

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

**RESPOSTAS DOS GRÃOS DE MAMONA 'AL GUARANY
2002' AO TRATAMENTO TÉRMICO VISANDO RUPTURA E
REMOÇÃO DO TEGUMENTO**

ADRIANO CHAVES BASTOS

**CAMPINAS
DEZEMBRO DE 2010**

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

**RESPOSTAS DOS GRÃOS DE MAMONA 'AL GUARANY
2002' AO TRATAMENTO TÉRMICO VISANDO RUPTURA E
REMOÇÃO DO TEGUMENTO**

Dissertação de Mestrado submetida à banca
examinadora para obtenção do título de Mestre
em Engenharia Agrícola, na área de
concentração em Máquinas Agrícolas.

ADRIANO CHAVES BASTOS

Orientador: Prof. Dr. ANTÔNIO CARLOS DE OLIVEIRA FERRAZ

CAMPINAS

DEZEMBRO DE 2010

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

B297r Bastos, Adriano Chaves
Respostas dos grãos de mamona 'AL Guarany 2002'
ao tratamento térmico visando ruptura e remoção do
tegumento / Adriano Chaves Bastos. --Campinas, SP:
[s.n.], 2011.

Orientador: Antônio Carlos de Oliveira Ferraz.
Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola.

1. Secagem. 2. Descascamento. 3. Propriedades
mecânicas. 4. Viscoelasticidade. 5. Máquinas agrícolas.
I. Ferraz, Antônio Carlos de Oliveira. II. Universidade
Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia
Agrícola. III. Título.

Título em Inglês: Response of 'AL Guarany 2002' castor beans to thermal
treatment aiming disruption and removal of the seed coat

Palavras-chave em Inglês: Drying, Decortication, Mechanical properties,
Viscoelasticity, Farm machinery

Área de concentração: Máquinas Agrícolas

Titulação: Mestre em Engenharia Agrícola

Banca examinadora: Max César de Araújo, Paulo Ademar Martins Leal

Data da defesa: 24/02/2011

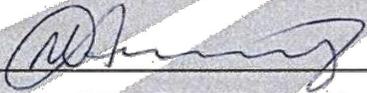
Programa de Pós Graduação: Engenharia Agrícola

Este exemplar corresponde à redação final da **Dissertação de Mestrado** defendida por **Adriano Chaves Bastos**, aprovado pela Comissão Julgadora em 24 de fevereiro de 2011, na Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas.

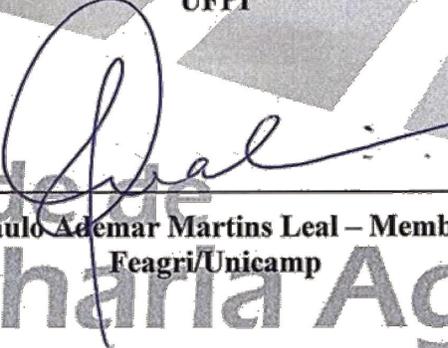
FEAGRI



Prof. Dr. Antonio Carlos de Oliveira Ferraz – Presidente e Orientador
Feagri/Unicamp



Prof. Dr. Max César de Araujo - Membro Titular
UFPI



Prof. Dr. Paulo Ademar Martins Leal – Membro Titular
Feagri/Unicamp

Faculdade de
Engenharia Agrícola
Unicamp

AGRADECIMENTOS

A Deus por estar aqui e poder aproveitar as oportunidades da vida.

A minha família, principalmente a minha mãe Dona Edna F. Chaves Bastos e minha irmã Martha L. Bastos, pelo apoio moral, psicológico e financeiro quando necessário.

A meu irmão Erich C. Bastos pelas conversas alteradas de madrugada jogando.

As minhas amigas Lilia Sonoda, Mary Ângela e Gabriela Kurokawa, pela companhia e conversas, em especial também a Daniela M. Yamashita.

A meus amigos Danilo Silva e Sheizi Naka pela ajuda e colaboração em diversos trabalhos.

Aos diversos colegas, amigos e companheiros que perto ou distante colaboraram indiretamente por este título.

Ao CNPq pela bolsa de estudos concebida, necessário para meu sustento na cidade.

A UNICAMP e FEAGRI pela oportunidade de aprimorar meus conhecimentos e financiamento da pesquisa.

Ao Prof. Antônio Carlos pela orientação e diversas conversas e incentivos efetuadas no decorrer do curso.

Ao Prof. Paulo Leal e a Profa. Lireny A. Guaraldo pela grande colaboração e ideias em certas partes deste experimento.

Aos diversos professores da FEAGRI que ajudaram de forma direta e indireta com conselhos e conversas.

Aos técnicos dos Laboratórios de Pós-Colheita e Propriedades Mecânicas dos Materiais Biológicos, em especial a Rosa Helena e ao Leandro Morais.

Ao IAC e a APTA de Pindorama por ter nos atendido e fornecido os frutos de mamona.

A empresa A. Azevedo Óleos Ind. e Com. de óleos Ltda por ceder suas estruturas para realização de partes do experimento.

"As emoções são a próxima fronteira a ser compreendida e conquistada. Gerenciar nossas emoções não é sedá-las ou suprimi-las, mas compreendê-las de modo que possamos inteligentemente direcionar nossas energias e intenções emocionais. É hora dos seres humanos crescerem emocionalmente, amadurecer em cidadãos emocionalmente gerenciados e responsáveis. Nenhuma pílula mágica fará isso."

DOC CHILDRE

SUMÁRIO

RESUMO	IX
ABSTRACT	XI
LISTA DE FIGURAS	XIII
LISTA DE TABELAS.....	XVII
LISTA DE SÍMBOLOS	XVIII
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1. CONSTITUIÇÃO DOS FRUTOS E GRÃOS	4
2.2. SECAGEM E DEBULHA DOS FRUTOS DE MAMONA	5
2.3. EXTRAÇÃO DE ÓLEO DE MAMONA	7
2.4. CLASSIFICAÇÃO DO ÓLEO DE MAMONA.....	10
2.5. PROPRIEDADES FÍSICO-MECÂNICAS DOS GRÃOS	11
3. MATERIAL E MÉTODOS	15
3.1. MATERIAL	15
3.2. CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DO MATERIAL.....	16
3.2.1. Teor de água de equilíbrio.....	17
3.2.2. Peso específico	18
3.2.3. Forma e tamanho	20
3.3. TRATAMENTOS DE SECAGEM.....	22
3.4. ENSAIOS DE COMPRESSÃO.....	26
3.5. PROJETO E CONSTRUÇÃO DO DISPOSITIVO DE REGULAGEM AUTOMÁTICA DA DEFORMAÇÃO ESPECÍFICA LIMITE (DIRADEL)	29
3.5.1. Aferição da velocidade de deslocamento do cilindro pneumático	29
3.5.2. Calibração e repetitividade das leituras da dimensão	29
3.6. ENSAIOS COM ALTA TAXA DE DEFORMAÇÃO.....	30
3.6.1. Determinação da Deformação Específica Limite	31

3.6.2. Influência de diferentes deformações específicas nos tratamentos de secagem	32
3.6.3. Influência de diferentes deformações específicas com tratamentos de secagem adicionais.....	32
3.7. QUALIDADE DO ÓLEO	33
3.7.1. Extração do óleo	33
3.7.2. Acidez, Índice de Peroxido e Teor de água do óleo	34
3.8. FLUXOGRAMA DAS PRINCIPAIS ETAPAS DO EXPERIMENTO	35
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	37
4.1. CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DO MATERIAL.....	37
4.1.1. Teor de água de equilíbrio.....	37
4.1.2. Peso específico	38
4.1.3. Forma e tamanho	39
4.2. TRATAMENTOS DE SECAGEM.....	40
4.3. ENSAIOS DE COMPRESSÃO.....	43
4.3.1. Força máxima na ruptura	44
4.3.2. Energia na ruptura.....	47
4.3.3. Deformação específica na ruptura	49
4.3.4. Rigidez	51
4.4. CONSTRUÇÃO DO DISPOSITIVO DE REGULAGEM AUTOMÁTICA DA DEFORMAÇÃO ESPECIFICA LIMITE– DIRADEL	53
4.4.1. Estrutura	54
4.4.2. Mesa de levantamento vertical	55
4.4.3. Componentes pneumáticos.....	56
4.4.4. Componentes eletrônicos e programação do equipamento	57
4.4.5. Aferição da velocidade de deslocamento do cilindro pneumático	61
4.4.6. Calibração e repetitividade da leitura da dimensão	62
4.5. ENSAIOS COM ALTA TAXA DE DEFORMAÇÃO	64
4.5.1. Avaliação do Desempenho.....	64
4.5.2. Determinação da Deformação Específica Limite.....	65
4.5.3. Influência de diferentes deformações específicas nos tratamentos de secagem	69

4.5.4. Influência de diferentes deformações específicas com tratamentos de secagem adicionais.....	74
4.6. ANÁLISE DA QUALIDADE DO ÓLEO	78
5. CONCLUSÕES	81
6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	83
7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	84
8. APÊNDICE.....	90
8.1. APÊNDICE 1 – PROCEDIMENTO SIMPLIFICADO PARA REALIZAÇÃO DE ENSAIOS COM O DIRADEL	90
8.2. APÊNDICE 2 – LISTA DOS COMPONENTES ELETRÔNICOS UTILIZADOS PARA A CONSTRUÇÃO DO DIRADEL	91

RESUMO

Atualmente o Brasil ocupa o terceiro lugar no ranking mundial na produção e extração do óleo de mamona (*Ricinus communis L*), correspondendo a 13,2%, depois da Índia e da China, primeiro e segundo maiores produtores, respectivamente. Os frutos de mamona, depois de colhidos, são secos e debulhados obtendo os grãos, os quais são armazenados para posteriormente serem encaminhados à extração do óleo. O processo de extração do óleo é realizado pela prensagem dos grãos íntegros: tegumento e endosperma. Este tegumento é pigmentado e abrasivo, desgastando precocemente os equipamentos e demandando processos adicionais de clarificação do óleo. A decorticação dos grãos para a retirada do tegumento, anterior à prensagem, poderia gerar uma economia no processo de extração. O objetivo deste trabalho foi verificar o efeito da temperatura de secagem nas propriedades físico-mecânicas dos grãos de mamona da cultivar 'AL Guarany 2002', após os frutos serem secos e debulhados. Para tal determinação foram efetuados ensaios de compressão entre pratos planos, rígidos e paralelos nos grãos após os tratamentos de secagem, para as direções do comprimento e largura, obtendo-se a força máxima na ruptura do tegumento, energia na ruptura, deformação específica e rigidez. As temperaturas de secagem utilizadas foram de 40, 60, 80 e 100°C. Posteriormente, foram efetuadas avaliações do grau de ruptura do tegumento após os grãos serem submetidos à alta taxa de deformação utilizando-se equipamento projetado e construído para tal finalidade, denominado DIRADEL. Verificou-se nos ensaios de compressão que a secagem dos frutos de mamona a diferentes temperaturas influencia nas propriedades mecânicas dos grãos de mamona. Com o aumento da temperatura de secagem a força e a energia na ruptura do tegumento para a direção do comprimento reduziram-se e, inversamente, estes valores elevaram-se para a direção da largura. Os valores para a direção do comprimento oscilaram entre 55,52 a 63,11 N para a força máxima na ruptura do tegumento, 0,0169 a 0,0202 J para a energia, 4,03 a 4,48% para a deformação específica e 93,29 a 100,62 N.mm⁻¹ para a rigidez. Para a direção da largura os valores oscilaram entre 58,46 a 70,02 N para a força máxima na ruptura do tegumento, 0,0281 a 0,0365 J para a energia, 9,10 a 11,10% para a deformação específica e 62,11 a 70,50 N.mm⁻¹ para a rigidez. Nos ensaios a alta taxa de deformação, a deformação específica de 14% apresentou a maior porcentagem de grãos com ruptura total do tegumento e liberação do endosperma inteiro, independente da direção e do tratamento de secagem, sendo esta a deformação específica limite. A direção da largura

demonstrou porcentagem de grãos com ruptura total do tegumento e endosperma inteiro inferior à posição do comprimento, independente do tratamento de secagem. O desempenho da decorticação dos grãos de mamona pode ser afetado com grãos secos a temperaturas acima de 60°C, pois a retirada excessiva de água do endosperma prejudica sua resistência deixando-o mais frágil. Secagens com temperaturas mais elevadas devem ocorrer com maior cautela se o intuito for a decorticação dos grãos.

Palavras-Chaves: secagem, descascamento, propriedades mecânicas, viscoelasticidade, máquinas agrícolas.

ABSTRACT

RESPONSE OF 'AL GUARANY 2002' CASTOR BEANS TO THERMAL TREATMENT AIMING DISRUPTION AND REMOVAL OF THE SEED COAT

Brazil currently occupies the third position in the world's ranking production and extraction of castor oil (*Ricinus communis L*), corresponding to 13.2%, after India and China which are the first and second biggest producers, respectively. The fruits of castor bean, once harvested, are dried and threshed, and when the grains are obtained, they are stored for later transport to oil extraction. This process is done by pressing the intact grain, seed coat and endosperm. The seed coat is pigmented and abrasive, wearing the equipment earlier and requiring additional processes to clarify the oil, afterwards. The decortication of the grain for seed coat removal, prior to pressing, could generate savings in the extraction process. The aim of this study was to assess the effect of drying temperature on physico-mechanical properties of castor beans, cultivar 'AL Guarany 2002', after the fruits were dried and threshed. For such determination, compression tests were made between flat, rigid and parallel plates on the grains, after the drying treatments, to the directions of length and width, obtaining the maximum force at rupture of the seed coat, energy at break, specific deformation and stiffness. The drying temperatures used were 40, 60, 80 and 100 °C. The grains were evaluated based on the degree of disruption of the tegument after the beans are exposed to high strain rate using equipment designed and built for this purpose, called DIRADEL. It was found in compression test that castor fruits dried at different temperatures was influenced by the mechanical properties of castor beans. With the increase of drying temperature, the strength and energy to break the seed coat along the length is reduced and, conversely, these values rose to the width direction. Values for the direction of the length ranged from 55,52 to 63,11 N for the maximum force at rupture of the seed coat, from 0,0169 to 0,0202 J for energy, 4,03 to 4,48% for the specific deformation and from 93,29 to 100,62 N.mm⁻¹ for stiffness. For the width direction, values ranged from 58,46 to 70,02 N for the maximum force at rupture of the seed coat, from 0,0281 to 0,0365 J for energy, 9,10 to 11,10% for the specific deformation, 62,11 to 70,50 N.mm⁻¹ for stiffness. In the experiments at high strain rate, specific deformation of 14%,

had the highest percentage of grains with total rupture of the seed coat and endosperm full release, regardless of direction and drying treatment, which is the specific deformation limit. The width direction showed the percentage of grains with total rupture of the seed coat and endosperm lower whole length of the position, regardless of the drying treatment. The performance of the decortication of castor beans can be affected by dry grains at temperatures above 60°C, because the excessive withdrawal of water from the endosperm, affecting their resistance and making it more fragile. Drying at higher temperatures should be done with greater caution when decorticating the grains.

Keywords: drying, dehulling, mechanical properties, viscoelasticity, agricultural machinery.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Principais componentes morfológicos do fruto (A) e do grão (B) de mamona (modificado de PLAXTON (2010) e LEUBNER (2007)).....	5
Figura 2. Fluxograma do processo de extração do óleo de mamona (FREIRE, 2006).....	9
Figura 3. Ilustração da aplicação de alta taxa de deformação com deformação específica limite (ϵ) em produto agrícola.	12
Figura 4. Racemo de mamona com 70 a 80 % frutos de mamona visualmente secos.....	15
Figura 5. Seleção efetuada com os frutos de mamona visualmente Secos (A) e Verdes (B) ...	15
Figura 6. Armazenamento dos frutos de mamona em sacos plásticos e selados.....	16
Figura 7. Câmara fria de armazenamento dos frutos de mamona a $4^{\circ}\text{C} \pm 0,4^{\circ}\text{C}$	16
Figura 8. Desenho esquemático de um grão de mamona com as dimensões características, considerando como um esferoide tri axial (adaptado de GONELI, 2008).	21
Figura 9. Secador Convectivo conjugado de fluxo perpendicular e/ou paralelo ao leito de secagem utilizado nos tratamentos de secagem.	22
Figura 10. Deposição de frutos de mamona na bandeja para secagem em camada fina e uniforme.	24
Figura 11. Debulha manual dos frutos de mamona após os tratamentos de secagem.	24
Figura 12. Acondicionamento para armazenamento dos grãos restantes após ensaios de compressão.....	26
Figura 13. Direção dos grãos de mamona que foram submetidos ao ensaio de compressão. ...	27
Figura 14. Extração do óleo efetuada pela prensagem dos grãos em cilindro perfurado.	34
Figura 15. Fluxograma das principais etapas do projeto.....	36
Figura 16. Valores observados e estimados pelos modelos propostos do teor de água de equilíbrio dos grãos de mamona.....	37
Figura 17. Cinética de secagem dos frutos de mamona a diferentes temperaturas.	41

Figura 18. Curvas obtidas nos ensaios de compressão nas duas posições após secagem a 40°C.	44
Figura 19. Curvas obtidas nos ensaios de compressão nas duas posições após secagem a 100°C.	44
Figura 20. Radiografia da semente de mamona mostrando o espaçamento entre o endosperma e o tegumento com as dimensões médias em milímetros (adaptado de CARVALHO <i>et al.</i> , 2010).	46
Figura 21. Vista frontal do DIRADEL com as partes construídas.	54
Figura 22. Vista lateral do DIRADEL.	54
Figura 23. Vista isométrica frontal da estrutura do DIRADEL.	55
Figura 24. Vista isométrica traseira da estrutura do DIRADEL.	55
Figura 25. Vista isométrica da mesa de levantamento vertical com suas partes constituintes. .	56
Figura 26. Componentes pneumáticos afixados a estrutura do equipamento.	57
Figura 27. Reservatório de ar comprimido.	57
Figura 28. Caixa metálica contendo os componentes eletrônicos.	58
Figura 29. Diagrama de comunicação entre os principais componentes físicos do dispositivo.	59
Figura 30. Fluxograma da sequência lógica da programação estabelecida no DIRADEL.	60
Figura 31. Gráficos do deslocamento e da velocidade de atuação do cilindro pneumático utilizado no DIRADEL.	61
Figura 32. Leituras efetuadas no DIRADEL comparadas com as do paquímetro.	62
Figura 33. Desvios nas leituras efetuadas no DIRADEL comparadas com o paquímetro.	63
Figura 34. Grãos de mamona submetidos aos ensaios com alta taxa de deformação, mostrando as classes estabelecidas para classificação. A - <i>ruptura total do tegumento com endosperma inteiro</i> (RtEi), B - <i>ruptura parcial do tegumento com Endosperma exposto</i> (RpEe), C - <i>ruptura parcial do tegumento com endosperma protegido</i> (RpEp); D - <i>ruptura total do tegumento com endosperma danificado</i> (RtEd).	64

- Figura 35. Desempenho da ruptura dos grãos de mamona através do impacto único e direcionado na *ruptura total do tegumento com endosperma inteiro* (RtEi), *ruptura parcial do tegumento com endosperma protegido* (RpEp), *ruptura parcial do tegumento com endosperma exposto* (RpEe) e *ruptura total do tegumento com endosperma danificado* (RtEd), expresso em porcentagem, para os tratamentos de secagem de 40 e 100°C a diferentes deformações específicas ao longo da direção da Largura..... 65
- Figura 36. Vista ampliada de um corte transversal na parte central do endosperma do grão de mamona mostrando a separação parcial dos cotilédones..... 67
- Figura 37. Desempenho da ruptura dos grãos de mamona através do impacto único e direcionado na *ruptura total do tegumento com endosperma inteiro* (RtEi), *ruptura parcial do tegumento com endosperma protegido* (RpEp), *ruptura parcial do tegumento com endosperma exposto* (RpEe) e *ruptura total do tegumento com endosperma danificado* (RtEd), expresso em porcentagem, para os tratamentos de secagem de 40 e 100°C a diferentes deformações específicas ao longo da direção do Comprimento..... 68
- Figura 38. Desempenho da ruptura dos grãos de mamona através do impacto único e direcionado na *ruptura total do tegumento com endosperma inteiro* (RtEi), *ruptura parcial do tegumento com endosperma protegido* (RpEp), *ruptura parcial do tegumento com endosperma exposto* (RpEe) e *ruptura total do tegumento com endosperma danificado* (RtEd), expresso em porcentagem, para todos os tratamentos de secagem a diferentes deformações específicas ao longo da direção da Largura. 70
- Figura 39. Gráfico de superfície 3D para a porcentagem de *grãos com ruptura total da casca com endosperma inteiro* (RtEi) para os diferentes tratamentos térmicos e deformações específica na direção da Largura..... 71
- Figura 40. Desempenho da ruptura dos grãos de mamona através do impacto único e direcionado na *ruptura total do tegumento com endosperma inteiro* (RtEi), *ruptura parcial do tegumento com endosperma protegido* (RpEp), *ruptura parcial do tegumento com endosperma exposto* (RpEe) e *ruptura total do tegumento com endosperma danificado* (RtEd), expresso em porcentagem, para todos os tratamentos

de secagem a diferentes deformações específicas ao longo da direção do Comprimento.	72
Figura 41. Gráfico de superfície 3D para a porcentagem de <i>grãos com ruptura total da casca com endosperma inteiro</i> (RtEi) para os diferentes tratamentos térmicos e deformações específica na direção do Comprimento.....	73
Figura 42. Desempenho da ruptura dos grãos de mamona através do impacto único e direcionado na <i>ruptura total do tegumento com endosperma inteiro</i> (RtEi), <i>ruptura parcial do tegumento com endosperma protegido</i> (RpEp), <i>ruptura parcial do tegumento com endosperma exposto</i> (RpEe) e <i>ruptura total do tegumento com endosperma danificado</i> (RtEd), expresso em porcentagem, para os tratamentos de secagem de 40, 60, 80 e 100°C com tratamento adicional de 15 minutos, a diferentes deformações específicas ao longo da direção da Largura.....	75
Figura 43. Gráfico de superfície 3D para a porcentagem de <i>grãos com ruptura total da casca com endosperma inteiro</i> (RtEi) para os diferentes tratamentos térmicos e deformações específica na direção da Largura com tratamento adicional de 15 minutos.	76
Figura 44. Desempenho da ruptura dos grão de mamona através do impacto único e direcionado na <i>ruptura total do tegumento com endosperma inteiro</i> (RtEi), <i>ruptura parcial do tegumento com endosperma protegido</i> (RpEp), <i>ruptura parcial do tegumento com endosperma exposto</i> (RpEe) e <i>ruptura total do tegumento com endosperma danificado</i> (RtEd), expresso em porcentagem, para os tratamentos de secagem de 40, 60, 80 e 100°C, com tratamento adicional de 15 minutos, a diferentes deformações específicas ao longo da direção do Comprimento.....	77
Figura 45. Gráfico de superfície 3D para a porcentagem de <i>grãos com ruptura total da casca com endosperma inteiro</i> (RtEi) para os diferentes tratamentos térmicos e deformações específica na direção do Comprimento com tratamento adicional de 15 minutos.....	78
Figura 46. Vista frontal do DIRADEL com destaque ao painel de controle do equipamento. .	90

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Dimensões dos objetos sólidos obtidas com paquímetro utilizadas para a calibração do DIRADEL	30
Tabela 2. Coeficientes dos modelos matemáticos com os respectivos R^2 e \bar{E}	38
Tabela 3. Valores médios dos tamanhos e formas obtidos dos grãos de mamona com os respectivos desvios padrões (DP) e coeficiente de variação (CV).	40
Tabela 4. Teores de água inicial médio dos frutos, grãos e pericarpo de cada lote utilizado nos experimentos com os respectivos coeficientes de variação (CV).	41
Tabela 5. Coeficientes obtidos para o modelo de Page nos tratamentos de secagem.	43
Tabela 6. Valores médios de Força na ruptura (N) obtidos nos ensaios de compressão para as direções do comprimento e largura com os respectivos coeficientes de variação (CV).	45
Tabela 7. Valores médios de energia de deformação até à ruptura (J) obtida nos ensaios de compressão para as direções do comprimento e largura e respectivos coeficientes de variação (CV).	48
Tabela 8. Valores médios de deformação específica (%) obtidos nos ensaios de compressão para as direções do comprimento e largura com os respectivos coeficientes de variação (CV).	50
Tabela 9. Valores médios de rigidez ($N.mm^{-1}$) obtidos nos ensaios de compressão para as direções de comprimento e largura com os respectivos coeficientes de variação (CV).	52
Tabela 10. Leituras médias efetuadas no DIRADEL, dadas em milímetros, com os respectivos coeficientes de variação para cada medida.	63
Tabela 11. Valores médios obtidos para acidez, índice de peróxido (IP) e teor de água do óleo com os respectivos coeficientes de variação.	79

LISTA DE SÍMBOLOS

a, b e c = parâmetros de correção que dependem do produto e das condições do ar (adimensionais);

A_p = área projetada dos grãos de mamona (mm^2);

b.s. = teor de água em base seca;

b.u. = teor de água em base úmida.

