades mecânicas dos grãos de trigo submetidos à compressão**. Uberlândia, v. 30, supplement 1, p. 219-22. 2014.

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

GUPTA, R. K.; DAS, S. K. Fracture resistance of sunflower seed and kernel to compressive loading. **Journal of Food Engineering**, v.46, p.1-8, 2000.

HALL, C. W. **Drying and storage of agricultural crops**. Westport: AVI, 1980.

HENRY, Z. A.; SU, B.; ZHANG, H. Resistance of soya beans to compression. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v.76, p.175-181, 2000.

HENRY, Z.A.; ZHANG, H.; ONKS, D. Generalized model of resistance to strain of cellular material. **American Society of Agricultural Engineers**, Paper N° 96-6023, St. Joseph, MI, USA. p.1-26, 1996.

KIZIL, S.; ÇAKMAK, Ö.; KIRICI, S.; İNAN, M.A. Comprehensive study on safflower (*Carthamus tinctorius* L.) in semi-arid conditions. **Biotechnology & Biotechnological Equipment**, v.22, n.4, p.947-953, 2008.

LIU, M.; HAGHIGHI, K.; STROSHINE, R.L.; TING, E.C. Mechanical properties of soybean cotyledon and failure strength of soybean kernel. **Transactions of the ASAE**, v.33, p.559-565, 1990.

MALIK, M.A.; SAINI, C.G. Engineering properties of sunflower seed: Effect of dehulling and moisture content, **Cogent Food & Agriculture** ,2016. 11p.

MARTINS, E.A.S. **Dimensionamento e experimentação de um secador de leite fixo para a secagem de produtos agrícolas**. 2015. 123p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) Faculdade de Ciências Agrárias, Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados, 2015.

PADILHA, A.C.M.; GOLLO, S.S.; SILVA, M.N. **Estudos na Cadeia Produtiva do Biodiesel**. Jaguarão/RS: Unipampa, 2012. 255p

RESENDE, O; CORRÊA, P.C.; OLIVEIRA, G.H.H.; GONELI, A.L.D.; JARÉN, C. Mechanical properties of rough and dehulled rice during drying. **International Journal of Food Studies**, v.2, p.158-166, 2013.

RIBEIRO, D.M.; CORRÊA, P.C.; FURTADO, B.F.; GONELI, A.L.D.; RESENDE, O. Propriedades mecânicas dos grãos de soja em função do teor de água. **Engenharia Agrícola**, v.27, p.493-500, 2007.

SEHGAL, D.; RAINA, S.N. Genotyping safflower (*Carthamus tinctorius*) cultivars by DNA fingerprints. **Euphytica**, v.146, n.1-2, p.67–76, 2005.