C = circularidade dos grãos de mamona (%);

D = deformação na ruptura do tegumento (mm);

D = deformação obtida na ruptura do tegumento (mm);

d_1 = comprimento (mm);

d_2 = largura (mm);

d_3 = altura (mm);

Deq = Diâmetro equivalente (adimensional);

E = energia de deformação até a força máxima (J);

\bar{E} = erro médio relativo (%);

Es = esfericidade dos grãos de mamona (%);

F_a = Força na leitura atual obtida pelo programa (N);

$F_{m\acute{a}x}$ = Força máxima na ruptura do tegumento;

F_r = força de ruptura do tegumento (N);

k = constantes de secagem, (h^{-1});

L = dimensão inicial do grão (mm);

L_a = Leitura atual de deslocamento obtida pelo programa (mm);

L_f = dimensão final do grão na ruptura do tegumento (mm);

L_p = Leitura posterior da deslocamento obtida pelo programa (mm);

m = massa do produto (kg);

MR = Razão de umidade do produto (decimal);

n = número de observações experimentais;

P = Porosidade (%);

Q = rigidez ($N \cdot mm^{-1}$),

Rc = porcentagem do pericarpo (%);

Rg = porcentagem do grão (%);

S = área superficial dos grãos de mamona (mm^2);

s = Segundos;

T = temperatura ambiente ($^{\circ}C$);

t = tempo de secagem (minutos);

Uc = teor de água do pericarpo;

Ue = teor de água de equilíbrio;

Uf = teor de água do fruto;

Ug = teor de água do grão;

Ui = teor de água inicial;

UR = umidade relativa;

$U\Theta$ = teor de água do produto no tempo Θ ;

V_{ap} = volume aparente (m^3);

V_{int} = volume intersticial (volume vazio existente entre os grãos) (m^3);

V_r = volume real (m^3);

x = coeficiente do modelo de Page;

\hat{Y} = valor estipulado pelo modelo;

Y = valor observado experimentalmente;

ε = deformação específica (%);

$\acute{\varepsilon}$ = deformação específica limite (%);

ρ_{ap} = peso específico aparente (kg.m^{-3});

ρ_r = peso específico real (kg.m^{-3});

1. INTRODUÇÃO

A mamoneira (*Ricinus communis L.*) é uma oleaginosa de relevante importância econômica e social no Brasil, de cujos grãos se extrai óleo de excelentes propriedades. Foi introduzida no Brasil pelos portugueses durante a colonização com a finalidade de utilização do óleo para lubrificação dos eixos das carroças e iluminação (BIODIESELBR, 2010). O cultivo de mamona pode ser realizado em quase todo o país, excluindo-se alguns ecossistemas específicos como o Pantanal e a Amazônia. Apresenta resistência à seca e facilidade de manejo e por isso, sua produção destaca-se como uma boa opção agrícola principalmente para a geração de renda no âmbito da agricultura familiar (AZEVEDO & BELTRÃO, 2007). Atualmente o Brasil ocupa, no contexto mundial, o terceiro lugar na extração do óleo de mamona, ficando atrás apenas da Índia e da China, primeiro e segundo maiores produtores respectivamente, segundo os indicadores de 2008 da Food and Agricultural Organization. A cultura ocupa uma área de 157.626 ha, contribui com 122.140 toneladas de óleo extraído correspondente a 7,62% da produção mundial (FAOSTAT, 2010). A região norte e nordeste do Brasil representa 88,3% da produção nacional. Toda esta produção se destina exclusivamente à indústria de extração e refino para a obtenção do óleo de mamona e seus derivados. A produtividade brasileira que é de 0,77 t.ha⁻¹, que apesar de acima da média mundial, apresenta-se muito abaixo dos principais países produtores, como a Índia com 1,30 t.ha⁻¹ e China com 0,86 t.ha⁻¹ (FAOSTAT, 2010). Segundo a CONAB (2010), o setor movimentou no ano de 2009 US\$ 54.694.000 sendo US\$ 10.761.000 em exportações e US\$ 43.933.000 em importações, indicando uma dependência externa nesse produto, mas também oportunidade para o desenvolvimento tecnológico da cadeia produtiva. Segundo empresas extratoras de óleo, há uma escassez de grãos no mercado nacional, forçando-as a adquirir grãos provenientes de países do MERCOSUL, principalmente do Paraguai.

Por apresentar heterogeneidade no amadurecimento dos frutos, os racemos de mamona são colhidos quando possuem de 70 a 80 % de frutos visualmente secos, onde são levados para a secagem. A colheita prematura dos racemos, quando apresentam frutos verdes, não é aconselhável, pois o conteúdo e a qualidade do óleo destes frutos poderão ser afetados. A operação de secagem pode ser realizada através de dois métodos, secagem natural ou

artificial. Para ambos os sistemas de secagem, o teor de água ideal dos frutos é de 4 a 10% (b.u.), quando acontece a deiscência das cápsulas, dependendo da cultivar. Assim a diminuição da quantidade de água do material reduz a atividade biológica e as mudanças químicas e físicas que ocorrem durante o processamento ou armazenamento (AZEVEDO & BELTRÃO, 2007).

Os frutos após secos são debulhados através de máquinas apropriadas para esta finalidade ou manualmente com o auxílio de chicotes de borracha e, os grãos são armazenados em sacas ou em silos armazenadores. A finalidade é manter as características físicas e biológicas dos grãos, bem como a qualidade, até a prensagem para extração do óleo.

O processo de extração do óleo gera como subproduto a torta de mamona que é um fertilizante orgânico de larga utilização no cultivo de café, citros entre outros. Recentes estudos mostram o potencial da utilização da torta como componente de ração animal mediante a neutralização de sua toxicidade.

O óleo de mamona é totalmente biodegradável constituído por triglicerídeos e componentes menores, presentes no grão, nos quais predominam os tri-ricinoleatos de glicerina sendo resultante de processos diversos de extração e eventuais processos adicionais de purificação. Por apresentar características importantes como estabilidade oxidativa, alta viscosidade em larga faixa de temperaturas, solidificação em baixas temperaturas e propriedade exclusiva de solubilidade em álcool, o óleo de mamona pode ser utilizado em diversos segmentos industriais tais como os de resinas sintéticas, lubrificantes, adesivos, plastificantes, nylon, tintas entre muitos outros. A resina de mamona, extraída do óleo, surge também como uma boa promessa nas áreas médica, estética e odontológica. Em publicações recentes constatam-se grande utilização em próteses, regeneração óssea, fios para amenização de rugas de expressão facial, entre outras aplicações.

A extração do óleo de mamona pode ser executada através de três métodos: prensagem a frio prensagem, a quente ou através de solventes. Preferencialmente a indústria utiliza a prensagem a quente, por ser um processo que se obtêm os melhores resultados de produtividade e com a qualidade do óleo dentro dos parâmetros comerciais. O processo consiste em efetuar um breve aquecimento dos grãos, com a finalidade de dilatar os bolsões de

óleo contidos nos grãos, seguido de sua prensagem, sendo esta etapa executada com os grãos completos (endosperma e tegumento) (RITTNER, 1996).

O tegumento ao ser prensado libera uma pigmentação indesejável no óleo, além de provocar desgastes nos equipamentos de prensagem decorrente da sua alta abrasividade. Com isso, aumentam-se os custos de produção devido aos onerosos procedimentos de filtragem, manutenção e reposição das peças componentes das prensas. Este tegumento também dificulta a troca de calor durante o aquecimento dos grãos, demandando maior gasto energético. A retirada parcial ou total deste tegumento por processos mecânicos anteriormente ao aquecimento dos grãos poderia reduzir os custos operacionais do sistema e aumentar a vida útil dos equipamentos. Apesar da cultura da mamona vir destacando-se devido à utilização do óleo em diversos ramos industriais e no desenvolvimento de novas tecnologias agrícolas e médicas, as informações sobre esta cultura ainda são insipientes ou inexistentes, principalmente sobre as propriedades mecânicas dos grãos. Vários autores relatam alterações na resistência da casca ou tegumento que envolve certos produtos agrícolas após tratamentos térmicos distintos e com diferentes teores de água, facilitando ou dificultando a decorticação. A exposição dos frutos e grãos de mamona a tratamentos de secagem com diferentes temperaturas poderia gerar alterações substanciais na estrutura do grão que facilitaria sua ruptura e abertura do tegumento, expondo o endosperma inteiro e com ausência de danos mecânicos.

Desta forma, o objetivo deste trabalho foi verificar o efeito da temperatura de secagem nas propriedades físico-mecânicas dos grãos de mamona da cultivar 'Guarany', após os frutos serem secos e debulhados. Para tal determinação foram efetuados ensaios de compressão entre pratos planos, rígidos e paralelos nos grãos de mamona após os tratamentos de secagem obtendo-se a força máxima na ruptura do tegumento, deformação específica, energia na ruptura e dureza. Posteriormente, foram efetuadas avaliações do grau de ruptura do tegumento após os grãos serem submetidos à alta taxa de deformação utilizando-se equipamento projetado e construído para tal finalidade. Foram efetuadas análises na qualidade do óleo de mamona extraído após os tratamentos de secagem e os valores obtidos foram comparados com a classificação comercial. Nos ensaios foram utilizados frutos de mamona da cultivar AL Guarany 2002 de ciclo precoce.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Constituição dos frutos e grãos

Os frutos de mamona são capsulas que contem os grãos, geralmente três por fruto, que podem ser lisos ou com estruturas semelhantes à de espinhos, podendo ser deiscente ou indeiscente. O racemo ou cacho, que é a infrutescência, possui diversos formatos dependendo do ambiente ou da cultivar. Os grãos ou sementes, que são o óvulo fecundado da flor, possuem variação com relação a cor, tamanho, peso, proporção do tegumento, presença ou ausência de carúncula e maior ou menor aderência do tegumento ao endosperma. Estes fatores são característicos de cada cultivar. Em médias, o peso de cada grão varia de 0,1 g à 1,0 g, as dimensões variam de 8 a 30 mm de comprimento, de 6 a 15 mm de largura e de 4 a 10 mm de espessura (AZEVEDO & BELTRÃO, 2007).

O tegumento externo que envolve a semente é uma casca dura e quebradiça, que possuindo ainda uma película interna, fina que envolve o endosperma ou albúmen. Este é uma estrutura branca, compacta e rica em óleo. A representação da casca e do endosperma é variável, dependendo da cultivar e da região de cultivo, em média de 65% de endosperma e 35% de tegumento. SEVERIANO et al. (2009) efetuou estudos da porcentagem de tegumento para a cultivar AL Guarany 2002 e determinou que representa 25,26 % do peso total. Os principais componentes morfológicos do fruto e do grão de mamona são ilustrados na Figura 1.

O teor de óleo no endosperma varia de 35 a 55%, sendo o padrão comercial de 45% (FREIRE, 2001). A composição média dos grãos da mamona é de 12 a 16% de proteína, 35 a 55% de lipídios, 23 a 28% de carboidratos, 3 a 7% de fibras e 2 a 2,2% de cinzas (AZEVEDO & LIMA, 2001).

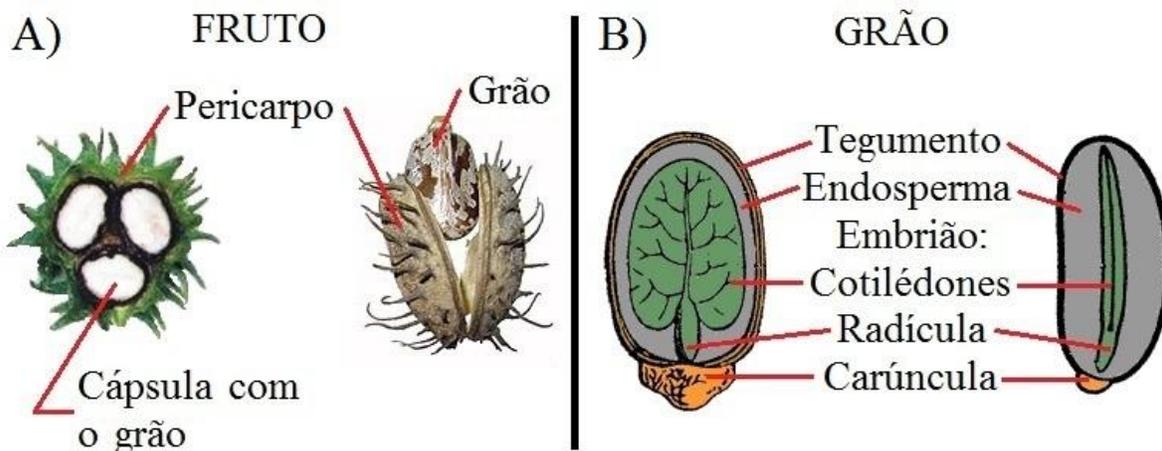


Figura 1. Principais componentes morfológicos do fruto (A) e do grão (B) de mamona (modificado de PLAXTON (2010) e LEUBNER (2007)).

2.2. Secagem e debulha dos frutos de mamona

A secagem de grãos é um processo simultâneo de transferência de energia e massa entre o produto e o ar de secagem, que consiste na retirada do excesso de água intergranular por meio de evaporação, causada geralmente por convecção forçada de ar aquecido, para assegurar a qualidade e estabilidade dos grãos durante o armazenamento (BORÉM, 2008). Dependendo do método e das condições de secagem do produto agrícola podem alterar de forma substancial a qualidade (HALL, 1980). Logo as mudanças volumétricas dos produtos devido à sua desidratação são relatadas como as principais causas das alterações das propriedades físicas mais importantes dos produtos agrícolas (RATTI, 1994; SOKHANSANJ & LANG, 1996). A desidratação influencia em alterações significativas nas propriedades físicas dos frutos de mamona, tais como massa específica, porosidade, massa de mil frutos, área projetada e área superficial, sendo determinantes para o projeto de unidades armazenadoras, equipamentos para debulha e industrialização dos grãos (GONELI et al., 2008).

A composição do produto influencia diretamente no processo. Segundo BROOKER et al. (1992) grãos com elevado teor de óleo adsorvem menor quantidade de água do ambiente do que grãos com alto teor de amido e, além disso, a variedade, a maturidade, o teor de água e as condições físicas e sanitárias, além da maneira pela qual o equilíbrio foi obtido (adsorção

ou dessorção), também são determinantes para o estabelecimento do teor de água de equilíbrio de produtos higroscópicos (CHEN, 2000; FAN et al., 2000).

O procedimento de secagem deve ser executado logo após a colheita dos frutos da mamona e pode ser efetuada por dois métodos, natural e artificial. (AZEVEDO & BELTRÃO, 2007). Na secagem natural, os frutos são expostos ao sol, após o seu desprendimento do cacho, em superfície de alvenaria ou lona, por um período de 4 a 15 dias (HEMERLY, 1981) dependendo das condições de umidade relativa e temperatura. Esta secagem, sem controle, é recomendada para pequenas produções, pois apresentam os inconvenientes do revolvimento que deve ser feito várias vezes ao dia, para uniformização da perda de água e do laborioso recolhimento dos frutos ao final de cada dia, para proteção contra reidratação.

A secagem artificial, por outro lado, é mais rápida, econômica e segura, por não depender das condições climáticas (MACÊDO & WAGNER, 1984), sendo recomendada para áreas de produção superiores a 50 ha. São utilizados secadores mecânicos para a retirada de água dos grãos e a temperatura de secagem ideal deve ser entre 50 a 55°C. (AZEVEDO & BELTRÃO, 2007). OLIVEIRA et al. (2008), após levantar a cinética de secagem dos frutos de mamona, enfatiza a viabilidade da secagem artificial devido a redução do tempo e obtenção de grãos de melhor qualidade. Em ambos os métodos de secagem o teor de água ideal para os frutos de mamona é de 10% (b.u.) quando ocorre a deiscência das cápsulas, dependendo da cultivar. ZUCHI et al. (2009) avaliou diferentes métodos de secagem utilizando diferentes temperaturas identificando que a colheita antecipada dos frutos com 70% secos e posteriormente secagem com temperaturas superiores a 40°C reduz acentuadamente a qualidade fisiológica das sementes, demonstrando a influência da temperatura de secagem.

Após a secagem os frutos são debulhados para retirada do pericarpo e abertura das capsulas, liberando os grãos. Este procedimento é mais utilizado para cultivares semideiscentes ou frutos que retêm o pericarpo, denominados de “marinheiros” ou “dente-de-alho” (AZEVEDO & BELTRÃO, 2007). Pode ser executado manualmente, com auxílio de varas ou chicotes de borracha, ou utilizando-se debulhadores mecânicos. Buscando a eficiência da debulha dos frutos de mamona, diversos autores são citados por MIALHE et al. (1992) apud AZEVEDO & BELTRÃO (2007) tais como CLAY (1942) e ARNOLD & SHARP (1944) no qual promoveram o aperfeiçoamento e melhorias nos equipamentos

utilizados. O autor desenvolveu um protótipo debulhador de mamona dotado de um mecanismo que contém dois discos metálicos superpostos e axialmente coincidente, sendo um fixo e outro móvel. ANSELMO et al. (2008) desenvolveu e avaliou um debulhador de frutos de mamona acionado manualmente onde seu princípio utiliza um cilindro rotor que promove fricção dos frutos com um côncavo, que possui maior abertura na parte superior ocorrendo um estreitamento na parte inferior junto ao cilindro, forçando-os a cisalharem e conseqüentemente ocorrendo a debulha. FRANÇA et al. (2010) desenvolveu equipamento de debulha acionado manualmente por meio de bicicleta, destinada a pequenos produtores, que utiliza dois discos de ferro horizontais revestidos de borracha que promove o descascamento através do atrito entre os discos e os frutos, demonstrando uma eficiência de 89,0%. PATIL (2010) desenvolveu equipamento debulhador e separador de frutos de mamona utilizando o princípio de impacto para abertura das capsulas com eficiência de 98,5%, debulhando frutos com teor de água em torno de 6,0 % (b.u.). Estes equipamentos são atualmente encontrados comercialmente e de fácil manejo e acesso a produtores de diversos países.

2.3. Extração de óleo de mamona

A indústria de extração de óleo recebe os grãos de mamona normalmente secos com teor de água médio de 6,0% (b.s) e os submete a pré-limpeza para retirada de impurezas tais como pedras, gravetos, folhas, etc, efetuada por peneiras classificadoras e por peneiras gravitacionais ou mesas densimétricas. Este procedimento protege os equipamentos da ação erosiva de areia e pedras, e elimina contaminantes que podem comprometer a qualidade do produto (DORSA, 2004).

Existem vários métodos de extração de óleos vegetais, que misturam processos mecânicos e químicos. O óleo de mamona pode ser obtido da semente de várias maneiras tais como prensagem hidráulica a frio, prensagem direta a quente, pré-prensagem direta a quente, pré-prensagem e extração por solvente e extração direta por solvente (RITTNER, 1996). A extração do óleo é realizada a partir do esmagamento do grão íntegro, ou seja, tegumento e endosperma.

O método mais eficiente e utilizado é o de pressão contínua em extrusoras tipo expeller, realizada após o aquecimento dos grãos, composta por rosca helicoidal que força o

produto a passar por um orifício estreito, formando uma zona de alta pressão, que possibilita a expulsão do óleo do interior das células da grão (AZEVEDO & BELTRÃO, 2007). O aquecimento, no entanto aumenta indesejavelmente a acidez e a turbidez do óleo (RITTNER, 1996). O óleo bruto, após a extração, para atingir as características requeridas pelas especificações dos diversos tipos comerciais, é submetido a processamentos adicionais como degomagem, neutralização, branqueamento e desodorização (DORSA, 2007). A melhor qualidade do óleo é obtida pelo esmagamento a frio, porém com baixo rendimento. Geralmente, parte da fração de óleo retida após esmagamento é extraída por solvente resultando em óleo de baixa qualidade (FREIRE, 2001). Este último método, possibilita a obtenção de tortas de melhor qualidade proteica, devido ao menor tempo de exposição à temperaturas elevada e apresenta teor de óleo menor ou igual a 1% (FREIRE, 2006). Na Figura 2 é apresentado um fluxograma do processo de extração do óleo da mamona.

O processo de extração gera como subproduto a torta de mamona que é um fertilizante orgânico de larga utilização no cultivo de café, citros entre outros (CAMPOS et al., 1963; SANTOS et al., 2008; LIMA et al., 2009). Recentes estudos mostram o potencial da utilização da torta como componente de ração animal mediante a neutralização de sua toxicidade (MELO, 2008a) e também utilizado para a produção de etanol (MELO, 2008b).

Durante a extração do óleo, a alta abrasividade do tegumento, reduz a vida útil dos equipamentos de extrusão e, simultaneamente, ocorre uma migração de pigmentos indesejáveis para o óleo. Esta pigmentação é retirada atualmente por meio de centrifugação e filtragens, sendo processos onerosos e lentos. Esses fatos observados atualmente na indústria brasileira de extração foram relatados por DUNNING (1954) que também ressalta a diferença de comportamento entre variedades.

RITTNER (1996) cita algumas vantagens da extração do óleo após a separação prévia do tegumento dos grãos de mamona ou da parte apreciável do mesmo tais como a obtenção de óleos com coloração mais clara, devido à retirada do tegumento que contem pigmentação; elimina-se a maioria dos problemas de abrasão e desgaste da prensa; a capacidade das prensas e dos cozinhadores é substancialmente aumentada; maior recuperação de óleo e, torta com maior teor de proteína e menor teor de fibras.

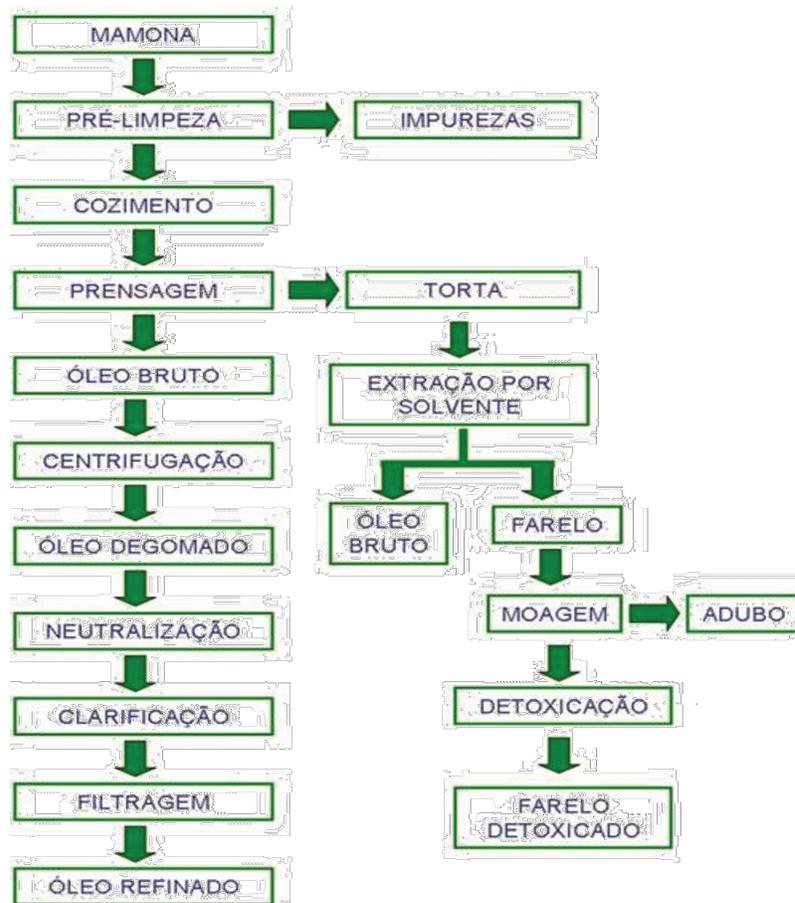


Figura 2. Fluxograma do processo de extração do óleo de mamona (FREIRE, 2006).

Foram identificados equipamentos para decorticação de grãos de mamona fabricados na China, mas com custos proibitivos para efetuar a importação de tal equipamento (QIAOPAI, 2010). No Brasil, foi realizado contato com a empresa ECIRTEC Equipamentos e Assessorios Indústrias Ltda. e esta relatou que a decorticação dos grãos de mamona foi efetuada em pesquisas para a produção de óleo medicinais utilizado na fabricação de próteses e também em projetos específicos de biodiesel. O fabricante, com mais de 22 anos de experiência no ramo, comentou que os mesmos mecanismos utilizados para a debulha dos frutos de mamona, conforme descrito por vários autores no item 2.3, podem ser utilizados para a decorticação e retirada do tegumento nos grãos de mamona, havendo somente a necessidade da regulagem dos atuadores ou rotores (MANZANO, 2010) e dependentes das propriedades físicas e mecânicas do tegumento, específicas para cada cultivar da cultura da mamona.

Ressalte-se, no entanto, que o assunto não é novo. Por razões desconhecidas, a experiência de decorticação de grão de mamona, isto é a remoção do tegumento, antes da

extração do óleo (DUNNING, 1954) deixou de ser utilizada nos Estados Unidos. Segundo RITTNER (1996) o processamento com grão decorticados (ausência de tegumento) não teve muita aceitação por parte dos processadores. Algumas dificuldades encontradas são citadas tais como o arraste de quantidades apreciáveis de partículas do endosperma no óleo, a necessidade de equipamentos e etapas adicionais de processamento, aumento da acidez do óleo obtido e a necessidade de um cozimento dos grãos com maior cautela.

Os grãos de mamona são similares a outros grãos oleaginosos, como o girassol, sendo seu endosperma revestido por um tegumento rígido. Várias empresas (ECIRTEC, 2010; QIAOPAI, 2010; ABOISSA, 2010; AGICO GROUP, 2010; GOYUM SCREW PRESS, 2010) e autores (GUPTA & DAS, 1999; NAG, 2010) foram identificados na fabricação e pesquisa de equipamentos para decorticação de grãos de girassol, sendo que o processo, após estudos e levantamento das propriedades físico-mecânicas, poderia ser adaptado ou recriado na decorticação dos grãos de mamona.

2.4. Classificação do óleo de mamona

O óleo de mamona se difere completamente dos óleos vegetais conhecidos pelo fato de possuir um elevado teor de um único ácido graxo, o ácido ricinoléico, um dos poucos ácidos graxos hidroxilados existentes em abundância na natureza (RITTNER, 1996). A composição química do óleo é de 89,5% ácido ricinoléico; 4,2% ácido linoleico; 3,0% de ácido oleico; 1,0% de ácido esteárico; 1,0% de ácido palmítico; 0,7% de ácido diidroxisteárico; 0,3% ácido licosanóico e 0,3% ácido linolênico (AZEVEDO & BELTRÃO, 2007). Conforme as características do grão e condições de obtenção do óleo pode-se apresentar heterogeneidade no que diz respeito ao seu teor de ácidos graxos, fosfatídeos (goma) e cor (RITTNER, 1996). O mesmo autor destaca que a classificação do óleo comercialmente é bem definida dependendo de sua aplicabilidade. Os tipos conhecidos são: óleo de mamona tipo 1; óleo de mamona tipo 3; óleo de mamona refinado; óleo de mamona desodorizado e óleo de mamona Extra-Palle ou medicinal. Para atingir estas características requeridas pelas especificações dos tipos comerciais, o óleo bruto, obtido dos grãos, é muitas vezes submetido a processamentos adicionais.

A empresa ABOISSA Óleos Vegetais industrializa o óleo de mamona, classificando-o óleo comercial como: *ÓLEO DE MAMONA TIPO 1* dever ter aspecto amarelo ligeiramente turvo, viscosidade a 25°C de 630 a 890 cP, Densidade a 25°C de 0,955-0,965 g.cm⁻³; Cor Lovbond Max 40A e 4V; Acidez como ácido oleico máx. de 1,0%; Umidade máx. 3750 ppm, índice de iodo de 81 a 88 cgI₂.g⁻¹; Índice de saponificação mín. 175 mg KOH.g⁻¹, Índice de Hidroxila mín. 155 mg KOH. g⁻¹ (ABOISSA, 2010). *ÓLEO DE MAMONA TIPO 3* dever ter viscosidade a 25°C de 5,25 a 7,55, Densidade a 15,5°C de 0,95-0,97 g.cm⁻³; Cor Lovbond 35A e 3-4V; Acidez como ácido oleico máx. de 2,5%; Impureza e Umidade 0,5 %, índice de refração a 25°C de 1,475 e 1,482 (ABOISSA, 2010). *ÓLEO DE MAMONA EXTRA-PALLE* dever ter aspecto líquido amarelo claro, viscosidade a 25°C de 630 a 890 cP, Densidade a 25°C de 0,955-0,965 g.cm⁻³; Cor Lovbond Max 20A e 2V; Acidez como ácido oleico máx. de 1,0%; Umidade máx. 3750 ppm, índice de iodo de 81 a 88 cgI₂.g⁻¹; Índice de saponificação mín. 175 mg KOH.g⁻¹, Índice de Hidroxila mín. 155 mg KOH. g⁻¹ (ABOISSA, 2010). Segundo a ANVISA (1999) o índice de peróxido para óleos e gorduras refinados, exceto óleo de oliva refinado, deve ser de no máximo 10 meq.kg^{-1 amostra}.

2.5. Propriedades físico-mecânicas dos grãos

Em seu trabalho clássico sobre propriedades físicas de produtos agrícolas, MOHSENIN (1986) enfatiza a importância do conhecimento das características do produto a ser armazenado como fonte essencial de parâmetros para a engenharia no que tange o projeto de máquinas, estruturas de armazenagem, processos e controles. O valor destas informações não se restringe a sua utilização por engenheiros, mas é útil para todos os agentes da cadeia produtiva permitindo maior compreensão do comportamento do produto, facilitando a escolha e adequação de métodos e procedimentos que permitam manutenção da integridade do produto com segurança e economia (PELEG, 1977; KNOWLTON et al., 1994; OLAOYE, 2000).

Baseando-se nessa orientação várias investigações foram realizadas visando a decorticação de produtos agrícolas considerando as propriedades mecânicas dos mesmos (LIANG, 1977; SEGERLING & DAL FABRO, 1978; LIANG, 1980; TANG et al., 1982; RODRIGUES, 1996; FERRAZ et al., 1997; JAIN & KUMAR, 1997; BRAGA et al., 1999; ARAÚJO, 2005; ARAÚJO & FERRAZ, 2006; FERRAZ et al., 2007; ARAÚJO et al., 2008;

ARAÚJO & FERRAZ, 2008). MASE (1970) define um material viscoelástico como material que incorpora uma mistura de ambas as características elásticas (Leis de Hooke) e viscosas (Fluidos Newtonianos), sendo estes materiais sensíveis à temperatura.

Segundo ARAÚJO (2005) a decorticação de produtos agrícolas e liberação de seu conteúdo, endosperma ou amêndoa, pode ser efetuada com a aplicação de altas taxas de deformação, na qual se considera a reação viscoelástica do produto, aumentando-se a tensão com pequenas deformações específicas, e conseqüentemente, causando a ruptura da casca com reduzidos danos ao seu conteúdo. Quanto maior a deformação imposta maior poderá ser o dano ocorrido na amêndoa ou endosperma. Limitar a deformação no rompimento da casca pode minimizar ou anular os danos ao conteúdo. Este valor de deformação limitada na direção desejada, associada à dimensão original é denominado *Deformação Específica Limite* (ϵ), ilustrada na Figura 3. Este conceito é particularmente relevante para o presente trabalho. O mesmo autor fez uso de dispositivo, especialmente projetado e construído na FEAGRI, para determinação da deformação específica limite, parâmetro tecnológico fundamental na decorticação baseada na deformação. Como o referido dispositivo foi operado manualmente, os procedimentos de ajuste de altura da plataforma são demorados, dificultando a realização de grande número de repetições, exigido nos ensaios com grande variabilidade, particularmente para produtos agrícolas.

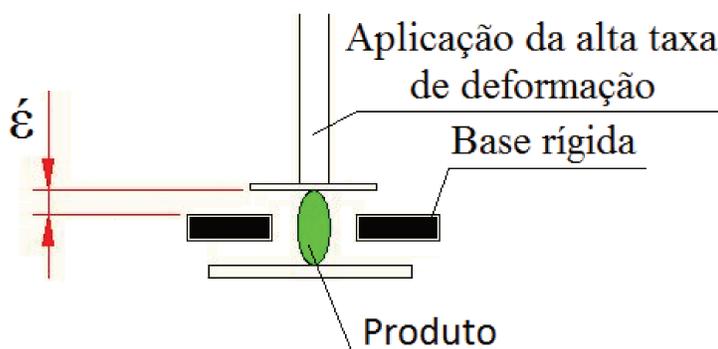


Figura 3. Ilustração da aplicação de alta taxa de deformação com deformação específica limite (ϵ) em produto agrícola.

Diversos fatores afetam as propriedades mecânicas dos produtos agrícolas, destacando-se entre eles a cinética de secagem, teor de água, direção e região dos grãos na qual a força é aplicada (MOHSENIN, 1986).

MENSAH et al. (1984) analisou as propriedades mecânicas dos grãos de soja, dentre elas a tensão máxima de tração e o módulo de relaxamento, durante a secagem com diferentes temperaturas, na ruptura do tegumento em duas posições dos grãos. O autor conclui que a resistência a tração e o módulo de relaxamento do tegumento reduz-se com o aumento da temperatura de secagem e o teor de umidade do grão, podendo o tegumento da soja ser tratado como um material hidro-reológico simples. A força do tegumento da soja é 50% superior quando carregada perpendicularmente ao hilo do grão. BARGALE et al. (1995) estudou as propriedades mecânicas dos grãos de trigo e canola com diferentes teores de água, onde os resultados indicam que o módulo de elasticidade e força máxima de compressão diminui linearmente com o aumento no teor de água nos grãos, variando de 5,4 a 34,5% (b.s). HENRY & ZHANG (2000) estudou a resistência de nove variedades de soja de duas épocas de colheita, ensaiadas com duas taxas de deformação, três orientações distintas dos grãos e quatro teores de água diferentes, verificando que, o aumento do teor de água resultou na diminuição da força de ruptura, taxas de deformação superiores resultaram em maior força de ruptura e menor deformação específica. RUFFATO et al. (2001) determinou o módulo de elasticidade dos grãos de milho a diferentes teores de água, submetidos à impactos com velocidades distintas, concluindo que o teor de água e a velocidade de impacto influenciam nos valores do módulo de elasticidade e que estes valores são inversos ao teor de água dos grãos, ou seja, quanto maior a umidade menor é o módulo de elasticidade. O mesmo autor relata que grãos com altos teores de água, as características viscoelásticas tornam-se predominantes. RIBEIRO et al. (2007) realizou ensaios de compressão entre placas planas, rígidas e paralelas em grãos de soja a diferentes teores de água e verificou que a força máxima de compressão e o módulo de deformidade diminuem com o aumento do teor de água. RESENDE et al. (2007) verificou a influência do teor de água nos valores de força máxima de compressão para deformações fixas e determinou o módulo proporcional de deformidade dos grãos de feijão submetidos à compressão em três diferentes direções. O autor concluiu que a força de compressão necessária para deformar os grãos de feijão diminuiu com o aumento do teor de água e, inversamente, o módulo de deformidade aumenta-se.

Apesar da cultura da mamona ser um produto que vem merecendo maior atenção por parte dos pesquisadores e do governo brasileiro, os trabalhos até então publicados não visam a pós-colheita e beneficiamento dos grãos e suas interações com a qualidade do óleo.

OLAOYE (2000) efetuou o levantamento de algumas propriedades físicas dos grãos de mamona importantes para o projeto de equipamentos de processamento tais como forma, tamanho, área superficial, ângulo de repouso, coeficiente de atrito estática e comportamento dos grãos sob compressão. GONELI (2008) realizou ensaios de compressão uniaxial com grãos de mamona na posição de repouso, com diferentes teores de água e relata que com a redução do teor de água dos grãos elevou-se a força de ruptura do grão e, inversamente, reduziu-se a deformação específica. No entanto, o autor relatou que a qualidade do óleo apresenta dependência direta com o tempo e temperatura de armazenamento.

As únicas referências encontradas associando aumento de resistência do tegumento em função do tempo e com temperatura de secagem foram de DUNNING (1954), ZUCHI, et al. (2007) e ZUCHI et al. (2009). Estes dois últimos consideraram o efeito sobre a germinação de sementes e concluiu que o uso da secagem artificial à 40°C propicia a obtenção de sementes de mamona de alta qualidade fisiológica, porém temperaturas superiores são danosas. OLIVEIRA et al. (2007) avaliou efeitos da temperatura no ar de secagem estacionária na qualidade do óleo de mamona, visando à utilização como biocombustível e concluiu que frutos secos a temperaturas acima de 40°C provocam a redução no rendimento da extração de óleo e temperaturas acima de 80°C provocam redução na estabilidade química do óleo, após extração, para uso com combustível. ELIAS (2006) coordena grupo de pesquisa onde estuda o efeito da temperatura de secagem de oleaginosas (mamona e soja) visando a qualidade de armazenamento e do óleo. No entanto os esforços não foram dirigidos para a decorticação dos grãos e retirada do tegumento.

Conclui-se, portanto, que mesmo com estudos recentes sobre propriedades físicas de grãos de mamona, estes não foram direcionados para a decorticação e retirada do tegumento. São incipientes e inexistentes também trabalhos que relacionam a influência da temperatura de secagem nas propriedades mecânicas de produtos agrícolas, inclusive para a cultura da mamona.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Material

Os frutos de mamona foram adquiridos no Polo Centro Norte da Agência Paulista de Tecnologia dos Agronegócios (APTA), localizada no município de Pindorama – SP. Foram colhidos frutos de mamona da cultivar AL Guarany 2002 de ciclo precoce, com cachos apresentando visualmente 70 a 85% de frutos secos, conforme ilustrado na Figura 4.



Figura 4. Racemo de mamona com 70 a 80 % frutos de mamona visualmente secos.



Figura 5. Seleção efetuada com os frutos de mamona visualmente Secos (A) e Verdes (B)

Os frutos foram separados dos cachos manualmente e transportados para Faculdade de Engenharia Agrícola da UNICAMP. Após a chegada, foi efetuada uma seleção manual separando os frutos visualmente verdes e os secos, conforme ilustra Figura 5, e armazenados por 24 horas em câmara fria a $4^{\circ}\text{C} \pm 0,4^{\circ}\text{C}$ e umidade relativa média de 75% (modelo MA-403, MARCONI Equip. Lab.[®]) em recipientes abertos para que os frutos entrassem em equilíbrio com a temperatura e umidade da câmara. Foram utilizados apenas os frutos

visualmente secos, os frutos visualmente verdes foram descartados. Após as 24 horas, os frutos foram colocados em sacos plásticos com espessura de 0,05 μm e selados (Figura 6), para que mantivessem o mesmo teor de água, e foram armazenados novamente em câmara fria a $4^{\circ}\text{C} \pm 0,4^{\circ}\text{C}$ (modelo MA-403, MARCONI Equip. Lab.®) apresentada na Figura 7.



Figura 6. Armazenamento dos frutos de mamona em sacos plásticos e selados.



Figura 7. Câmara fria de armazenamento dos frutos de mamona a $4^{\circ}\text{C} \pm 0,4^{\circ}\text{C}$.

O teor de água inicial dos frutos visualmente secos foi determinado após as 24 horas na câmara fria pelo método gravimétrico utilizando estufa de ar forçado (modelo 320-SE FANEM®) a temperatura de $105 \pm 1^{\circ}\text{C}$, até peso constante, com cinco repetições (BRASIL, 1992). Foi determinado também o teor de água inicial do pericarpo e do grão. Este teor de água inicial foi considerado para o cálculo da perda de água nos tratamentos de secagem posteriores.

3.2. Caracterização física do material

A determinação das propriedades físicas dos grãos de mamona (teor de água de equilíbrio, peso específico e forma e tamanho) foi realizada no Laboratório de Pós-colheita da Faculdade de Engenharia Agrícola da UNICAMP.

3.2.1. Teor de água de equilíbrio

O teor de água de equilíbrio dos grãos de mamona foi determinado através do método estático utilizando soluções salinas dentro de recipientes herméticos (dessecadores), condicionando-os a um ambiente de umidade relativa controlada no qual promoveu a dessorção e adsorção de água pelos grãos.

Para cada amostra, colocou-se em média 2,53 g \pm 0,31 g em cadinhos de alumínio, com auxílio de balança analítica com resolução de 0,0001 g (modelo HR-200, AND®), e estes foram colocados no interior de dessecadores de vidro com diâmetro de 250 mm, que dispunham de uma placa de cerâmica interna no qual sustentava os cadinhos contendo os grãos de mamona. A umidade relativa no interior dos dessecadores foi estabelecida conforme concentração dos sais, segundo descrito por ROSSI & ROA (1980).

Os cadinhos foram pesados semanalmente, até que não ocorresse variação no peso, por um período de 35 dias. Foram efetuadas 3 repetições para cada solução de sais (ROSSI & ROA, 1980). A umidade relativa e a temperatura do ambiente que permaneceram os dessecadores foram monitoradas por termohigrógrafo (marca CMR do Brasil - RJ).

Após os 35 dias, os cadinhos foram retirados dos dessecadores e determinado o teor de água final dos grãos pelo método gravimétrico utilizando estufa de ar forçado (modelo 320-SE FANEM®) a temperatura de 105 \pm 1°C. Com o teor de água final dos grãos, foi possível obter a curva de umidade relativa do ar pelo teor de água de equilíbrio dos grãos.

Buscando o melhor ajuste matemático para descrever a curva de teor de água de equilíbrio dos grãos de mamona da cultivar AL Guarany 2002, os dados foram ajustados conforme os modelos de Hederson modificado (Equação 1) e Halsey modificado (Equação 2).

$$Ue = \left[\frac{\ln(1-UR)}{-a(T+b)} \right]^{\frac{1}{c}} \quad \text{(Equação 1)}$$

$$Ue = \left[\frac{\exp(a+bT)}{-\ln(UR)} \right]^{\frac{1}{c}} \quad \text{(Equação 2)}$$

Onde,

Ue = teor de água de equilíbrio dos grãos (% bs);

T = temperatura ambiente (°C);

UR = umidade relativa (decimal);

a, b e c = parâmetros de correção que dependem do produto e das condições do ar (adimensionais).

Realizou-se uma análise de regressão não linear pelo método de Gauss-Newton para ajuste dos modelos utilizando o programa computacional Statistica 8.0 da Statsoft[®], onde foram determinados os parâmetros de correção. Os modelos foram avaliados pelo coeficiente de determinação (R²) e erro médio relativo (\bar{E}) calculado pela Equação 3.

$$\bar{E} = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{Y - \hat{Y}}{Y} \right) \quad (\text{Equação 3})$$

Onde,

\bar{E} = erro médio relativo (%);

n = número de observações experimentais;

Y = valor observado experimentalmente;

\hat{Y} = valor estipulado pelo modelo.

3.2.2. Peso específico

A massa de grãos é uma mistura de grãos e espaços vazios entre os grãos. A proporção de espaços vazios depende do tamanho e da forma dos grãos bem como das características de sua superfície (BORÉM, 2008).

O peso específico aparente é a massa de um determinado volume de grãos incluindo os espaços vazios, e é expressa em kg.hectolitro⁻¹, comumente denominado peso hectolitro (PH), podendo também ser expressa em t.m⁻³ ou kg.m⁻³. Matematicamente pode ser definida conforme Equação 4.

$$\rho_{ap} = \frac{m}{V_{ap}} = \frac{m}{V_r + V_{int}} \quad (\text{Equação 4})$$

Onde,

ρ_{ap} = Peso específico aparente (kg.m^{-3});

m = massa do produto (kg);

V_{ap} = volume aparente (m^3);

V_r = volume real (m^3);

V_{int} = volume intersticial (volume vazio existente entre os grãos) (m^3).

Esta propriedade foi determinada através do aparelho de peso hectolitro (modelo PH 3000, GEHAKA[®]), apresentado na Figura 18. No ensaio, as sementes foram introduzidas num recipiente de volume conhecido com o auxílio de um funil. Um dispositivo móvel instalado na haste que sustenta o funil foi utilizado para remover o excedente contido no recipiente. O recipiente com as sementes foi pesado, considerando apenas o peso do produto. Os valores foram apresentados diretamente no visor da balança já convertidos em $\text{kg.hectolitro}^{-3}$. Foram efetuadas 5 repetições e os valores tratados estatisticamente.

O peso específico real é dado pela razão da massa pelo volume dos grãos desconsiderando os espaços intergranulares. Esta propriedade foi determinada através de uma proveta graduada de 250 ml, preenchida com 150 ml de Hexano. Foram pesados $50 \text{ g} \pm 1 \text{ g}$ de grãos de mamona e adicionados na proveta, verificando o volume deslocado. O volume deslocado de Hexano corresponde ao volume real dos grãos. Foram efetuados 5 repetições e os valores tratados estatisticamente. A massa específica real foi calculada pela Equação 5.

$$\rho_r = \frac{m}{V_r} \quad (\text{Equação 5})$$

Onde,

ρ_r = peso específico real (kg.m^{-3});

m = massa do produto (kg);

V_r = volume real (m^3).

A porosidade (P) é a relação entre o Volume Intersticial (V_{int}) e o Volume Aparente (V_{ap}), expresso em %. É determinada pela porcentagem de espaços vazios existentes num determinado recipiente ocupado pelo produto. Sua determinação é importante nos projetos de sistemas de secagem e aeração de produtos, pois oferece parâmetros para análise da resistência

ao fluxo de ar do produto e também nos processos de transferência de calor e de massa. Essas propriedades variam de acordo com o local de colheita e fertilidade do solo, práticas culturais e de colheita, teor de água, teor de impurezas, estágio de maturação, etc. A porosidade foi determinada pela Equação 6.

$$P = 1 - \left(\frac{\rho_{ap}}{\rho_r}\right).100 \quad (\text{Equação 6})$$

Onde,

P = Porosidade (%);

ρ_{ap} = peso específico aparente (kg.m^{-3});

ρ_r = peso específico real (kg.m^{-3}).

3.2.3. Forma e tamanho

Os produtos de origem vegetal apresentam uma configuração irregular. A descrição da forma e tamanho desses produtos é fundamental para o dimensionamento do tamanho e da forma dos furos das peneiras usadas na classificação de grãos e sementes, e no projeto e dimensionamento de máquinas para beneficiamento e limpeza (BORÉM, 2008).

As dimensões características do grão de mamona, comprimento (d_1), largura (d_2) e altura (d_3), ilustradas na Figura 8, foram determinadas com o auxílio de um paquímetro digital com precisão de 0,01 mm e efetuadas 50 repetições para cada dimensão e os valores tratados estatisticamente.

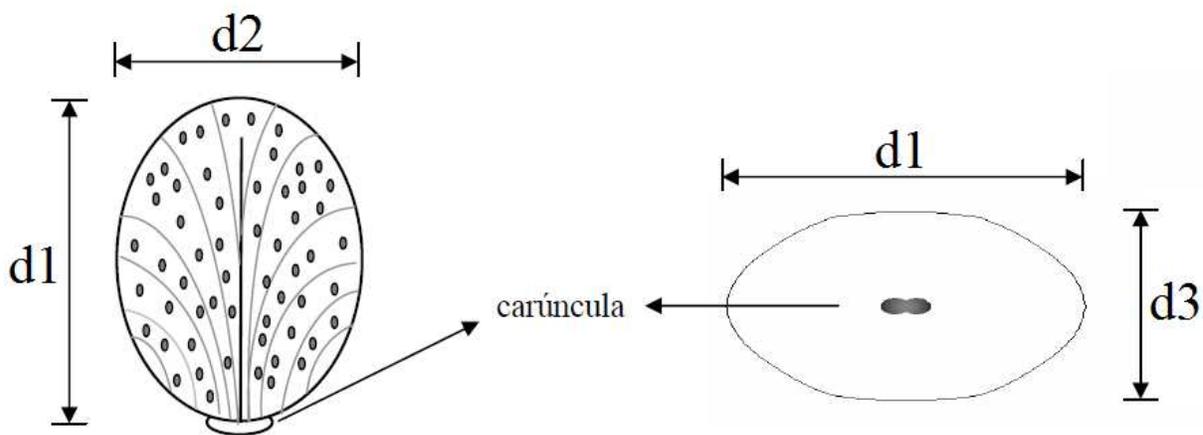


Figura 8. Desenho esquemático de um grão de mamona com as dimensões características, considerando como um esferoide tri axial (adaptado de GONELI, 2008).

A partir das dimensões características pode-se determinar o diâmetro equivalente, conforme Equação 7 proposta por MOHSENIN (1986).

$$Deq = (d1 \cdot d2 \cdot d3)^{\frac{1}{3}} \quad \text{(Equação 7)}$$

Onde,

Deq = Diâmetro equivalente (adimensional);

$d1$ = comprimento (mm);

$d2$ = largura (mm);

$d3$ = altura (mm).

A esfericidade (Es) dos grãos de mamona, em porcentagem (%), foi calculada utilizando-se a Equação 8 proposta por MOHSENIN (1986).

$$Es = \frac{Deq}{d1} \cdot 100 \quad \text{(Equação 8)}$$

A circularidade (C) dos grãos de mamona, em porcentagem (%), foi calculada utilizando-se a Equação 9 proposta por MOHSENIN (1986).

$$C = \frac{d2}{d1} \cdot 100 \quad \text{(Equação 9)}$$

A área projetada (Ap) dos grãos de mamona, em mm^2 , foi calculada utilizando-se a Equação 10 proposta por MOHSENIN (1986).

$$Ap = \frac{\pi \cdot d1 \cdot d2}{4} \quad \text{(Equação 10)}$$

A área superficial (S) dos grãos de mamona, em mm^2 , foi calculada pela analogia a uma esfera de diâmetro equivalente (Deq) utilizando-se a Equação 11 proposta por TUDE-AKINNTUNDE & AKINTUNDE (2004).

$$S = \pi \cdot Deq \quad \text{(Equação 11)}$$

3.3. Tratamentos de secagem

Os tratamentos de secagem foram realizados no laboratório de Secagem da Faculdade de Engenharia Agrícola da UNICAMP utilizando um Secador Convectivo conjugado de fluxo perpendicular e/ou paralelo ao leito de secagem, patente PI 0003447-9 (UNICAMP, 2008), que consiste de uma câmara de secagem com vinte gavetas dispostas em duas colunas, sistemas de ventilação, sistema de aquecimento utilizando resistências elétricas e sistema de controle de fluxo de ar e controle de temperatura (Figura 9). A velocidade média do ar foi de $0,9 \text{ m.s}^{-1}$ e a variação da temperatura de secagem foi de $\pm 4 \text{ }^\circ\text{C}$.



Figura 9. Secador Convectivo conjugado de fluxo perpendicular e/ou paralelo ao leito de secagem utilizado nos tratamentos de secagem.

Os frutos de mamona foram colocados em uma bandeja na quantidade suficiente para formar uma camada uniforme, com peso médio de $636,39\text{g} \pm 57,41\text{g}$, conforme Figura 10. As temperaturas utilizadas nos tratamentos de secagem foram de 40, 60, 80 e $100^\circ\text{C} (\pm 4 \text{ }^\circ\text{C})$ com 4 repetições de cada tratamento. O controle da perda de água foi efetuado pelo peso da

bandeja, utilizando balança analítica com resolução de 0,01g (modelo SL-3000, SCIENTECH[®]), em intervalos de 15 minutos durante a secagem. Foi efetuado o revolvimento dos frutos na bandeja a cada 30 minutos. A secagem foi interrompida quando o teor de água calculado dos grãos atingisse de 5 a 7% (b.u.), indicada pelo peso final da bandeja.

Após secos, os frutos de mamona foram debulhados manualmente através de atrito com peneira metálica com a finalidade de abertura das capsulas, conforme Figura 11. Os frutos remanescentes e de dificuldade de abertura pela fricção, foram abertas com o auxílio de alicate.

Foi efetuada uma secagem no terreiro em piso de concreto, convencionalmente empregada por produtores, utilizada como testemunha para comparar os resultados obtidos nos tratamentos de secagem. Ao final do primeiro dia, os frutos foram amontoados e cobertos para evitar reidratação dos frutos devido as baixa umidade relativa do período noturno e na manhã do dia seguinte, foram reabertos e espalhados. Foram efetuados dois revolvimentos para melhorar a eficiência da secagem e homogeneização do teor de água nos frutos. O acompanhamento do teor de água dos grãos foi efetuado através de 3 amostras ao longo da secagem determinadas pelo método gravimétrico utilizando estufa de ar forçado (modelo 320-SE, FANEM[®]) a temperatura de $130 \pm 1^{\circ}\text{C}$ por 2 horas, até peso constante, com três repetições. O monitoramento da umidade relativa e temperatura ambiente foi efetuada por termohidrógrafo (modelo TH 508, CIBRAPAM[®]) colocado próximo ao terreiro de secagem.



Figura 10. Deposição de frutos de mamona na bandeja para secagem em camada fina e uniforme.



Figura 11. Debulha manual dos frutos de mamona após os tratamentos de secagem.

O teor de água final dos grãos de mamona foi calculado conforme metodologia ASAE Standard S410.1 (ASAE, 2002) onde considera que o teor de água do fruto é em função do teor de água de cada constituinte, pericarpo e grãos, considerando suas representações em peso de matéria seca. A equação 12 fornece o teor de água dos frutos.

$$U_f = \frac{U_g(R_g) + U_c(R_c)}{100} \quad (\text{Equação 12})$$

Onde,

U_f = teor de água do fruto (b.s.);

U_g = teor de água do grão (b.s.);

R_g = porcentagem do grão (%) – Equação 13;

U_c = teor de água do pericarpo (b.s.);

R_c = porcentagem do pericarpo (%) – Equação 14.

$$R_g = \frac{\text{Peso Inicial do grão}(g)}{\text{Peso Inicial do fruto}(g)} \cdot 100 \quad (\text{Equação 13})$$

$$R_c = \frac{\text{Peso Inicial da pericarpo}(g)}{\text{Peso Inicial do fruto}(g)} \cdot 100 \quad (\text{Equação 14})$$

O teor de água final dos grãos após cada tratamento de secagem foi determinada pelo método gravimétrico utilizando estufa de ar forçado (modelo 320-SE, FANEM[®]) a temperatura de $105 \pm 1^\circ\text{C}$, até peso constante, com cinco repetições (BRASIL, 1992).

Com a obtenção do teor de água final dos grãos de mamona, foi calculada a Razão de Umidade (MR), conforme Equação 15, e a cinética de secagem representada através do gráfico de tempo de secagem por Razão de Umidade para cada temperatura utilizada nos tratamentos de secagem (ROSSI E ROA, 1980).

$$MR = \frac{U\theta - Ue}{Ui - Ue} \quad (\text{Equação 15})$$

Onde,

MR = razão de umidade do produto (decimal);

$U\theta$ = teor de água do produto no tempo θ (decimal, b.s.),

U_i = teor de água inicial (decimal, b.s.),

U_e = teor de água de equilíbrio (decimal, b.s.).

A umidade relativa e a temperatura do ambiente durante os tratamentos de secagem foram monitoradas por termohigrógrafo (modelo TH 508, CIBRAPAM[®]) que posteriormente, foram utilizados para o cálculo do teor de água de equilíbrio dos grãos de mamona em cada condição de secagem após serem ajustados com o auxílio da carta psicrométrica (BORÉM, 2008).

Para ajustar matematicamente os dados experimentais encontrados durante os tratamentos de secagem foi utilizado o modelo de Page, conforme Equação 16. Realizou-se uma análise de regressão não linear pelo método de Gauss-Newton para ajuste do modelo utilizando o programa Statistica 8.0 da Statsoft[®], onde foram determinados os parâmetros de correção k e x .

$$MR = e^{(-k.t^x)} \quad (\text{Equação 16})$$

Onde,

MR = Razão de umidade do produto (decimal);

k = constantes de secagem, (h^{-1});

x = coeficiente do modelo de Page;

t = tempo de secagem (minutos).

Os grãos, logo depois de debulhados, foram submetidos aos ensaios de compressão, conforme descrito no item 4.3. Os grãos restantes foram armazenados em sacos plásticos com espessura de 0,05 μm e selados com a finalidade de manter a integridade dos mesmos, conforme mostrado na Figura 12. Estes sacos com os grãos foram armazenados no laboratório de Pós-colheita da Faculdade de Engenharia Agrícola da UNICAMP no qual foram utilizados posteriormente nos ensaios de alta taxa de deformação, análise do óleo e determinação das propriedades físicas.



Figura 12. Acondicionamento para armazenamento dos grãos restantes após ensaios de compressão.

3.4. Ensaios de compressão

Os grãos de mamona após os tratamentos de secagem foram submetidos aos ensaios mecânicos utilizando máquina universal de ensaios (modelo TA 500 Texture Analyser, LLOYD Instruments[®]) do Laboratório de Propriedades Mecânicas de Materiais Biológicos da Faculdade de Engenharia Agrícola da UNICAMP.

Foi utilizada uma taxa de deformação de $0,6 \text{ mm.s}^{-1}$ e a carga aplicada em duas direções perpendiculares, largura e comprimento (Figura 13), entre pratos rígidos, planos e paralelos com 15 repetições para cada direção e 4 repetições para cada tratamento térmico. A

dimensão inicial a ser ensaiada foi medida através de paquímetro digital (modelo 727-2001, STARRETT®) com resolução de 0,01 mm.

Obteve-se para cada ensaio a curva força-deformação até a ruptura do tegumento, identificada pela redução súbita na força de compressão. A partir da curva, determinou-se a resistência à ruptura do tegumento pela força máxima, a energia de deformação até a força máxima, a deformação específica e a rigidez (MOHSENIN, 1986; OLAOYE, 2000).

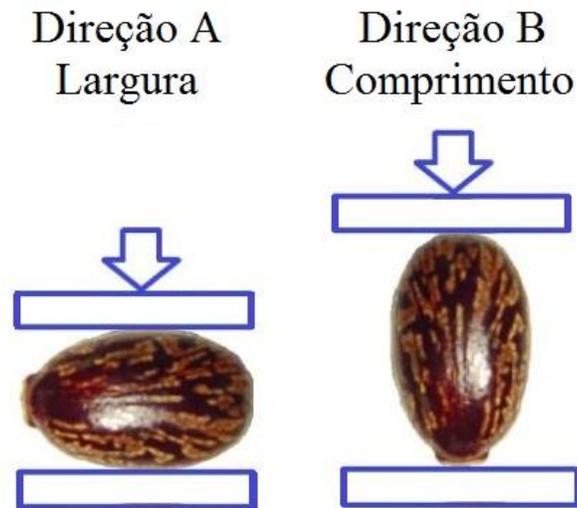


Figura 13. Direção dos grãos de mamona que foram submetidos ao ensaio de compressão.

A energia (E) necessária para a ruptura do tegumento do grão de mamona foi obtida pela área sob a curva de força-deformação pelo programa computacional NEXYGEN 3.0 da Lloyd Instruments® através da Equação 17. Este cálculo é efetuado durante a aquisição dos pontos para a construção da curva força-deformação, nos ensaios de compressão, através do programa computacional que possui uma taxa de aquisição constante.

$$E = \sum_{i=1}^{F_{m\acute{a}x}} \frac{L_a - L_p}{1000} \cdot F_a \quad (\text{Equação 17})$$

Onde,

E = energia de deformação até a força máxima (J);

La = Leitura atual de deslocamento obtida pelo programa (mm);

Lp = Leitura posterior do deslocamento obtida pelo programa (mm);

Fa = Força na leitura atual obtida pelo programa (N);

F_{máx} = Força máxima na ruptura do tegumento.

A deformação específica (ε) foi obtida pela Equação 18 (ARAUJO, 2005):

$$\varepsilon = \frac{L-Lf}{L} = \frac{D}{L} \quad (\text{Equação 18})$$

Onde,

ε = deformação específica (%);

L = dimensão inicial do grão (mm),

Lf = dimensão final do grão na ruptura do tegumento (mm),

D = deformação na ruptura do tegumento (mm).

A Rigidez (Q) é a resistência de um corpo a deformação aplicada por uma força ao longo de uma direção. É determinada através da relação entre a força de ruptura do tegumento e a deformação necessária para a ruptura do tegumento, e foi obtida através da Equação 19 proposta por GONELI (2008).

$$Q = \frac{Fr}{D} \quad (\text{Equação 19})$$

Onde,

Q = rigidez (N.mm⁻¹),

Fr = força de ruptura do tegumento (N),

D = deformação obtida na ruptura do tegumento (mm).

Para analisar os valores obtidos nos ensaios de compressão nos diferentes tratamentos de secagem foi utilizado o delineamento estatístico de blocos casualizados. Foi realizada uma análise de variância e comparação de médias entre os tratamentos e as direções utilizando-se o teste de Duncan ($p < 0,05$), com o auxílio do programa computacional SAS 9.0 da SAS Institute Inc[®].

3.5. Projeto e construção do Dispositivo de Regulagem Automática da Deformação específica limite (DIRADEL)

Com o intuito de facilitar a execução e aumentar o número de repetições dos ensaios com alta taxa de deformação, foi construído um dispositivo automático de regulagem da deformação específica limite, utilizando o conceito da Deformação Específica Limite proposto por ARAÚJO (2005). O equipamento, aqui denominado de DIRADEL, foi capaz de efetuar a leitura da dimensão a ser ensaiada, regular automaticamente a deformação específica limite predeterminada a ser imposta, efetuar a aplicação da alta taxa de deformação e retornar a posição inicial para que o operador faça uma análise visual do grau de ruptura do grão de mamona e possa iniciar um novo ensaio. Todos estes procedimentos foram realizados de forma cíclica, onde se pode retornar à ação desejada pelo operador a qualquer instante, de forma simples e prática. O equipamento apresentou dimensões extremamente reduzidas, não ocupando grandes espaços no laboratório e foi de fácil manuseio, não necessitando de muito treinamento para operá-lo.

3.5.1. Aferição da velocidade de deslocamento do cilindro pneumático

A velocidade de deslocamento do êmbolo pneumático foi medida utilizando-se uma filmadora digital de alta definição (modelo SC-HMX20c-Full HD, Samsung[®]). Após a filmagem, o vídeo foi editado e graduado em milímetros, com o auxílio do programa computacional Vegas Pro 9.0c, da Sony Creative Software Inc.[®], de modo a permitir a leitura do deslocamento do êmbolo em função do tempo, quadro a quadro.

Após a medição, foi obtida a curva de deslocamento em função do tempo, demonstrando a velocidade de avanço, parada e recuo do êmbolo pneumático.

3.5.2. Calibração e repetitividade das leituras da dimensão

O sistema de leitura da dimensão do equipamento DIRADEL foi calibrado para que pudesse efetuar a determinação da dimensão do produto a ser ensaiado com precisão e repetitividade. Esta calibração foi efetuada com 10 objetos sólidos de diferentes dimensões obtidas com paquímetro digital (modelo 727-2001, STARRETT[®]) com resolução de 0,01 mm.

Estes objetos foram colocados na plataforma do equipamento que efetuava sua leitura da dimensão e esta era comparada com o valor obtido pelo paquímetro, apresentados na Tabela 1. A diferença entre estes valores foi inserida como parâmetro de correção no sistema eletrônico do equipamento até que esta diferença fosse minimizada. Para cada dimensão estabelecida na Tabela 1, foram efetuados 10 repetições para verificação da repetitividade das leituras do equipamento.

Tabela 1. Dimensões dos objetos sólidos obtidas com paquímetro utilizadas para a calibração do DIRADEL

Dimensões dos objetos (mm)									
9,17	11,08	11,99	12,92	13,75	15,75	17,40	18,07	19,04	20,56

Com os valores obtidos pelo equipamento, foi possível montar um gráfico das dimensões obtidas pelo paquímetro pelas dimensões obtidas através do DIRADEL. Foi utilizada a modelo de regressão linear para ajustar os dados experimentais encontrados com o auxílio do programa computacional MICROSOFT EXEL[®] 2010, da Microsoft Corporation[®], e a avaliação foi efetuada através do coeficiente de correlação (R^2) e pela inclinação da reta. Um gráfico das dimensões obtidas pelo paquímetro pelos resíduos apresentados entre a dimensão real e a dimensão obtida através do equipamento foi montado para demonstrar os desvios do equipamento em cada medida calibrada. A repetitividade foi avaliada através do coeficiente de variação entre as repetições.

3.6. Ensaios com alta taxa de deformação

Os ensaios com alta taxa de deformação foram executados após a construção, calibração e ensaios preliminares do Dispositivo de Regulagem Automática da Deformação Específica Limite (DIRADEL), descrito e detalhado no Item 3.4. O equipamento foi utilizado no Laboratório de Propriedades Mecânicas dos Produtos Biológicos da Faculdade de Engenharia Agrícola da UNICAMP.

Após todos os ensaios com alta taxa de deformação, foi determinada o teor de água dos grãos, do tegumento e do endosperma pelo método gravimétrico utilizando estufa de ar

forçado (modelo 320-SE, FANEM[®]) a temperatura de $105 \pm 1^\circ\text{C}$, até peso constante, com três repetições (BRASIL, 1992).

3.6.1. Determinação da Deformação Específica Limite

O intuito deste ensaio foi determinar a Deformação Específica Limite onde ocorresse a ruptura total do tegumento e a liberação completa do endosperma com ausência de danos mecânicos. Desta forma, as deformações específicas foram gradativamente aumentadas até que se se obteve a deformação específica de desempenho máximo na decorticação, sendo esta a Deformação Específica Limite. Nestes ensaios foram utilizados os grãos dos tratamentos de secagem de 40 e 100°C, pois são os tratamentos de secagem extremos deste experimento e apresentaram diferença estatística nos parâmetros encontrados nos ensaios de compressão para a força máxima de ruptura, energia na ruptura e deformação específica. As deformações específicas utilizadas foram de 6, 10, 14, 18 e 22% para a direção da Largura e de 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14 e 16% para a direção do Comprimento. O incremento na deformação específica foi de 4% para a direção da largura e 2% para a direção do comprimento e foi determinado através do erro admissível do Dispositivo de Regulagem Automática da Deformação Específica Limite (DIRADEL) juntamente com a dimensão média de cada direção testada. Foram efetuados 15 repetições para cada deformação específica nos dois tratamentos de secagem.

Foi utilizado nestes ensaios o equipamento DIRADEL, descrito no item 3.4. Após o golpe único e direcionado, efetuado pelo equipamento, o grão foi retirado da plataforma e efetuada uma avaliação visual do efeito do impacto. Os efeitos do impacto foram avaliados utilizando uma adaptação da classificação proposta por ARAÚJO (2005) que considera *Grão com ruptura total do tegumento e endosperma inteiro* (RtEi); *Grão com a ruptura parcial do tegumento e endosperma protegido* (RpEp); *Grão com ruptura parcial do tegumento e endosperma exposto* (RpEe) e *Grão com ruptura total do tegumento e endosperma danificado* (RtEd). Os dados foram demonstrados através da porcentagem obtida em cada classificação.

3.6.2. Influência de diferentes deformações específicas nos tratamentos de secagem

Após determinar a Deformação Especifica Limite com os tratamentos de secagem de 40 e 100°C, foi efetuado ensaios de alta taxa de deformação nos demais tratamentos de secagem de Terreiro, 60 e 80°C. O intuito desta investigação foi avaliar a influência de diferentes deformações específicas nos distintos tratamentos de secagem para a direção da Largura e do Comprimento, utilizando valor superior e um inferior da Deformação Especifica Limite encontrado no item 3.5.1. As deformações específicas utilizadas nestes ensaios foram de 10, 14 e 18% para a direção da Largura e de 12, 14 e 16% para a direção do Comprimento. Foram efetuados 15 repetições para cada deformação específica nos tratamentos de secagem. A avaliação do grau de ruptura do tegumento e separação do endosperma foram segundo critérios descritos no item 3.4.1. Os resultados foram demonstrados através da porcentagem obtida em cada classificação. A porcentagem de *Grãos com ruptura total do tegumento e endosperma inteiro* (RtEi) foi demonstrado através de gráficos de superfície 3D, considerando os 4 tratamentos de secagem (40, 60, 80 e 100°C) e as 3 deformações específicas para a direção da Largura e do Comprimento de forma a facilitar a visualização.

3.6.3. Influência de diferentes deformações específicas com tratamentos de secagem adicionais

Os grãos remanescentes de cada tratamento de secagem foram novamente expostos por 15 minutos em ar forçado nas temperaturas utilizadas, e posteriormente efetuados os ensaios a alta taxa de deformação. O secador utilizado e as condições de secagem foram às mesmas descritas no item 3.2. O intuito deste tratamento de secagem adicional foi reduzir o teor de água do tegumento, superficialmente, para torna-lo mais frágil, sem afetar o endosperma. Este fato foi observado através do desempenho do impacto direcionado e único na avaliação dos *Grãos com ruptura total do tegumento e endosperma danificado* (RtEd).

As deformações específicas utilizadas nestes ensaios foram de 10, 14 e 18% para a direção da largura e de 10, 12 e 14% para a direção do comprimento. Foram efetuados 15 repetições para cada deformação específica limite. A avaliação do grau de ruptura do tegumento e separação do endosperma foram segundo critérios descritos no item 3.4.1. Os resultados foram demonstrados através da porcentagem obtida em cada classificação. A

porcentagem de *Grãos com ruptura total do tegumento e endosperma inteiro* (RtEi) foi demonstrado através de gráficos de superfície 3D, considerando os 4 tratamentos de secagem (40, 60, 80 e 100°C) e as 3 deformações específicas para a direção da Largura e do Comprimento de forma a facilitar a visualização.

3.7. Qualidade do óleo

As análises para determinar a qualidade do óleo foram realizadas no Laboratório de Óleos e Gorduras da Faculdade de Engenharia de Alimentos da UNICAMP e no Laboratório da empresa A. Azevedo Óleos Ind. e Com. de óleos Ltda. situada na cidade de Itupeva-SP.

Após os tratamentos de secagem foi avaliada a qualidade do óleo para detectar possíveis alterações decorrentes da exposição dos frutos ao tratamento térmico. Foram adotados as especificações comerciais do óleo de mamona Tipo 1, como padrão para as análises, comparando os resultados obtidos nas determinações de acidez, índice de peróxido e teor de água.

3.7.1. Extração do óleo

A extração foi feita a frio por prensagem dos grãos íntegros (tegumento e endosperma), utilizando um cilindro perfurado. Os grãos foram colocados no interior deste cilindro e com o auxílio de uma prensa hidráulica manual, prensou-os extraindo o óleo e este coletado através de uma calha, conforme mostrado na Figura 14. Após a extração, o óleo foi encaminhado para análise de acidez e teor de água, e o restante condicionado em recipiente hermético e protegido da luz, para a determinação de índice de peróxido.



Figura 14. Extração do óleo efetuado pela prensagem dos grãos em cilindro perfurado.

3.7.2. Acidez, Índice de Peroxido e Teor de água do óleo

A determinação da acidez foi realizada segundo o método Cd 3a-63 da American Oil Chemists' Society (AOCS, 1998) e expressa em porcentagem de ácido oleico. Foram efetuadas 3 repetições para cada tratamento de secagem.

A determinação do índice de peróxido foi realizadas segundo o método Cd 8b-90 da American Oil Chemists' Society (AOCS, 1998) e expresso em miliequivalência de peróxido. kg de amostra⁻¹. Foram efetuadas 3 repetições para cada tratamento de secagem.

A determinação do teor de água do óleo de mamona foi efetuada através de um Titulador Karl Fischer (modelo Coulômetro 831 KF, Metrom®) com geração de reagente coulométrico, método absoluto, conseqüentemente sem necessidade de determinação de título ou fator de correção. Foram adicionas em média 9 gotas do óleo na solução de Karl Fisher para a determinação. Os valores foram transferidos pelo aparelho a um microcomputador que informa o teor de água, o peso da amostra adicionada e o peso da água contida no óleo. Foram efetuadas 3 repetições para cada tratamento de secagem.

Para analisar os valores obtidos de acidez, índice de peroxido e teor de água do óleo, nos diferentes tratamentos de secagem, foi utilizado o delineamento estatístico de blocos casualizados. Foi realizada uma análise de variância e comparação de médias entre os tratamentos e as direções utilizando-se o teste de Tukey ($p < 0,05$), com o auxílio do programa computacional SAS 9.0 da SAS Institute Inc[®].

3.8. Fluxograma das principais etapas do experimento

O fluxograma da Figura 15 ilustra as principais etapas do projeto. Os grãos de mamona da cultivar AL Guarany 2002 foram submetidos a 5 tratamentos de secagem.

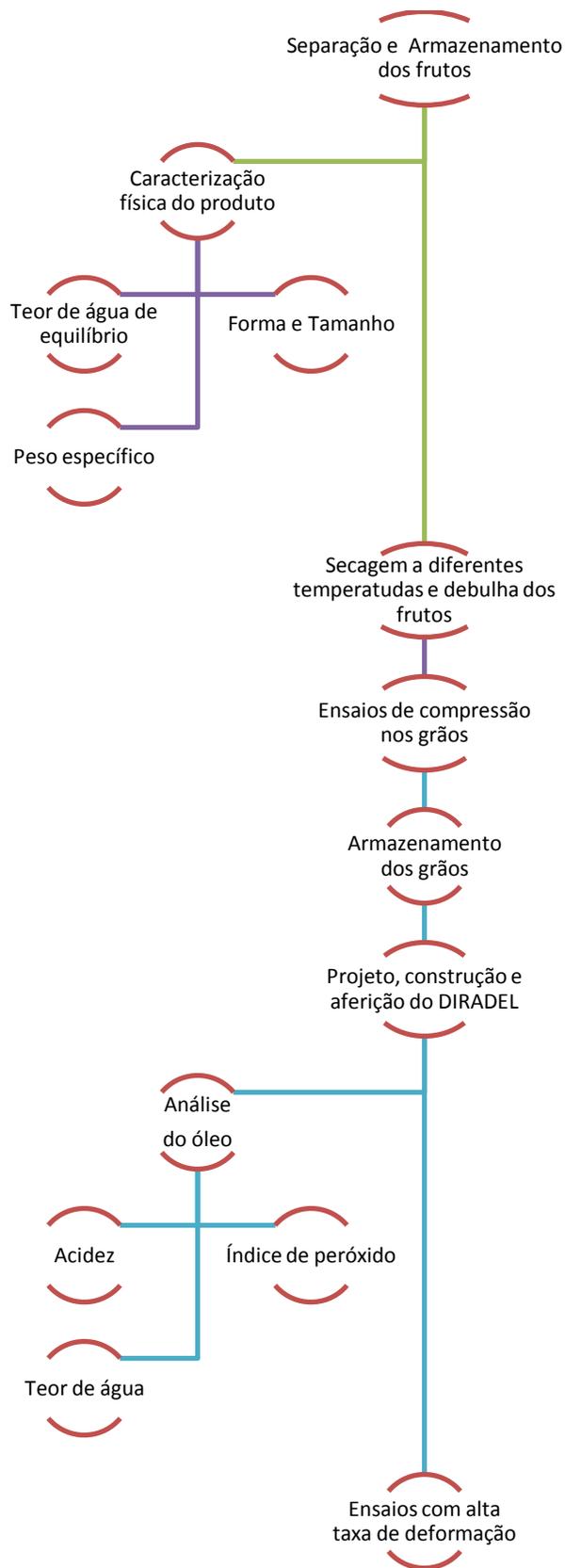


Figura 15. Fluxograma das principais etapas do projeto.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Caracterização física do material

4.1.1. Teor de água de equilíbrio

As curvas apresentadas na Figura 16 ilustram os dados experimentais encontrados e as curvas de equilíbrio higroscópico encontrado através dos diferentes modelos matemáticos estudados. A Equação de Halsey modificado foi utilizada para ajustar a umidade de equilíbrio utilizada nos cálculos de Razão de umidade, utilizando os parâmetros aqui encontrados.

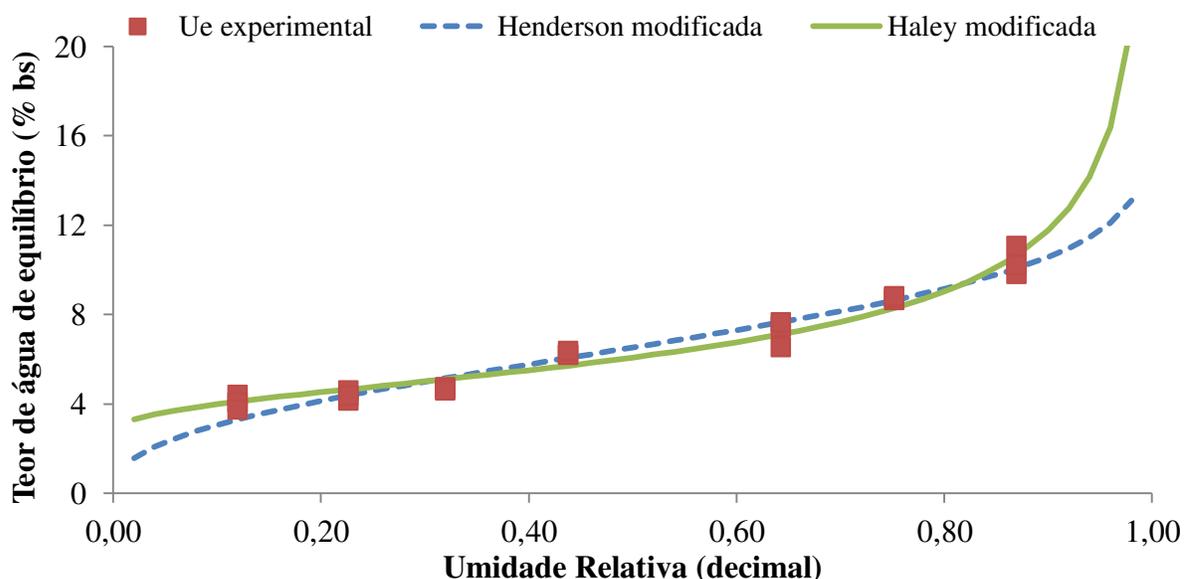


Figura 16. Valores observados e estimados pelos modelos propostos do teor de água de equilíbrio dos grãos de mamona.

Na Tabela 2 são demonstrados os valores dos coeficientes encontrados para as equações de Henderson modificada e de Halsey modificada, com os respectivos coeficientes de correlação (R^2) e erro padrão médios (\bar{E}). Os resultados evidenciam que o coeficiente de correção da Equação de Halsey modificada é superior ao da Equação de Henderson modificada, sendo assim a Equação proposta juntamente com os parâmetros encontrados são mais representativos com relação aos valores experimentais. Por outro lado, o erro padrão médio da Equação de Henderson modificada é inferior ao da de Halsey modificada, mostrando a baixa dispersão dos resíduos. Mas esta diferença relatada nos valores, de 0,07% pode ser considerada insignificante. A temperatura média do recinto onde se encontravam os

dessecadores foi de $24,58^{\circ}\text{C} \pm 1,70$, mas para efeito dos cálculos foi utilizado a temperatura de 25°C .

Tabela 2. Coeficientes dos modelos matemáticos com os respectivos R^2 e \bar{E} .

Modelo	Coeficientes			R^2 (%)	\bar{E} (%)
	a	b	c		
Henderson Modificada	$2,14 \times 10^{-4}$	5,5687	2,4857	94,94	6,82
Halsey Modificada	11,2657	0,2592	2,8552	95,71	6,89

GONELI (2008) efetuou estudo de diversos modelos matemáticos conhecidos que descrevem o teor de água de equilíbrio ajustando os parâmetros para os grãos de mamona. O autor concluiu que o modelo de Halsey modificado é o que melhor representa o teor de água de equilíbrio. O autor encontrou valores de R^2 de 97,65% e \bar{E} de 4,59%, mais significativos do que os encontrados neste experimento.

GELY & SANTALLA (2008) estudaram três modelos matemáticos que descrevem as isotermas de equilíbrio dos grãos de mamona e os resultados demonstram que o modelo de Henderson modificado foi o que melhor ajustou aos dados experimentais. Os autores chegaram a valores de R^2 de 94% e do \bar{E} de 9,46% para a Equação de Hederson modificada e para o modelo de Halsey modificado de R^2 de 94% e do \bar{E} de 13,97%. O erro padrão médio encontrado pelos autores é superior ao encontrados neste experimento.

4.1.2. Peso específico

O peso específico aparente médio foi de $500,00 \text{ kg.m}^{-3}$ com coeficiente de variação de 5,74 %. GONELI (2008) encontrou valores inferiores variando entre 309 a 358 kg.m^{-3} para teores de água entre 0,13 a 2,50 (decimal b.s.). NAKA (2010) encontrou valor médio de 628 kg.m^{-3} com umidade média de 6,86% (b.u.).

O peso específico real médio foi de $819,82 \text{ kg.m}^{-3}$ com coeficiente de variação de 1,42 %. NAKA (2010) encontrou valor médio de 846 kg.m^{-3} utilizando o mesmo

procedimento empregando Hexano na determinação. GONELI (2008) determinou o peso específico unitário considerando o grão de mamona como um esferoide triaxial, sendo medidas suas dimensões características. O autor encontrou valores variando entre 655 a 1138 kg.m^{-3} para teores de água entre 0,13 a 2,50 (decimal b.s.).

Com o peso específico aparente e peso específico real determinados, foi possível calcular a porosidade da massa de grãos de mamona. A porosidade calculada foi de 39,0 %. Valor inferior aos encontrados por GONELI (2008) que variaram entre 52,8% a 68,5%.

Foi determinado o teor de água dos grãos utilizados para determinar o peso específico aparente e real, sendo a média de 5,80 % (b.s.) com coeficiente de variação de 4,06%. Estes valores são inferiores ao dos autores citados, justificando as diferenças.

4.1.3. Forma e tamanho

Apresentam-se na Tabela 3 os valores das formas e tamanhos obtidos. Nas dimensões características, comprimento, largura e altura, demonstraram baixa variabilidade dos valores, pois os coeficientes de variação foram inferiores a 5,7%. Isto mostra-nos que o material é bastante homogêneo quanto as suas dimensões, fator este importante para dimensionamento de máquinas agrícola, pois os erros de projeto podem ser reduzidos para processamento com determinado produtos. NÓBREGA et al. (2007) propôs uma classificação dos grãos de mamona quanto ao formato, obtidos através da relação comprimento pela largura. De acordo com esta relação, os grãos são considerados *Alongados* $> 1,2$; *Arredondado* 0,8 à 1,2; *Achatado* $< 0,8$. A variedade AL Guarany 2002 utilizada nos ensaios, pode ser classificada como Alongada.

Os valores de Esfericidade, Circularidade, Área projetada e Área superficial se assemelham com os valores encontrados por GONELI (2008). Apenas a Área projetada apresentou coeficiente de variação acima de 4,5% nos valores calculados, as demais formas apresentaram coeficiente de variação inferior a este.

Tabela 3. Valores médios dos tamanhos e formas obtidos dos grãos de mamona com os respectivos desvios padrões (DP) e coeficiente de variação (CV).

Forma ou tamanho	Unidade	Valor médio	DP	CV (%)
Comprimento (d1)	mm	14,61	0,72	4,92
Largura (d2)	mm	9,04	0,40	4,46
Altura (d3)	mm	6,45	0,37	5,70
Diâmetro equivalente (Deq)	mm	9,47	0,34	3,59
Esfericidade (Es)	%	64,90	1,92	2,95
Circularidade (C)	%	61,93	2,69	4,34
Área projetada (Ap)	mm ²	103,82	8,54	8,22
Área superficial (S)	mm ²	29,76	1,07	3,59

4.2. Tratamentos de secagem

Os frutos de mamona possuem um amadurecimento heterogêneo, encontrando-se num mesmo racemo frutos com diferentes estágios de maturação, prejudicando a colheita e secagem, pois estes procedimentos não podem ser executados de forma única. Isto demanda mais mão de obra e retornos na área plantada para efetuar colheitas parceladas, fato este comentado por AZEVEDO & BELTRÃO (2007). Os racemos encontrados no campo demonstravam-se totalmente secos ou com um número alto de frutos visualmente verdes e prematuros. Teve-se dificuldade de colher racemos apresentando de 70 a 85 % de frutos secos. Desta forma, a solução foi efetuar a retirada dos frutos visualmente verdes, reduzindo a variabilidade das características dos frutos utilizados neste experimento.

A colheita dos frutos utilizados no experimento foi efetuada em duas datas, maio e Julho de 2010, obtidos na mesma área de plantio. Após a colheita e separação dos frutos visualmente secos, foram determinados os teores de água inicial dos frutos, grãos e pericarpo, conforme mostra na Tabela 4.

Tabela 4. Teores de água inicial médio dos frutos, grãos e pericarpo de cada lote utilizado nos experimentos com os respectivos coeficientes de variação (CV).

Lote	Teores de água % (b.s.)					
	Fruto	CV(%)	Grãos	CV(%)	Pericarpo	CV(%)
Maio de 2010	25,93	22,63	12,35	17,30	54,61	44,18
Julho de 2010	21,79	26,22	11,39	7,55	36,79	19,51

Observou-se que no primeiro lote os frutos possuíam teores de água mais elevados, principalmente no pericarpo, e no segundo lote estes valores se reduzem juntamente com a variabilidade, demonstrando uma secagem natural efetuada no campo. Estas variações em cada componente dos frutos dificultaram os ensaios de secagem. Os valores indicam que, mesmo com a retirada dos frutos visualmente verdes, a variabilidades dos teores de água de cada parte é alta, chegando a mais de 44% em alguns valores.

Identificou-se que do peso total do fruto de mamona, $65,4\% \pm 0,80\%$ representa o peso do grão e $34,26\% \pm 0,8\%$ representa o peso do pericarpo. Estes dados foram calculados em peso de matéria seca através das equações 13 e 14 e utilizados na Equação 12 para calcular peso final nos ensaios de secagem.

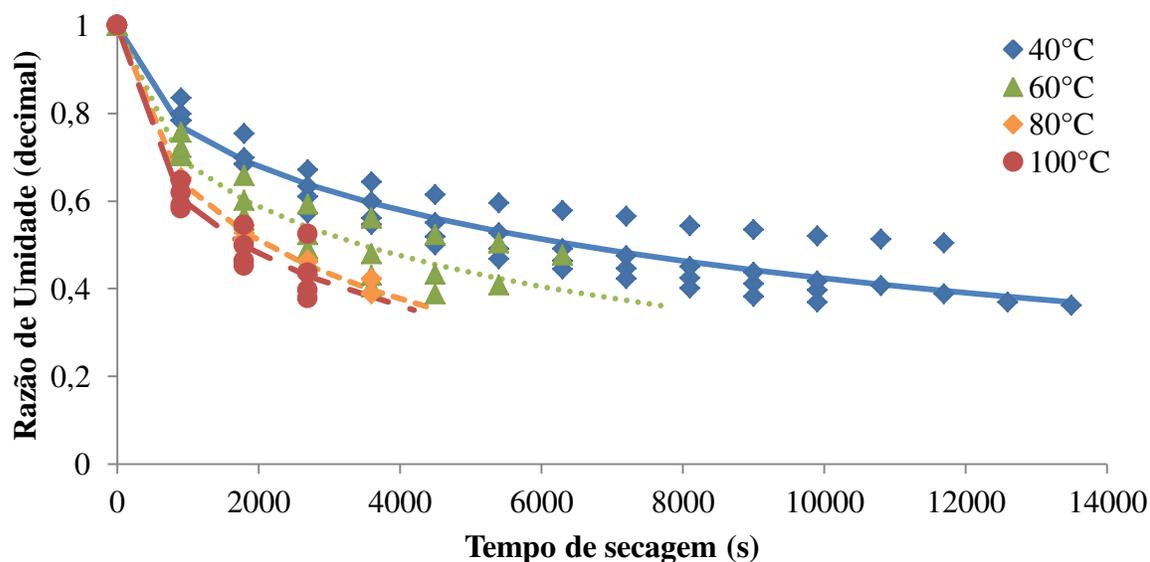


Figura 17. Cinética de secagem dos frutos de mamona a diferentes temperaturas.

Constatou-se pelo gráfico (Figura 17) o efeito significativo da temperatura nas curvas de secagem dos frutos de mamona, pois o tempo de secagem reduziu-se em 80% comparando as temperaturas extremas 40 e 100°C, demonstrando uma maior taxa de remoção de água do fruto com o aumento da temperatura do ar de secagem, fato este estudado por diversos autores (GONELI, 2008; GONELI et al., 2008; BROOKER et al., 1992; OLIVEIRA et al., 2008). Em todos os tratamentos de secagem pode-se verificar que nos instantes iniciais a taxa de remoção de água é elevada, certamente devido à perda de água pertencente ao pericarpo, parte superficialmente ao fruto e com o maior teor de água inicial, conforme mostrado na tabela 4. As curvas de secagem demonstram-se homogêneas com relação à cinética não demonstrando eventuais anormalidades durante os tratamentos de secagem.

Os tempos de secagem tiveram uma maior variação nos tratamentos com temperaturas mais baixas do ar de secagem. O tempo de secagem a 40°C variou de 165 a 225 minutos e para 60°C variou de 60 a 105 minutos. Esta variação pode ter ocorrido devido a variabilidade apresentada anteriormente do teor de água inicial, conforme já comentado. Para os tratamentos de secagem com temperaturas mais elevadas, os tempos de secagem não apresentaram variação, sendo de 60 minutos para o tratamento a 80°C e de 45 minutos para o tratamento de 100°C.

Outra dificuldade mostrada durante e após os tratamentos de secagem foi a quantidade de grãos imaturos e “chochos” detectados após a debulha dos frutos, chegando a mais de 10% em determinados ensaios. Estes dificultaram o acompanhamento do teor de água final dos grãos, que foi efetuado pelo peso do produto, pois não possuem endosperma desenvolvido com a presença de óleo, mas retêm grande quantidade de água, principalmente no pericarpo. Sua densidade é inferior à dos grãos normais. Este fato foi identificado por MACEDO et al. (2008) e RAMOS et al. (2008) e ocorre devido a baixa precipitação durante o período de enchimento dos grãos. Foi efetuada uma seleção manual durante a execução dos demais ensaios para a retirada destes grãos imaturos e “chochos”.

As curvas de secagem foram ajustadas através do modelo de Page. Segundo GONELI (2008), onde em seu trabalho avaliou diversos modelos matemáticos que representam a taxa de redução do teor de água, o modelo de Page foi o que melhor representa a cinética de secagem dos grãos de mamona da cultivar AL Guarany 2002. Na Tabela 5 são apresentados os

valores da constante de secagem (k), coeficiente do modelo de Page (x) e coeficiente de determinação (R²) para cada tratamento de secagem.

Tabela 5. Coeficientes obtidos para o modelo de Page nos tratamentos de secagem.

Tratamentos de secagem	Coeficientes		
	k	x	R ² (%)
40°C	0,06858	0,49391	92,06
60°C	0,09962	0,47875	93,56
80°C	0,10361	0,53413	99,61
100°C	0,13787	0,47701	97,39

O valor do coeficiente de determinação (R²), obtido nos tratamentos de secagem a 80°C e 100°C, foram de 97,39% e 99,39% respectivamente, demonstrando boa representatividade da Equação ajustada. Os tratamentos a 40 e 60°C, devido à variação dos tempos de secagem, apresentaram coeficiente de determinação inferiores, 92,06% e 93,53% respectivamente.

A secagem em terreiro dos frutos, efetuada como testemunha, teve duração de 31 horas e 55 minutos. A temperatura ambiente oscilou entre 21 a 29°C no período diurno e entre 11 a 19°C no período noturno. A umidade relativa oscilou entre 30 a 82% no período diurno e entre 52 a 80% no período noturno.

O teor de água final médio de todos os tratamentos de secagem foi de 6,60% (b.s.) ± 1,81% com coeficiente de variação de 27,36%. Segundo MAPA (1993), o teor de água dos grãos de mamona para fins de armazenamento, não poderão exceder o limite máximo de 10% (b.u.). Para a indústria de extração de óleo, grãos armazenados e processados com baixos teores de água facilitam a obtenção do óleo e reduzem processos adicionais para que o teor de água do óleo seja reduzido e atendido as especificações comerciais.

4.3. Ensaio de compressão

Após testes preliminares, estipulou-se para todos os ensaios, a deformação seria de até 2,50 mm ao logo do Comprimento e de 2,00 mm para Largura. Nestas deformações

verificou-se que o ensaio se estendia além da ruptura do tegumento, mostrando a variação da resistência do grão.

Na Figura 18 apresentam-se as curvas de força versus deformação específica de um dos ensaios característico para a direção da Largura e do Comprimento efetuado com grãos do tratamento de secagem a 40°C, demonstrando a resistência do grão de mamona à compressão. Na Figura 19 apresentam-se as curvas utilizando grãos do tratamento de secagem a 100°C. Verificou-se através dos gráficos a diferença na deformação específica entre a posição do comprimento e da largura, independente do tratamento de secagem. A queda abrupta no gráfico, independente da posição, indicou-nos a ocorrência da ruptura do tegumento e a resistência do grão a compressão, não necessariamente ocorrendo a abertura e liberação do endosperma.

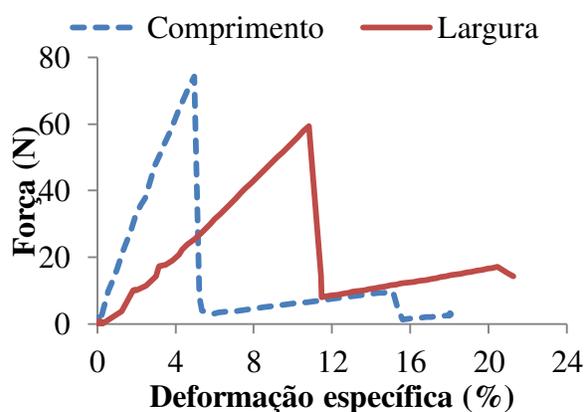


Figura 18. Curvas obtidas nos ensaios de compressão nas duas posições após secagem a 40°C.

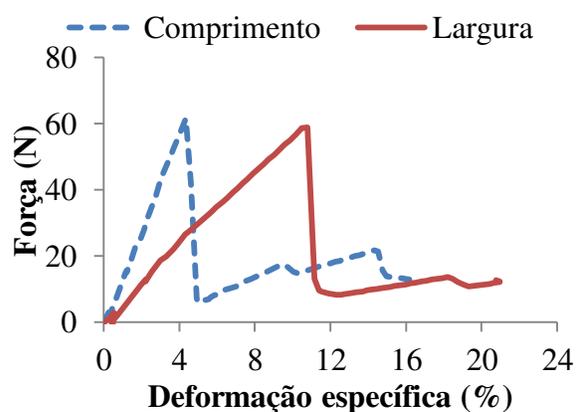


Figura 19. Curvas obtidas nos ensaios de compressão nas duas posições após secagem a 100°C.

4.3.1. Força máxima na ruptura

A Tabela 6 apresenta os valores médios de Força máxima na ruptura do tegumento para cada tratamento térmico obtido após os ensaios de compressão para as duas posições ensaiadas.

Os resultados médios de força máxima na ruptura do tegumento, para a direção do comprimento, evidenciam que com o aumento da temperatura de secagem a força necessária para a ruptura reduziu-se. Isto pode ter ocorrido devido a reduções volumétricas do

endosperma durante o processo de secagem nesta direção reduzindo à resistência do grão. Através da Figura 20, pode-se verificar que a extremidade do endosperma é ligada a região da carúncula, desta forma contrações na direção do comprimento podem gerar expansões na direção da largura. Esta radiografia do grão de mamona foi retirada de trabalho já existentes (CARVALHO et al., 2010) e foi apenas uma estimativa dos valores efetuada através das dimensões médias do grão de mamona, não havendo repetições para esta estimativa e considerando um grão de mamona sem problemas fisiológicos ou de desenvolvimento do endosperma. Obtiveram-se valores médios entre 55,52 a 63,11 N. O tratamento de secagem a 100°C difere-se estatisticamente dos tratamentos efetuados no Terreiro e a 40°C. Não houve diferença estatística entre os tratamentos de 40, 60 e 80°C.

Tabela 6. Valores médios de Força na ruptura (N) obtidos nos ensaios de compressão para as direções do comprimento e largura com os respectivos coeficientes de variação (CV).

Tratamento de secagem	Direção			
	Comprimento	CV(%)	Largura	CV(%)
Terreiro	63,11	16,01	70,02	21,39
	A / b		A / a	
40°C	59,68	18,81	58,46	24,10
	AB / a		B / a	
60°C	59,23	19,71	59,48	20,21
	BC / a		B / a	
80°C	56,96	15,41	68,55	21,21
	BC / b		A / a	
100°C	55,52	18,88	66,91	22,75
	C / b		A / a	

Médias seguidas da mesma letra maiúscula na coluna não diferem estatisticamente entre si (Duncan, $p < 0,05$).

Médias seguidas da mesma letra minúscula na linha não diferem estatisticamente entre si (Duncan, $p < 0,05$).

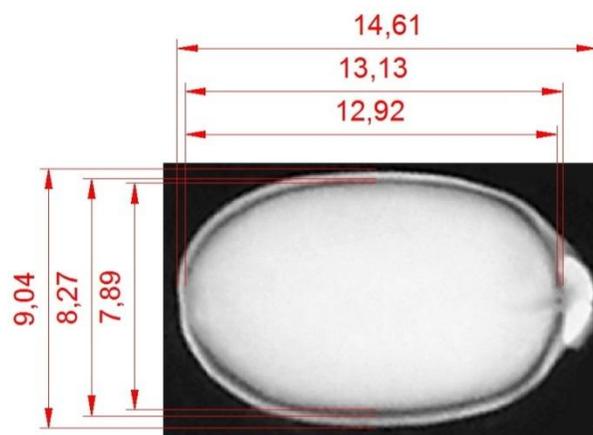


Figura 20. Radiografia da semente de mamona mostrando o espaçamento entre o endosperma e o tegumento com as dimensões médias em milímetros (adaptado de CARVALHO et al., 2010).

A variabilidade de certas propriedades e coeficientes mecânicos de produtos agrícolas quando determinados individualmente, grão a grãos, dá-nos uma projeção do comportamento da massa de grãos como um todo durante o processo de beneficiamento e decorticação. Isto deve ser levado em conta no projeto e dimensionamento dos equipamentos, pois em uma mesma cultivar ocorrem variações que se desconhecidas podem comprometer o desempenho do mesmo, abalar a estrutura gerando fadiga ou quebra de certos componentes, maior ou menor demanda de potência. Desta forma, quanto menor for o coeficiente de variação, podem-se reduzir os coeficientes de segurança no dimensionamento de equipamentos agrícolas, aumentando a certeza de se obter um processo projetado de desempenho constante. Segundo GOMES (1985) o coeficiente de variação em ensaios com produtos agrícolas, pode ser considerado *Baixo* quando inferior a 10%, *Médio* entre 10 a 20%, *Altos* de 20 a 30% e *Muito altos* superiores a 30%. Com relação à força máxima obtida na direção do comprimento, o coeficiente de variação nesse experimento pode ser considerado Médio, pois variou entre 15,41 a 19,71 %.

Na direção da largura, verificou-se o inverso ao ocorrido na direção do comprimento, com o aumento da temperatura a Força necessária para a ruptura do tegumento elevou-se. Conforme já comentado, pode ter ocorrido devido à expansão do endosperma na direção da largura (Figura 20), reduzindo o espaçamento ente o tegumento e o endosperma, aumentando a resistência do grão nesta direção. Obtiveram-se valores variando entre 58,46 a 70,02 N. Os tratamentos de 80°C, 100°C e Terreiro diferem estatisticamente dos tratamentos de 40°C e

60°C. Com relação ao coeficiente de variação para a direção da largura é considerado Alto, pois variou entre 20,21 a 24,10%.

Avaliando a diferença entre as direções, verificou-se que não há diferença estatística entre a direção da largura e comprimento para os tratamentos de 40 e 60°C. Nos tratamentos de 80°C, 100°C e Terreiro a força necessária para a ruptura do tegumento na direção do comprimento é estatisticamente superior à direção da largura. Esta diferença encontrada entre as duas posições, variando entre 9,87 a 17,03%, demonstra-nos que durante o processo de decorticação em sementes secas a temperaturas acima de 80°C, bem como o processo de secagem convencional em Terreiro, poderá demandar maior potência do equipamento dependendo da posição no qual será decorticado. Este fato foi observado também por GUPTA & DAS (2000) em grãos de girassol, onde os resultados de força máxima para a ruptura do tegumento foi maior na direção do comprimento.

O tratamento efetuado no Terreiro apresentou valores de Força máxima na ruptura do tegumento superior aos demais tratamentos de secagem nas duas direções, mas é estatisticamente igual ao tratamento a 40°C na direção do Comprimento e, para a direção da largura, é estatisticamente igual aos tratamentos de 80 e 100°C. Este fato tende a indicar que secagens lentas e gradativas podem interferir na resistência mecânica dos grãos de mamona.

4.3.2. Energia na ruptura

Apresenta-se na Tabela 7 os valores obtidos de energia na ruptura do tegumento nas direções do comprimento e largura para os diferentes tratamentos de secagem.

Tabela 7. Valores médios de energia de deformação até à ruptura (J) obtida nos ensaios de compressão para as direções do comprimento e largura e respectivos coeficientes de variação (CV).

Tratamento de secagem	Direção			
	Comprimento	CV(%)	Largura	CV(%)
Terreiro	0,0202	28,97	0,0350	36,04
	A / b		A / a	
40°C	0,0205	35,26	0,0281	41,56
	A / b		B / a	
60°C	0,0204	39,58	0,0290	32,67
	A / b		B / a	
80°C	0,0180	32,30	0,0365	33,87
	AB / b		A / a	
100°C	0,0169	34,00	0,0337	38,59
	B / b		A / a	

Médias seguidas da mesma letra maiúscula na coluna não diferem estatisticamente entre si (Duncan, $p < 0,05$).

Médias seguidas da mesma letra minúscula na linha não diferem estatisticamente entre si (Duncan, $p < 0,05$).

Os valores obtidos de energia na ruptura para a direção do Comprimento variaram entre 0,0169 a 0,0202 J. Conforme ocorrido na Força máxima, com o aumento da temperatura a energia necessária para a ruptura do tegumento reduziu-se. Os tratamentos de 40°C, 60°C, 80°C e Terreiro não se diferem estatisticamente. Apenas o tratamento de 100°C apresentou diferença estatística dos demais tratamentos, apresentando o menor valor de energia para a direção do comprimento. Os coeficientes de variação obtidos na energia de ruptura para a direção do comprimento são considerados de Altos a Muito Altos, conforme citados no item 4.3.1, pois variaram entre 28,97 a 39,58%.

Para a direção da largura, os valores de energia na ruptura variaram entre 0,0281 a 0,0365 J. Observou-se o mesmo ocorrido com a força máxima, com o aumento da temperatura a energia necessária para a ruptura do tegumento aumentou-se. Os tratamentos de 80°C, 100°C e Terreiro diferem estatisticamente dos tratamentos de 40°C e 60°C. Os coeficientes de variação obtidos na energia de ruptura para a direção da largura são considerados Muito Altos, conforme citados no item 4.3.1, pois variaram entre 32,67 a 41,56%.

Analisando a diferença entre as direções, em todos os tratamentos de secagem a energia necessária para a ruptura do tegumento na direção da largura é estatisticamente superior à direção do comprimento. Com os resultados obtidos de Energia na ruptura do tegumento, e analisando seu coeficiente de variação, nota-se que este é um parâmetro muito variável, podendo induzir a erros no dimensionamento de máquinas para a decorticação, pois é influenciado pela variação da força máxima de ruptura e pela deformação na ruptura. GONELI (2008) obteve valores de energia necessária para a ruptura do tegumento de mamona na posição de repouso ou altura variando entre 0,0256 a 0,0477 J para teores de água entre 8 a 66% (b.s.), próximos ao encontrados neste experimento para as direções da largura e comprimento.

4.3.3. Deformação específica na ruptura

Observam-se na Tabela 8 os valores obtidos de Deformação específica na ruptura do tegumento nas direções do comprimento e largura para os diferentes tratamentos de secagem.

A deformação específica demonstra qual a porcentagem de deformação, em relação à dimensão inicial do grão, no qual foi necessário para a ruptura do tegumento, não necessariamente ocorrendo à liberação do endosperma. Os resultados apresentados demonstram claramente a diferença entre a direção da largura e do comprimento, mostrado também nos curvas apresentadas na Figura 18 e 19. Este fato foi observado em grãos com estrutura similar ao de mamona tal como girassol por GUPTA & DAS (2000).

Tabela 8. Valores médios de deformação específica (%) obtidos nos ensaios de compressão para as direções do comprimento e largura com os respectivos coeficientes de variação (CV).

Tratamento de secagem	Direção			
	Comprimento	CV(%)	Largura	CV(%)
Terreiro	4,37	16,77	10,39	18,31
	AB / b		ABC / a	
40°C	4,43	22,11	9,70	22,82
	AB / b		C / a	
60°C	4,48	37,29	10,21	16,99
	A / b		BC / a	
80°C	4,15	20,84	11,10	17,68
	AB / b		A / a	
100°C	4,03	21,42	10,54	22,69
	B / b		AB / a	

Médias seguidas da mesma letra maiúscula na coluna não diferem estatisticamente entre si (Duncan, $p < 0,05$).

Médias seguidas da mesma letra minúscula na linha não diferem estatisticamente entre si (Duncan, $p < 0,05$).

Os valores apresentados de deformação específica na direção do comprimento, que variaram entre 4,03 a 4,48%, demonstram que apenas o tratamento de 100°C diferiu estatisticamente dos demais, sendo este o menor valor apresentado. Apesar de apresentar diferença estatística, esta diferença de 0,45% de deformação específica entre os tratamentos, no projeto de máquinas é insignificante devido aos demais parâmetros de segurança que são acrescidos no dimensionamento. Os coeficientes de variação dos resultados, excluindo o tratamento de 60°C e Terreiro, podem ser considerados Alto, pois variaram de 20,84 a 22,11%. O tratamento de 60°C apresentou variação Muito Alta de 37,29%, isto pode ser devido à quantidade de grãos chochos e imaturos presente neste tratamento, conforme já comentado no item 4.2. O tratamento no Terreiro demonstrou variação Média de 16,77%, conforme citados no item 4.3.1.

Para a direção da largura, os valores de deformação específica variaram entre 9,70 a 11,10%. Os tratamentos de 40 e 80°C diferiram-se estatisticamente entre si, sendo o maior e o menor valor apresentado. Esta diferença de 1,4% de deformação entre estes tratamentos de secagem pode ser considerável no dimensionamento de equipamentos para a decorticação,

dependendo da dimensão média. Os coeficientes de variação podem ser considerados de Médios a Altos, conforme citados no item 4.3.1, pois variaram entre 16,99 a 22,82%.

Na radiografia do grão de mamona apresentada na Figura 20, com as medidas estimadas pelas dimensões médias do item 4.1.3, verifica-se que na direção do comprimento há um espaçamento entre o endosperma e o tegumento apenas próximo à carúncula, onde são interligados. Este espaçamento foi estimado em 0,21 mm ou, convertido em porcentagem com relação à dimensão inicial, de 1,43%. Na direção da largura observa-se um espaçamento maior, estimado em 0,38 mm ou, convertido em porcentagem com relação à dimensão inicial, de 4,2%. Estes valores são 34% e 41% inferiores as deformações específicas médias encontradas para a direção do comprimento e da largura, respectivamente, demonstrando-nos que o endosperma influencia na resistência a ruptura do tegumento. Estes valores médios foram de 4,2% para a direção do comprimento e de 10,4% para a direção da largura. As deformações específicas para a ruptura, independente da direção, podem ser reduzidas com altas taxas de deformação, minimizando a resistência que pode ser causada também pelo endosperma. Mas pode ocorrer apenas a ruptura, não havendo a abertura por completo do tegumento e a liberação do endosperma.

Valores similares a estes de deformação específica e forças máximas na ruptura foram encontrado por OLAOYE (2000) para grãos de mamona das cultivares Asbowu, Evahura e Ojji, todas de origem Nigeriana. GONELI (2008) encontrou valores de deformação específica entre 12,31 e 19,68%, para a direção da altura ou repouso, superiores aos valores encontrados neste experimento para as posições de comprimento e largura, demonstrando a variabilidade dos valores existente entre os três eixos ortogonais do grão necessários para a ruptura do tegumento dos grãos de mamona. Os valores encontrados pelo mesmo autor são considerados altos e nos demonstra que a direção da altura ou repouso não é indicada para o conceito de máquinas para a decorticação.

4.3.4. Rigidez

A Tabela 9 demonstra os valores calculados de Rigidez, obtidos através da relação força na ruptura pela deformação associada do grão, nas direções do comprimento e largura para os diferentes tratamentos de secagem. Esta propriedade dos grãos de mamona foi a que

apresentou menor variação dos valores, independente da posição ou tratamento de secagem, pois a força máxima na ruptura do tegumento foi corrigida para cada deformação. É uma propriedade importante no dimensionamento de máquinas para a decorticação, pois com ela pode-se estimar as variações de força que podem ocorrer se houver regulagens na deformação aplicada no produto durante o uso do equipamento, podendo ser esta regulagem necessária para melhorar o desempenho do equipamento, por descuido do operador ou alterações abruptas do produto. Dependendo do projeto e do tipo de atuador utilizado para decorticação, estas regulagens podem ser citadas como o espaçamento de rolos atuadores, alterações no diâmetro dos furos de peneiras, etc.

Tabela 9. Valores médios de rigidez ($N.mm^{-1}$) obtidos nos ensaios de compressão para as direções de comprimento e largura com os respectivos coeficientes de variação (CV).

Tratamento de secagem	Direção			
	Comprimento	CV(%)	Largura	CV(%)
Terreiro	100,62	13,08	70,50	11,08
	A / a		A / b	
40°C	93,38	15,62	63,99	12,61
	B / a		CD / b	
60°C	93,29	16,80	62,11	14,39
	B / a		D / b	
80°C	96,36	15,42	65,29	13,51
	AB / a		CB / b	
100°C	96,94	17,36	67,75	13,88
	AB / a		AB / b	

Médias seguidas da mesma letra maiúscula na coluna não diferem estatisticamente entre si (Duncan, $p < 0,05$).

Médias seguidas da mesma letra minúscula na linha não diferem estatisticamente entre si (Duncan, $p < 0,05$).

Os valores de rigidez, para a direção do comprimento variaram entre 93,29 a 100,62 $N.mm^{-1}$. Apenas o valor obtido no tratamento de Terreiro diferiu estatisticamente dos demais tratamentos, sendo este o maior valor apresentado. Os coeficientes de variação dos valores de rigidez para a direção do comprimento variaram entre 13,08 a 17,36%, sendo esta variação considerada Média, conforme citados no item 4.3.1.

Para a direção da largura, os valores de rigidez variaram entre 62,11 a 70,50 $N.mm^{-1}$. Os tratamentos de secagem de 60°C e Terreiro diferem estatisticamente entre si sendo o maior

e menor valor de rigidez encontrado, respectivamente. Os demais tratamentos de secagem são considerados estatisticamente iguais. Apesar dos valores se diferirem estatisticamente, esta diferença é relevante para o dimensionamento de máquinas para decorticação. Os coeficientes de variação dos valores de rigidez para a direção da largura variaram entre 11,08 a 14,39%, sendo esta variação considerada Média, conforme citados no item 4.3.1, e a menor variação encontrada em todas as propriedades determinadas nos ensaios de compressão. Isto indica-nos que este coeficiente é mais representativo para ser utilizado no projeto e dimensionamento de máquinas para a decorticação, além da deformação específica, pois apesar da variabilidade da força máxima de ruptura do tegumento, temos uma certeza maior da força solicitada pelo equipamento após sua regulagem e ajuste, dentro de uma faixa de trabalho.

Os valores de rigidez, independente do tratamento térmico, demonstram diferença estatística entre a direção do comprimento e da largura, sendo os valores da posição do comprimento superior. GONELI (2008) encontrou valores inferiores e intermediários de rigidez dos grãos de mamona na direção da altura ou repouso variando entre 48,18 a 77,82 N.mm^{-1} para teores de água de 8 a 66% (b.s.).

Pode-se constatar que os tratamentos de secagem a diferentes temperaturas demonstraram influenciar nas propriedades mecânicas dos grãos de mamona, mesmo que esta influência seja insignificante para ser considerada no projeto e dimensionamento de máquinas para a decorticação. Como estes ensaios de compressão foram realizados a uma taxa de deformação de $0,6 \text{ mm.s}^{-1}$, considerada muito baixa para o dimensionamento de equipamentos de alta produção rotacional ou de impacto, altas taxas de deformação podem demonstrar maior influência na resistência do grão com tratamentos de secagem distintos. Os ensaios de compressão são utilizados como referência inicial para os ensaios de alta taxa de deformação, apresentados no item 4.5, principalmente a deformação específica.

4.4. Construção do Dispositivo de Regulagem Automática da Deformação Específica Limite– DIRADEL

O dispositivo é adaptado para sementes de mamona ou demais grãos e castanhas com dimensão máxima de 18 mm e força de ruptura máxima de 100 N. Sua estrutura com dimensões reduzidas e baixo peso propiciou seu uso e transporte dentro do laboratório sem

muito esforço, podendo ser utilizado em bancadas ou mesas existentes, sem necessidade de estruturas especiais. Sua única restrição é a necessidade de uma linha de ar comprimido para efetuar os ensaios, pois o equipamento não possui compressor de ar independente.

O equipamento constitui em 4 partes principais: Estrutura (A), Mesa de levantamento vertical (B), Componentes pneumáticos (C) e Componentes eletrônicos (D). O equipamento é mostrado nas Figuras 21 e 22 e as partes são descritas nos itens seguintes.

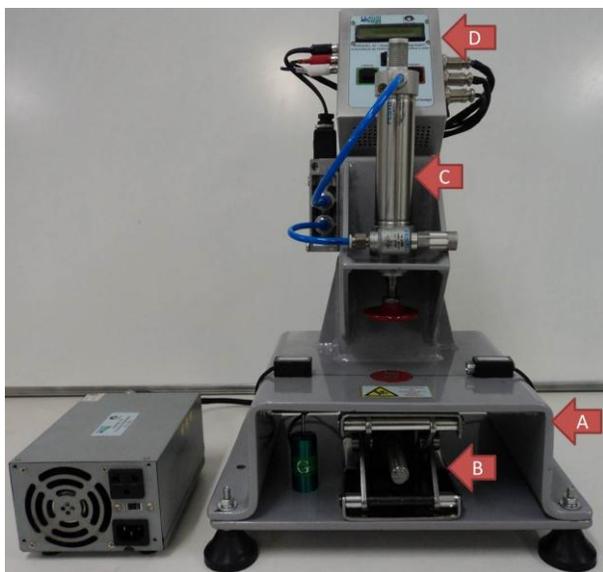


Figura 21. Vista frontal do DIRADEL com as partes construídas.



Figura 22. Vista lateral do DIRADEL.

O Apêndice 8.1 demonstra um procedimento simplificado para realização dos ensaios utilizando o equipamento.

4.4.1. Estrutura

A estrutura do equipamento foi construída com chapas de aço 1020, confeccionadas com sistema de corte por plasma utilizando equipamento CNC (Computer Numerical Controlled) através de desenhos anteriormente projetados com o auxílio do programa computacional Solid Edge V20 da Siemens[®]. Após cortadas, as chapas foram dobradas e efetuada a junção das partes, utilizando solda tipo MIG. Posteriormente foram efetuados os furos existentes e a estrutura foi encaminhada para limpeza, utilizando jato de areia, e finalmente efetuada a pintura. O peso final da estrutura foi em torno de 17 kg.

Todos estes serviços foram efetuados em empresas metalúrgicas da Região de Campinas-SP. As Figuras 23 e 24 demonstram o projeto da estrutura.

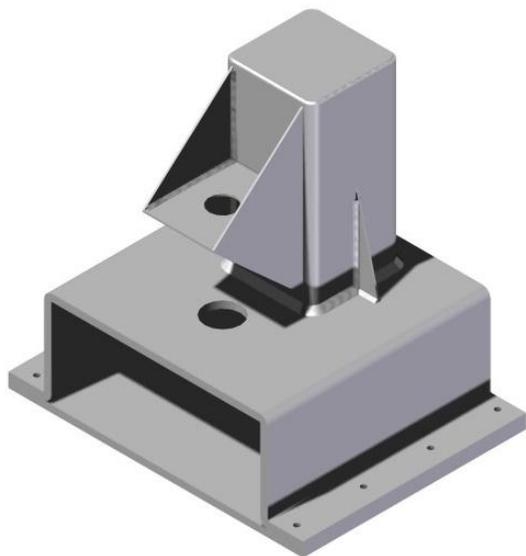


Figura 23. Vista isométrica frontal da estrutura do DIRADEL.

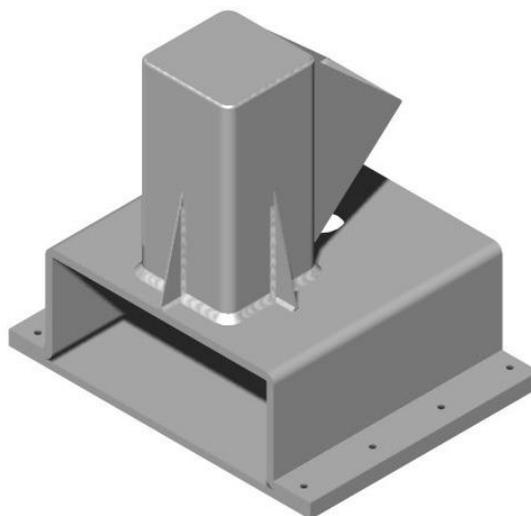


Figura 24. Vista isométrica traseira da estrutura do DIRADEL.

4.4.2. Mesa de levantamento vertical

A mesa de levantamento vertical compõe a parte mecânica do equipamento. É composta por um sistema de quatro barras, confeccionado em aço inox, no qual uma rosca sem fim engastada em uma das barras, através da rotação, proporciona o movimento horizontal desta barra, que desliza sobre um trilho, promovendo a aproximação ou afastamento das barras, ocasionando uma movimentação vertical da parte superior do equipamento. Esta movimentação vertical é efetuada durante a leitura do tamanho do produto a ser ensaiado e na regulação da deformação específica limite a ser utilizada.

Para promover a rotação da rosca sem fim foi utilizado um motor de passo (modelo HT23-400, Applied Motion Products Inc.[®]), com passo de $1,8^\circ$, 200 passos por rotação. Este motor é afixado na base do equipamento e ligado ao sistema eletrônico que efetua os comandos. A Figura 25 demonstra a mesa de levantamento vertical afixada à base do DIRADEL com seus componentes, onde: 1 – base inferior e base superior de levantamento; 2

– Mecanismo de 4 barras para efetuar a translação do movimento horizontal para vertical; 3 – Rosca sem fim para efetuar o movimento horizontal; 4 – Motor de passo.

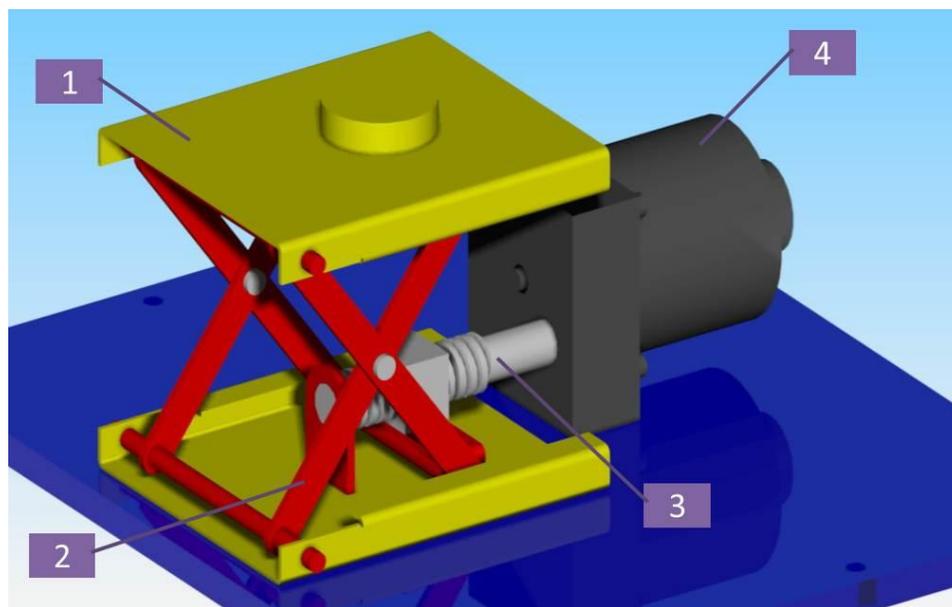


Figura 25. Vista isométrica da mesa de levantamento vertical com suas partes constituintes.

A confecção e montagem da mesa de levantamento vertical foram efetuadas pela empresa KALATEC Automação Industrial, após envio do projeto do equipamento efetuado através do programa computacional Solid Edge V20 da Siemens®. O motor de passo foi adquirido na mesma empresa.

4.4.3. Componentes pneumáticos

Os componentes pneumáticos são responsáveis por proporcionar o impacto a alta taxa de deformação no produto a ser ensaiado. A Figura 26 demonstra os componentes pneumáticos afixados à estrutura do DIRADEL, onde: 1 – válvula direcional de ar com acionamento elétrico e pneumático (modelo MFH-5-1/4, FESTO®); 2 – válvula de escape rápido de ar (modelo SE-1/8 B, FESTO®); 3 – Cilindro pneumático de 32 mm de diâmetro e curso de 80 mm (modelo DNC-32-80-PPV-A, FESTO®); 4 – silenciadores. A válvula direcional de ar é comandada por um solenoide ligado ao sistema eletrônico do equipamento, que promove sua abertura e fechamento. Na extremidade da haste do cilindro pneumático há um anteparo metálico que promove o impacto na estrutura do equipamento.

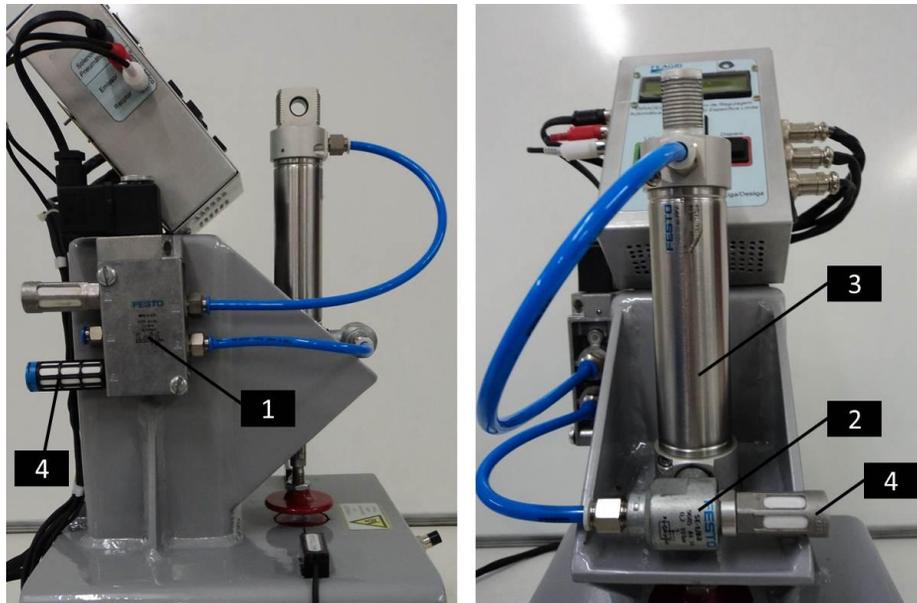


Figura 26. Componentes pneumáticos afixados a estrutura do equipamento.

A velocidade de deslocamento do embolo do cilindro pneumático é proporcional a pressão de ar no momento da abertura da válvula de direcionamento. Esta pressão deve ser constante para que seja aplicada a alta taxa de deformação com mesma velocidade em todos os ensaios. Com este intuito foi adicionado ao sistema pneumático um reservatório de ar comprimido com capacidade de 0,001 m³ que possui um manômetro na sua extremidade. Este reservatório, próximo ao equipamento, reduz as oscilações da rede de ar comprimido e as perdas de pressão ocasionadas pela grande extensão dos dutos de ar. A pressão do sistema variou de 5,5 à 6,5 bar. A Figura 27 mostra o reservatório de ar construído.



Figura 27. Reservatório de ar comprimido.

4.4.4. Componentes eletrônicos e programação do equipamento

Todos os componentes anteriormente descritos como a Mesa de levantamento vertical e os componentes pneumáticos, bem como o sistema de medição automática da altura e a regulação automática da deformação específica limite, necessitam de um sistema de controle

eletrônico para que todos funcionem de forma cíclica e programada. Sendo assim, foi desenvolvido um sistema eletrônico que é comandado por um microcontrolador (PIC - Programmable Interface Controller).

Para efetuar o dimensionamento e simulação dos componentes eletrônicos foi utilizado o programa computacional Proteus PCB Design da Labcenter Electronics Ltd.®. Após o desenvolvimento do circuito eletrônico virtualmente, foi listado os materiais e componentes necessários para a construção do circuito eletrônico e adquiridos no comercio. Posteriormente a montagem física do circuito foi realizada. No Apêndice 8.2 é listado os componentes eletrônicos utilizados para montagem do circuito. A programação do microcontrolador foi efetuado em linguagem Basic com o auxílio do programa mickroBASIC for PIC 5.0 da MikroElektronika®, e transmitido do computador para o microcontrolador através do programa computacional PICKit 2 v2.55 da PES T&S Equipamentos Eletrônicos®.

O circuito eletrônico com o microcontrolador, as botoeiras e o display de LCD que informa o estado das ações efetuadas pelo equipamento foram acondicionados em uma caixa metálica afixada na parte superior da estrutura, conforme a Figura 28.



Figura 28. Caixa metálica contendo os componentes eletrônicos.

A comunicação entre os principais componentes físicos do processo pode ser compreendida observando-se o diagrama mostrado na Figura 29. As setas indicam o fluxo de “informações”.

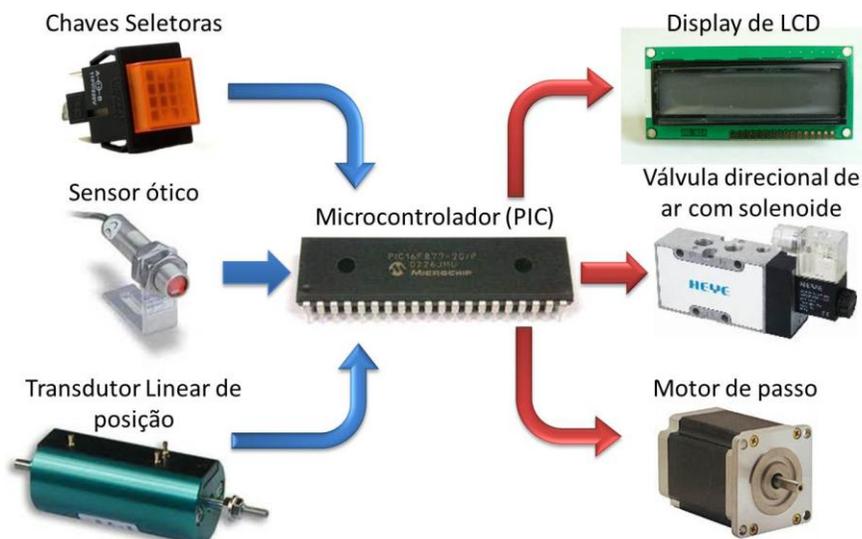


Figura 29. Diagrama de comunicação entre os principais componentes físicos do dispositivo.

A programação desenvolvida para o equipamento possibilita uma sequência inteligente e automática do processo. Seu fluxograma é apresentado na Figura 30. No início de cada ciclo, dá-se um tempo necessário para a retirada do produto que foi ensaiado no ciclo anterior e para a introdução de um novo produto a ser ensaiado.

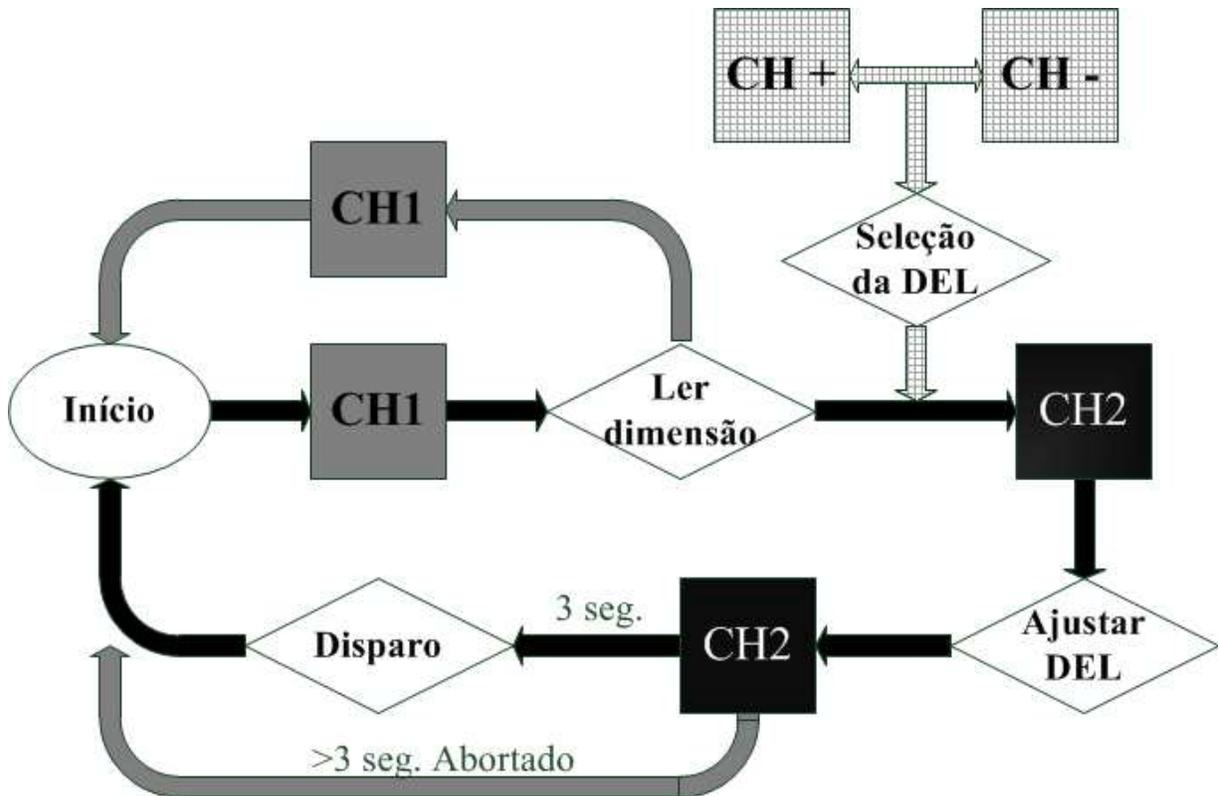


Figura 30. Fluxograma da sequência lógica da programação estabelecida no DIRADEL.

Após pressionar o botão “Leitura” (CH1), realiza-se a medição da dimensão de interesse do produto a ser ensaiado, utilizando o leitor ótico, e do deslocamento da mesa vertical. É informada a dimensão no Display de LCD. Caso queira voltar à posição inicial, basta pressionar novamente o botão “Leitura” (CH1) que o ciclo é reiniciado.

Após a medição da dimensão, pode-se informar a deformação específica limite (DEL) a ser imposta, expressa em porcentagem (%), através dos botões + (CH+) ou – (CH-). Caso já tenha efetuado o ajuste da deformação específica em ensaio anterior, o valor ficará gravada para o próximo ensaio. Com a DEL selecionada e pressionado o botão “Disparo” (CH2), o equipamento regula a DEL a ser imposta através do deslocamento da mesa vertical, e aguarda novo comando. Para efetuar o disparo deve-se pressionar o botão “Disparo” (CH2) por 3 segundos, que após este procedimento, a mesa vertical retorna a posição inicial e um novo ensaio pode ser realizado. Caso pressione o botão “Disparo” com tempo inferior a 3 segundo a operação será abortada, não ocorrendo disparo, e a mesa vertical retornará a posição inicial.

4.4.5. Aferição da velocidade de deslocamento do cilindro pneumático

O cilindro pneumático que foi utilizado possuía 80 mm de deslocamento, mas no equipamento esta dimensão foi reduzida, pois em ensaios preliminares notou-se ocorria uma redução na velocidade. Isso devido ao amortecimento final do cilindro pneumático. Desta forma o deslocamento foi reduzido em 20%, utilizado apenas 65 mm.

A velocidade final do deslocamento registrada, onde ocorre o impacto com o produto ensaiado, foi de $3,79 \text{ m.s}^{-1}$. ARAUJO (2005) construiu equipamento de mesmo conceito, onde um martelo deslocava-se verticalmente em movimento de queda livre até atingir o produto, proporcionando uma velocidade calculada de $4,18 \text{ m.s}^{-1}$. O equipamento aqui proposto proporciona uma velocidade 10% inferior a citada pelo autor, mas nenhum estudo ainda foi efetuado para saber qual a melhor taxa de deformação para produtos agrícolas promovendo sua quebra. Assim subentende-se que esta velocidade é aceitável para promover altas taxas de deformação, pois é 6300 vezes maior que a velocidade de deslocamento utilizada nos ensaios de compressão entre pratos planos, rígidos e paralelos, suficiente para utilizar as reações viscoelásticas do produto promovendo o rompimento da casca sem danos ao endosperma ou amêndoa.

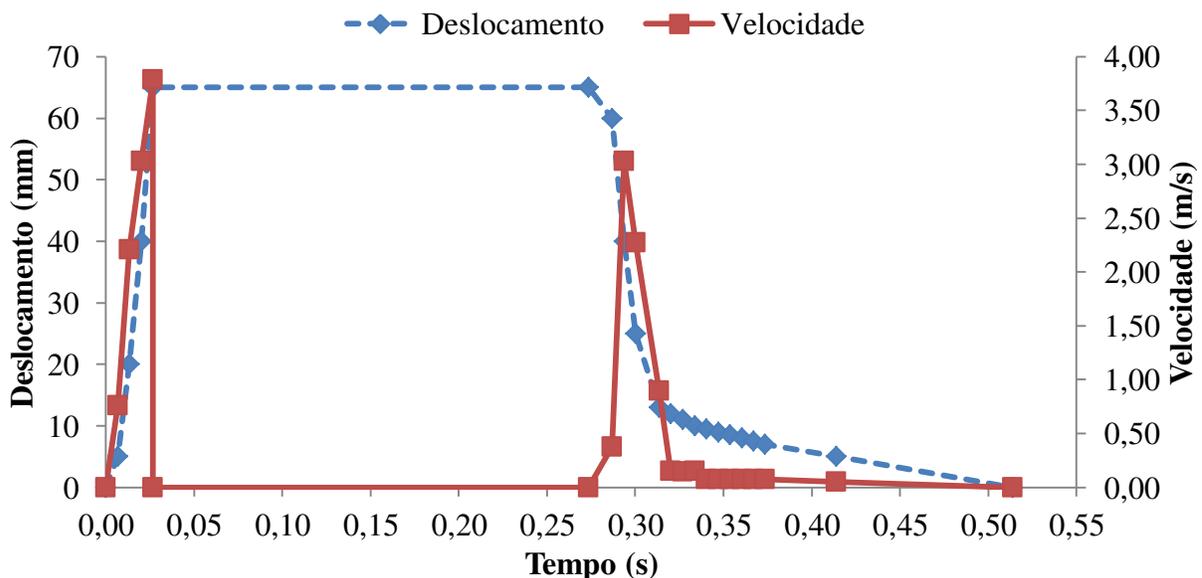


Figura 31. Gráficos do deslocamento e da velocidade de atuação do cilindro pneumático utilizado no DIRADEL

O gráfico mostrado na Figura 31 apresenta o deslocamento e a velocidade do cilindro pneumático ao longo do tempo. Pode-se verificar que o êmbolo ao acelera-se inicialmente, se desloca por 0,026 segundos até promover o impacto. Posteriormente, o êmbolo permanece na mesma posição por 0,250 segundos e retorna a sua posição inicial. A velocidade de retorno é inferior a de avanço, sendo ainda reduzida ao longo do tempo. Todo o procedimento de avanço e retorno do embolo do cilindro pneumático consome em média de 0,51 segundos.

4.4.6. Calibração e repetitividade da leitura da dimensão

Várias calibrações foram efetuadas no decorrer dos ajustes iniciais do equipamento. À medida que as diferenças eram encontradas entre as medidas reais efetuadas com o paquímetro nos sólidos e posteriormente no DIRADEL, os ajustes eram efetuados na programação do equipamento como correção. O gráfico mostrado na Figura 32 demonstra as medidas efetuadas no paquímetro com os sólidos e no equipamento. Verifica-se através do termo dependente da Equação gerada após análise de regressão linear, a equivalência dos dados obtidos, pois o valor é próximo a 1. O coeficiente de determinação (R^2) apresenta valor de 99,92%, demonstrando a representatividade dos dados obtidos com a Equação.

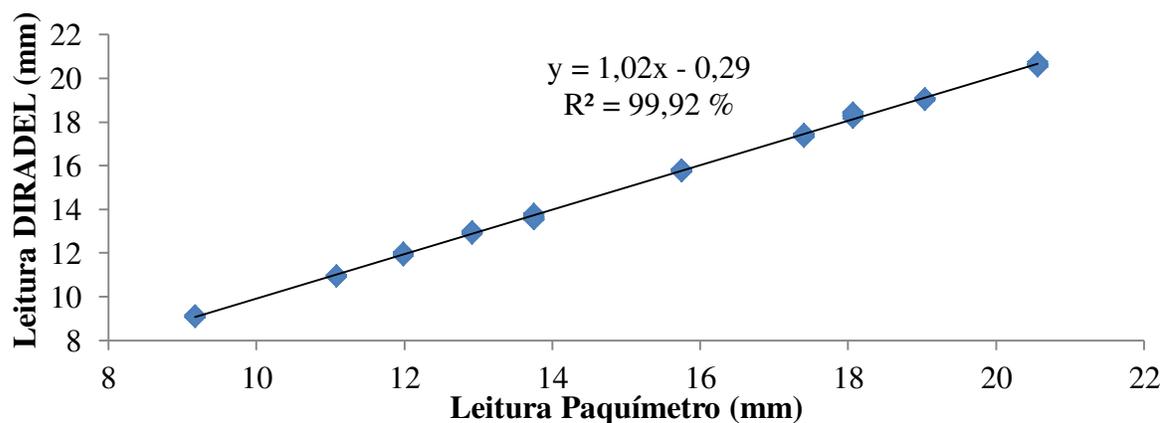


Figura 32. Leituras efetuadas no DIRADEL comparadas com as do paquímetro.

Os desvios de leituras demonstrados pelo equipamento variaram em cada dimensão calibrada. O gráfico apresentado na Figura 33 demonstra que na dimensão de 18 mm o equipamento apresentou o maior desvio, chegando a quase 0,40 mm de diferença com relação à medida efetuada com o paquímetro. Este fato pode ser decorrente de problemas na

fabricação da mesa vertical, típicos em montagens mecânicas, onde necessitaria de uma montagem com maior precisão. Assim foi imposta a limitação do equipamento a trabalhar apenas com produtos de dimensões inferiores a 18 mm, dimensão esta suficiente para os ensaios realizados com grãos de mamona. Outra limitação é a dimensão mínima, sendo esta de 8 mm devido a posição de leitura do sistema ótico do equipamento.

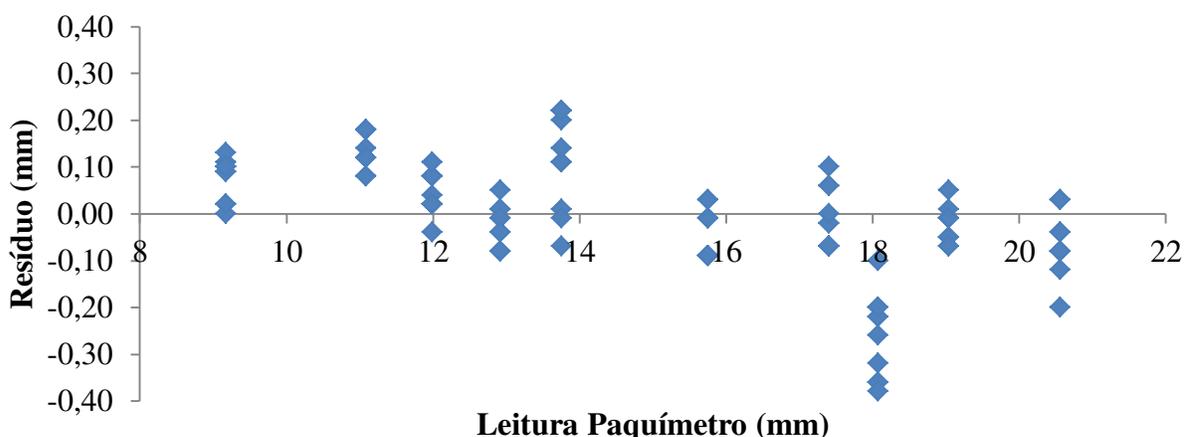


Figura 33. Desvios nas leituras efetuadas no DIRADEL comparadas com o paquímetro.

No geral os desvios apresentaram entre 0,20 mm. Considerando as medidas ensaiadas com grãos de mamona, representa um erro médio de 1,37% na posição do comprimento e de 2,21% na posição da largura. Este erro é inferior ao desvio padrão das dimensões observadas, sendo assim aceitável.

Na Tabela 10 apresentam-se os valores médios de leituras efetuadas no DIRADEL com os respectivos coeficientes de variação. Verificou-se que a repetitividade do equipamento chega a mais de 99%. Apenas a dimensão de 13,64 mm apresentou maior variação entre as repetições sendo de 0,78%. As demais dimensões apresentaram variação inferior a 0,50%.

Tabela 10. Leituras médias efetuadas no DIRADEL, dadas em milímetros, com os respectivos coeficientes de variação para cada medida.

	Média das Leituras efetuadas DIRADEL (mm)									
	9,09	10,94	11,94	12,95	13,64	15,79	17,41	18,33	19,07	20,63
CV (%)	0,50	0,37	0,38	0,35	0,78	0,33	0,37	0,49	0,20	0,33

4.5. Ensaios com Alta Taxa de Deformação

4.5.1. Avaliação do Desempenho

Foram efetuados os ensaios de alta taxa de deformação utilizando o Dispositivo Automático de Deformação Específica Limite – DIRADEL. Testes preliminares foram executados para encontrar a melhor forma e maneira de suportar o grão na posição desejada para aplicação da deformação. Desta forma, os grãos foram apoiados em uma fina espuma com uma fenda central, inferior a maior dimensão dos grãos, fixada na base da Mesa vertical, no qual os direcionava a posição desejada. Os grãos utilizados nestes ensaios permaneceram armazenados 2 meses após os tratamentos de secagem. Na Figura 34 são mostrados os grãos obtidos após a deformação direcionada ilustrando os padrões de classificação estabelecidos como critério de avaliação do desempenho da decorticação e liberação do endosperma.



Figura 34. Grãos de mamona submetidos aos ensaios com alta taxa de deformação, mostrando as classes estabelecidas para classificação. A - *ruptura total do tegumento com endosperma inteiro (RtEi)*, B - *ruptura parcial do tegumento com Endosperma exposto (RpEe)*, C - *ruptura*

parcial do tegumento com endosperma protegido (RpEp); D - ruptura total do tegumento com endosperma danificado (RtEd).

4.5.2. Determinação da Deformação Específica Limite

Utilizando os valores médios de deformação específica encontrada nos ensaios de compressão, independente do tratamento de secagem, de 10,4% para a largura e 4,3% para o comprimento, foram efetuados os ensaios com alta taxa de deformação. Com a intenção de identificar a deformação específica limite, isto é, aquela que resultou em maior porcentagem de endospermas inteiros e liberados, foi efetuada ensaios com deformações superiores e inferiores as médias encontradas.

A Figura 35 apresenta o resultado do desempenho obtido na ruptura do tegumento através dos ensaios de alta taxa de deformação para a direção da largura nos tratamentos de secagem de 40 e 100°C.

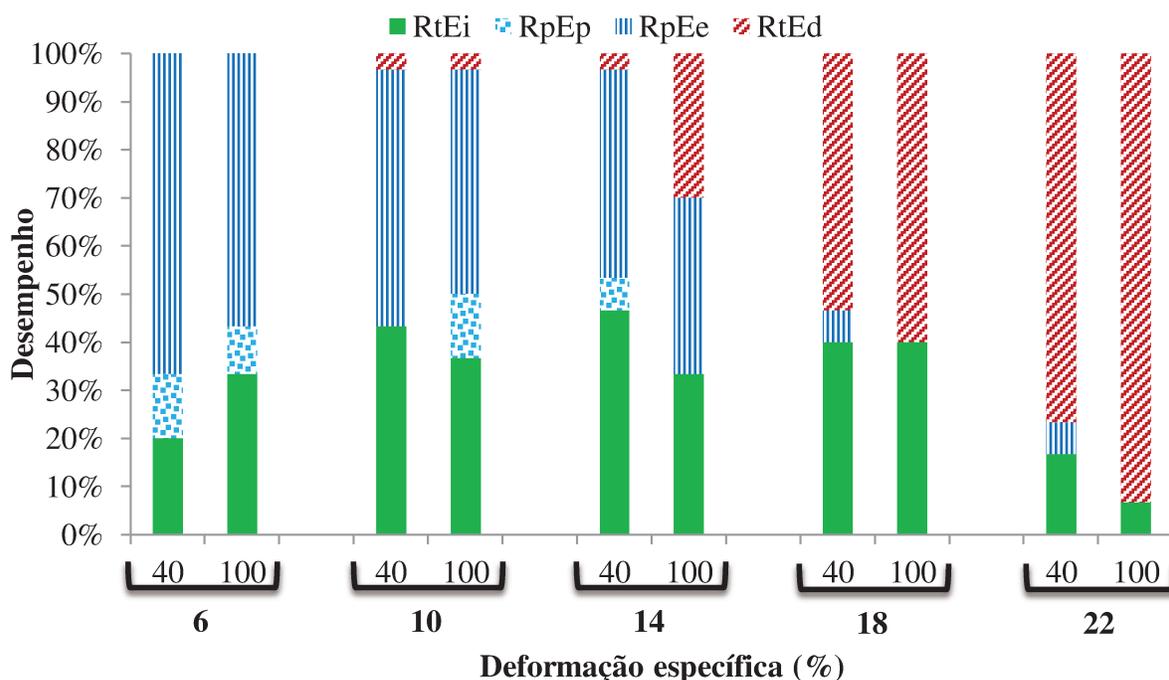


Figura 35. Desempenho da ruptura dos grãos de mamona através do impacto único e direcionado na ruptura total do tegumento com endosperma inteiro (RtEi), ruptura parcial do tegumento com endosperma protegido (RpEp), ruptura parcial do tegumento com endosperma exposto (RpEe) e ruptura total do tegumento com endosperma danificado (RtEd), expresso em porcentagem, para os tratamentos de secagem de 40 e 100°C a diferentes deformações específicas ao longo da direção da Largura.

Através do gráfico observa-se que utilizando a deformação específica de 6% apenas 20,00 e 33,33 % dos grãos, dos tratamentos de 40 e 100° respectivamente, demonstraram ruptura total do tegumento e liberação do endosperma sem danos. Nesta deformação mais de 56% demonstram ruptura parcial do tegumento e endosperma inteiro, isso indica que com o aumento da taxa de deformação ocorreu uma redução da deformação específica aplicada necessária para a ruptura do tegumento, demonstrando a propriedade viscoelástica do produto. Mas nota-se também que não ocorreu a abertura completa do tegumento, sendo necessário o aumento expressivo da deformação específica para que isto ocorresse. Indica-nos, desta forma, que o grão de mamona apresenta propriedades mais elásticas, principalmente com a interferência do endosperma na resistência do grão, comentado no item 4.3.3. A maior porcentagem de ruptura total do tegumento e liberação do endosperma sem danos foi obtida no tratamento de 40°C com deformação específica de 14%. A partir deste valor de deformação específica, ocorreu um aumento significativo do dano causado no endosperma. Pode-se verificar que utilizando a deformação específica de 22% mais de 76,66 e 93,33% dos grãos, dos tratamentos de 40 e 100°C respectivamente, demonstraram ruptura total do tegumento e endosperma danificado.

A baixa porcentagem de grãos com ruptura total do tegumento e endosperma inteiro pode ser explicado devido à estrutura do endosperma, conforme mostrado na Figura 36. Através do corte transversal efetuado na região central do endosperma verifica-se um espaçamento entre os cotilédones, formando uma região “oca” internamente aos mesmos. Sendo estes cotilédones ligados apenas pela região periférica dos mesmos. O espaçamento entre o tegumento e o endosperma, conforme comentado, é inferior a deformação específica aplicada. Estes fatos reduziram a resistência do endosperma expressivamente, deixando-o sensível à impactos na direção da largura.

Pode-se observar que deformações específicas entre 6 e 10% demonstraram uma maior porcentagem de grãos com ruptura do tegumento e com ausência de danos ao endosperma. Mas tendência que haveria apenas a ruptura do tegumento, sendo necessários impactos ou procedimentos adicionais para à liberação do endosperma com ausência de danos.



Figura 36. Vista ampliada de um corte transversal na parte central do endosperma do grão de mamona mostrando a separação parcial dos cotilédones.

A Figura 37 apresenta o resultado do desempenho obtido na ruptura do tegumento através dos ensaios de alta taxa de deformação para a direção do comprimento nos tratamentos de secagem de 40 e 100°C.

A direção do comprimento apresentou maior porcentagem de grãos com ruptura total do tegumento e endosperma inteiro que a direção da largura. Utilizando a deformação específica de 2% apenas 3,33 e 13,33% dos grãos, dos tratamentos de 40 e 100°C respectivamente, demonstraram ruptura total do tegumento e liberação do endosperma sem danos. Conforme comentado para a direção da largura, com a redução da deformação específica as propriedades viscoelásticas são observadas a alta taxa de deformação, mas é insuficiente para ocorrer à abertura total do tegumento e liberação do endosperma. Nota-se no gráfico uma evolução acentuada da porcentagem de grãos com ruptura total do tegumento e endosperma inteiro com o aumento da deformação específica, atingindo a maior porcentagem em 14%. Nesta deformação apresentou valores de 70 e 80% dos grãos, dos tratamentos de 40 e 100°C respectivamente, com ruptura total do tegumento e liberação do endosperma sem danos. Na deformação específica de 16% o desempenho reduziu-se demonstrando valores de 26,66 e 43,33% de grãos, dos tratamentos de 40 e 100°C respectivamente, com ruptura total do tegumento e endosperma danificado.

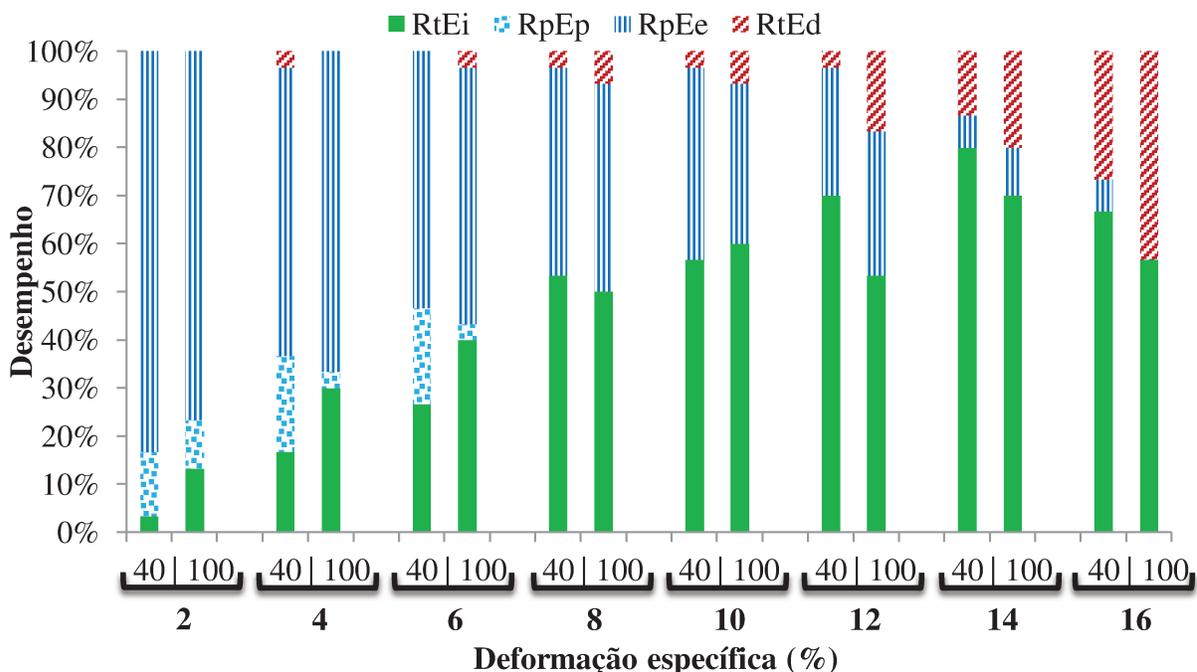


Figura 37. Desempenho da ruptura dos grãos de mamona através do impacto único e direcionado na *ruptura total do tegumento com endosperma inteiro* (RtEi), *ruptura parcial do tegumento com endosperma protegido* (RpEp), *ruptura parcial do tegumento com endosperma exposto* (RpEe) e *ruptura total do tegumento com endosperma danificado* (RtEd), expresso em porcentagem, para os tratamentos de secagem de 40 e 100°C a diferentes deformações específicas ao longo da direção do Comprimento.

Observou-se que a deformação específica de 14% foi a que apresentou maior porcentagem de grãos com ruptura total do tegumento e endosperma inteiro, independente da temperatura de secagem ou da direção, sendo esta, a deformação específica limite. Nesta deformação, apesar de observar grãos com ruptura total do tegumento e endosperma danificado, o intuito foi buscar a maior porcentagem de grãos com ruptura total do tegumento e endosperma inteiro, independente se apresentasse uma porcentagem de grãos com ruptura total do tegumento e endospermas danificado. Estes grãos podem ser aproveitados e separados através de classificação de tamanhos e por velocidade terminal após o processo de decorticação, se imaginarmos processos industriais e de alto desempenho.

A temperatura de secagem demonstrou influenciar na obtenção de grãos com ruptura total do tegumento e endosperma inteiro. O tratamento a 40°C, para a deformação de 14%, apresentou maiores porcentagem que o tratamento de 100°C, independente da direção. Demonstrando-nos que temperaturas de secagem mais altas devem ter um controle maior

durante sua execução, pois podem interferir no teor de água dos grãos, tornando o endosperma mais frágil e quebradiço para fins de decorticação dos grãos.

Destaca-se que, com exceção dos grãos que apresentaram ruptura total do tegumento e endosperma danificado, os demais grãos que não liberaram o endosperma, poderiam ser submetidos a impactos adicionais para ocorrer tal finalidade, pois o endosperma ainda permanece inteiro. Este fato deve ser levado em conta no dimensionamento e projeto de mecanismos para a decorticação de grãos, castanhas e nozes, para a obtenção de melhores desempenhos. Esta abordagem descrita neste trabalho utilizou-se apenas de impacto único e direcionado, princípio este não utilizado para máquinas de alto desempenho e produção, dependendo do produto e do princípio utilizado.

4.5.3. Influência de diferentes deformações específicas nos tratamentos de secagem

Após a busca experimental da deformação específica limite, sendo esta de 14% para a direção da largura e do comprimento, foi efetuados os ensaios utilizando uma deformação específica superior e superior a 14% nos demais tratamentos de secagem de Terreiro, 60°C e 80°C.

A Figura 38 apresenta o resultado do desempenho obtido na ruptura do tegumento através dos ensaios de alta taxa de deformação para a direção da largura nos tratamentos de secagem de Terreiro, 40, 60, 80 e 100°C. Utilizando a deformação específica de 10%, a porcentagem de grãos com ruptura total do tegumento e endosperma inteiro foi o tratamento de secagem de Terreiro, chegando a 56,66%. Os demais tratamentos oscilaram entre 36,66 a 46,66%. O tratamento de Terreiro e 80°C apresentaram a maior porcentagem de grãos com ruptura total do tegumento e endosperma danificado, sendo de 13,33%. Na deformação específica de 14% o melhor desempenho na ruptura total do tegumento e endosperma inteiro foi do tratamento de secagem de 60°C, sendo este de 70%. Os demais tratamentos oscilaram entre 33,33% a 53,33%. Isto pode ter ocorrido devido ao teor de água dos grãos, pois a secagem de 40 e 60°C apresentaram valores superiores aos demais, em média de 6,62% (b.u.), nos demais tratamentos o teor de água variou de 5,12 a 5,83% (b.u.). Outro fato também pode ser devido à escolha aleatória dos grãos durante a realização dos ensaios, onde neste tratamento apresentou grãos de melhor qualidade com relação ao desenvolvimento do

endosperma. O tratamento de 80°C apresentou a maior porcentagem de grãos com ruptura total do tegumento e endosperma danificado, sendo de 36,66%. Verificou-se que deformações específicas acima de 14% o desempenho da ruptura para a posição da largura independente do tratamento de secagem reduz-se significativamente. Utilizando a deformação de 18% o melhor desempenho foi nos tratamentos de 40°C e 100°C, apresentando 40% de grãos com ruptura total do tegumento e endosperma inteiro. Os demais tratamentos variaram entre 10 a 36,66%. O tratamento de terreiro apresentou a maior porcentagem de grãos com ruptura total do tegumento e endosperma danificado, sendo de 86,66%. Os demais tratamentos variaram entre 53,33% a 66,66%.

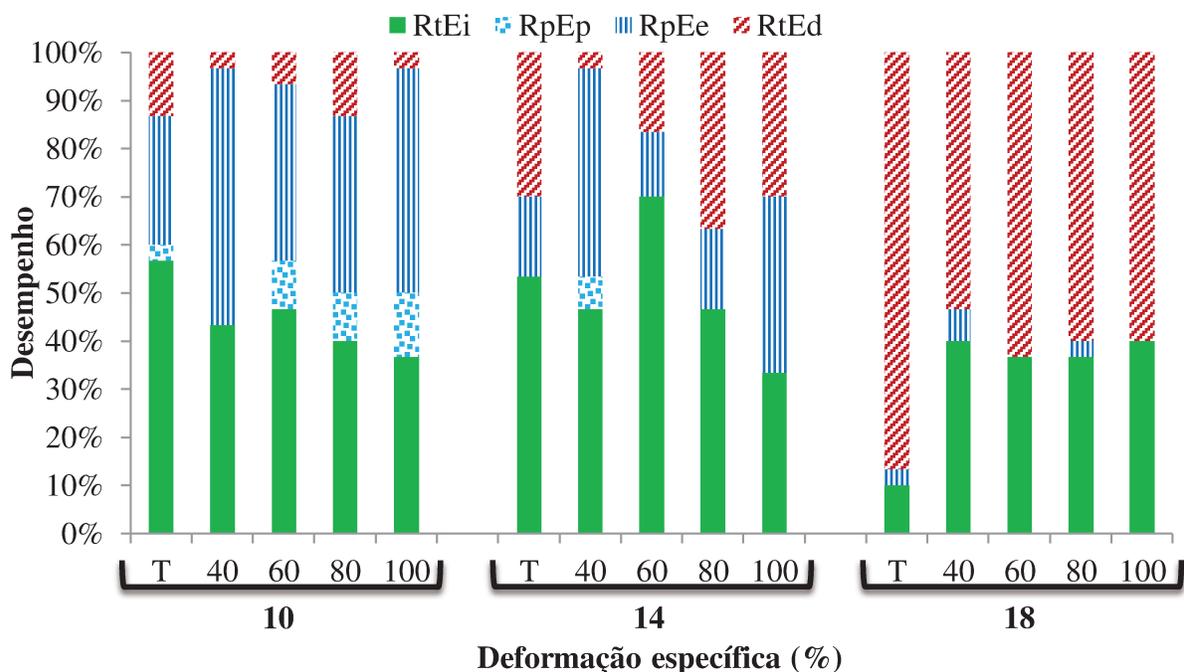


Figura 38. Desempenho da ruptura dos grãos de mamona através do impacto único e direcionado na ruptura total do tegumento com endosperma inteiro (RtEi), ruptura parcial do tegumento com endosperma protegido (RpEp), ruptura parcial do tegumento com endosperma exposto (RpEe) e ruptura total do tegumento com endosperma danificado (RtEd), expresso em porcentagem, para todos os tratamentos de secagem a diferentes deformações específicas ao longo da direção da Largura.

O gráfico de superfície 3D ilustrado na Figura 41 indica-nos a porcentagem de grãos com ruptura total do tegumento e endosperma inteiro para a direção da largura nos diferentes tratamentos térmicos e deformações específicas. Verifica-se que o tratamento de secagem de

60°C utilizando a deformação específica de 14% apresentou a maior porcentagem, conforme já comentado.

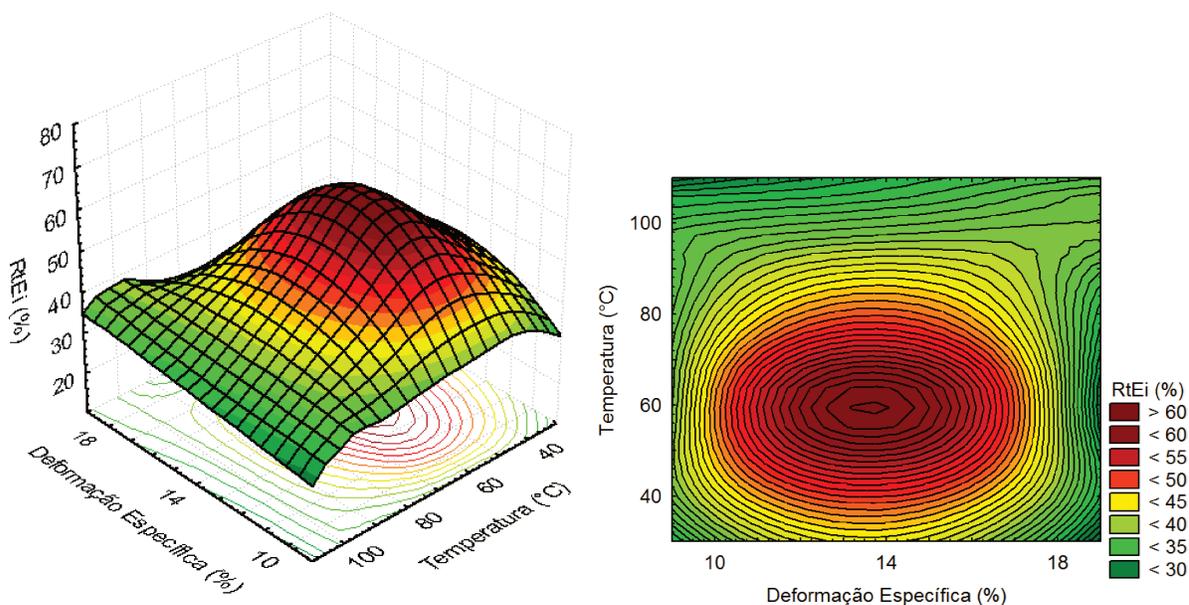


Figura 39. Gráfico de superfície 3D para a porcentagem de *grãos com ruptura total da casca com endosperma inteiro* (RtEi) para os diferentes tratamentos térmicos e deformações específicas na direção da Largura.

A Figura 40 apresenta o resultado do desempenho obtido na ruptura do tegumento através dos ensaios de alta taxa de deformação para a direção do comprimento nos tratamentos de secagem de Terreiro, 40, 60, 80 e 100°C. Utilizando a deformação específica de 12%, a maior porcentagem de grãos com ruptura total do tegumento e endosperma inteiro foi o tratamento de secagem de 40°C, chegando a 70%. Os demais tratamentos oscilaram entre 53,33 a 63,33%. O tratamento de 80°C apresentou maior porcentagem de grãos com ruptura total do tegumento e endosperma danificado, sendo de 20%. Na deformação específica de 14% a maior porcentagem de grãos com ruptura total do tegumento e endosperma inteiro foi do tratamento de secagem de 40°C, sendo este de 80%. Os demais tratamentos oscilaram entre 56,66% a 73,33%. Os tratamentos de 60 e 100°C apresentaram a maior porcentagem de grãos com ruptura total do tegumento e endosperma danificado, sendo de 20%. Conforme ocorrido para a direção da largura, deformações específicas acima de 14% o desempenho da ruptura para a direção do comprimento independente do tratamento de secagem reduz-se. Utilizando a deformação de 16% a maior porcentagem de grãos com ruptura total do tegumento e endosperma inteiro foi no tratamento de 40°C, apresentando 66,66%. Os demais tratamentos

variaram entre 56,66 a 63,33%. O tratamento de 100°C apresentou a maior porcentagem de grãos com ruptura total do tegumento e endosperma danificado, sendo de 43,33%. Os demais tratamentos variaram entre 20% a 26,66%.

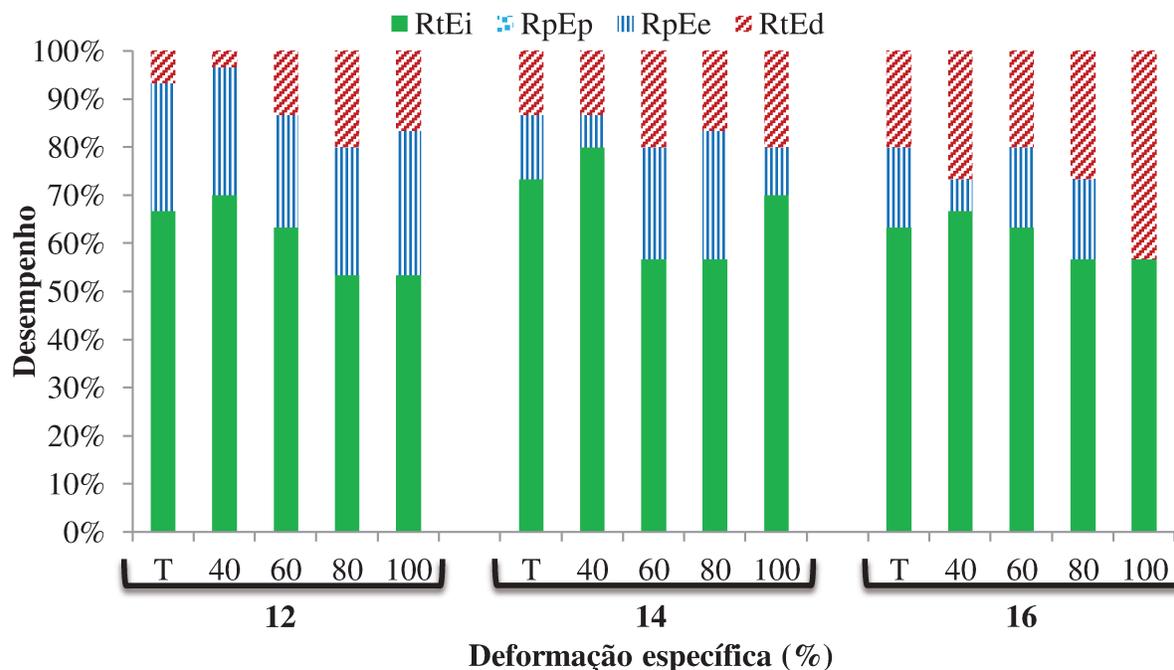


Figura 40. Desempenho da ruptura dos grãos de mamona através do impacto único e direcionado na *ruptura total do tegumento com endosperma inteiro* (RtEi), *ruptura parcial do tegumento com endosperma protegido* (RpEp), *ruptura parcial do tegumento com endosperma exposto* (RpEe) e *ruptura total do tegumento com endosperma danificado* (RtEd), expresso em porcentagem, para todos os tratamentos de secagem a diferentes deformações específicas ao longo da direção do Comprimento.

O gráfico de superfície 3D ilustrado na Figura 41 indica-nos a porcentagem de grãos com ruptura total do tegumento e endosperma inteiro para a direção do comprimento nos diferentes tratamentos térmicos e deformações específicas. Verifica-se que o tratamento de secagem de 40°C utilizando a deformação específica limite de 14% apresentou a maior porcentagem, indicando-nos que temperaturas mais elevadas podem prejudicar a decorticação dos grãos. Nota-se também uma elevação da porcentagem para a temperatura de 100°C e deformação específica de 14%, este fato pode ter ocorrido devido a grande variabilidade dos valores de teor de água nos grãos ou mesmo devido a uma quantidade de grãos com melhor qualidade de desenvolvimento presente neste ensaio, ocorrido mesmo com a aleatoriedade das amostras.

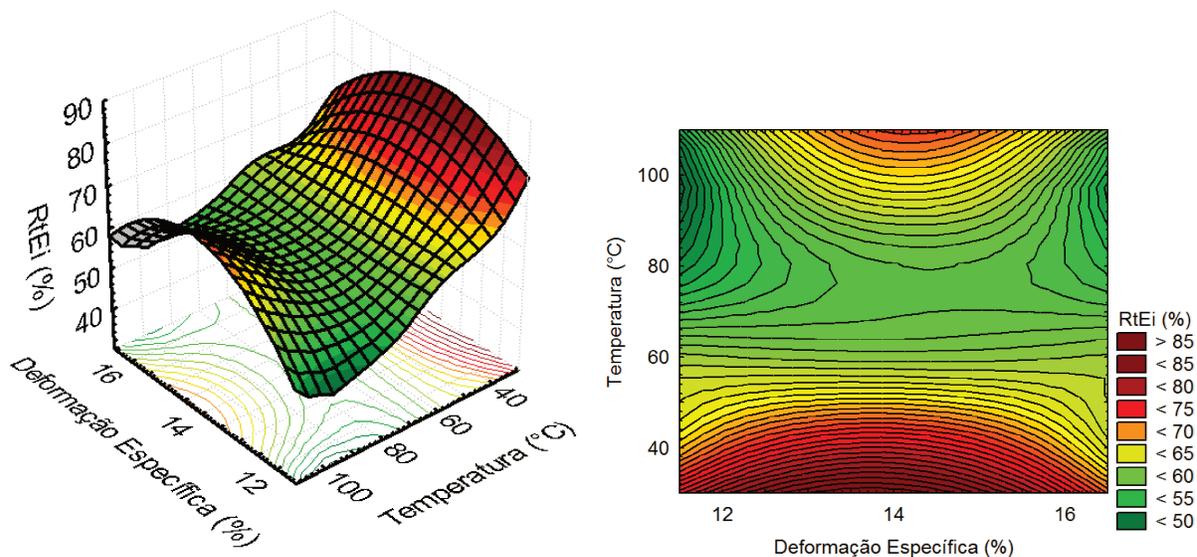


Figura 41. Gráfico de superfície 3D para a porcentagem de *grãos com ruptura total da casca com endosperma inteiro* (RtEi) para os diferentes tratamentos térmicos e deformações específica na direção do Comprimento.

Os teores de água médios apresentados foram de 5,96% (b.u.) \pm 0,66% para os grãos (CV – 10,42%), 4,34% (b.u.) \pm 0,47% para o endosperma (CV – 10,78%) e de 9,95% (b.u.) \pm 1,26% para o tegumento (CV – 12,68%). Pode-se verificar que o tegumento retém grande quantidade de água, 229% superior a do endosperma. Isto demonstra que a cinética de secagem deve ser considerada para cada parte constituinte do grão se a finalidade for à decorticação dos mesmos. O teor de água dos grãos demonstram uma redução não muito significativa após os 2 meses de armazenamento dos grãos, pois o teor de água médio dos grãos após os tratamentos de secagem foi de 6,60% (b.s.) \pm 1,81%. Mas verificou-se uma homogeneização expressiva do teor de água dos grãos durante este armazenamento, demonstrada pelos coeficientes de variação que reduziram de 27,36% para 10,42%.

Pode-se verificar, de uma forma geral neste experimento, que temperaturas de secagem abaixo de 60°C, incluindo a secagem em Terreiro, propiciaram uma maior porcentagem de grãos com ruptura total do tegumento e endosperma inteiro, independente da deformação específica utilizada, indicando-nos que temperaturas de secagem superiores podem comprometer a decorticação dos grãos de mamona.

4.5.4. Influência de diferentes deformações específicas com tratamentos de secagem adicionais

Após a exposição dos grãos a secagem com ar forçado por 15 minutos com as respectivas temperaturas observou-se uma redução do teor de água. Os teores de água médios apresentados foram de 4,82% (b.u.) \pm 1,18% para os grãos (CV – 24,45%), 3,77% (b.u.) \pm 0,68% para o endosperma (CV – 18,11%) e de 8,50% (b.u.) \pm 1,60% para o tegumento (CV – 18,80%). Ocorreu uma redução média no teor de água de 13% no endosperma e de 15% no tegumento com relação aos ensaios sem os tratamentos de secagem adicionais. Esta redução do teor de água, principalmente no endosperma, foi observada em alguns ensaios, onde o endosperma se tornou mais quebradiço, reduzindo sua resistência ao impacto. Isto demonstra-nos que nos tratamentos de secagem com temperaturas mais elevadas, o tempo de exposição do grão ao ar foçado deve ser reduzido, pois neste ensaio foi excessivo. O tratamento de secagem de terreiro não foi utilizado nesta investigação.

A Figura 42 apresenta o resultado do desempenho obtido na ruptura do tegumento através dos ensaios de alta taxa de deformação para a direção da largura nos tratamentos de secagem de 40, 60, 80 e 100°C com tratamentos de secagem adicionais de 15 minutos. Utilizando a deformação específica de 10%, a maior porcentagem de grãos com ruptura total do tegumento e endosperma inteiro foi o tratamento de secagem de 40°C, chegando a 56,66%. Os demais tratamentos variaram entre 36,66 a 53,33%. O tratamento de 100°C apresentou a maior porcentagem de grãos com ruptura total do tegumento e endosperma danificado, sendo de 23,33%. Na deformação específica de 14%, a maior porcentagem de grãos com ruptura total do tegumento e endosperma inteiro foi do tratamento de secagem de 60°C, sendo este de 56,66%. Os demais tratamentos variaram entre 16,66% a 53,33%. O tratamento de 100°C apresentou a maior porcentagem de grãos com ruptura total do tegumento e endosperma danificado, sendo de 53,33%. Utilizando a deformação de 18% a maior porcentagem foi no tratamento de 60°C, apresentando 33,33% de grãos com ruptura total do tegumento e endosperma inteiro. Os demais tratamentos variaram entre 16 a 26,66%. O tratamento de 80°C apresentou a maior porcentagem de grãos com ruptura total do tegumento e endosperma danificado, sendo de 83,33%. Os demais tratamentos variaram entre 43,33% a 73,33%.

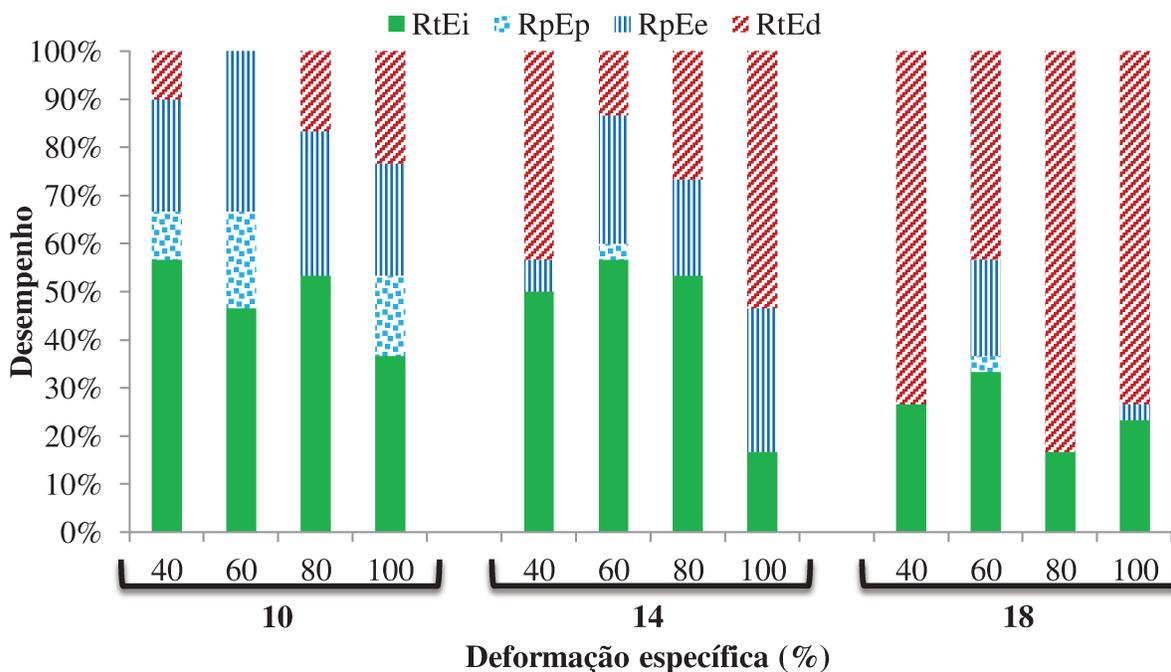


Figura 42. Desempenho da ruptura dos grãos de mamona através do impacto único e direcionado na *ruptura total do tegumento com endosperma inteiro* (RtEi), *ruptura parcial do tegumento com endosperma protegido* (RpEp), *ruptura parcial do tegumento com endosperma exposto* (RpEe) e *ruptura total do tegumento com endosperma danificado* (RtEd), expresso em porcentagem, para os tratamentos de secagem de 40, 60, 80 e 100°C com tratamento adicional de 15 minutos, a diferentes deformações específicas ao longo da direção da Largura.

O gráfico de superfície 3D ilustrado na Figura 43 indica-nos a porcentagem de grãos com ruptura total do tegumento e endosperma inteiro para a direção da largura nos diferentes tratamentos térmicos e deformações específicas com tratamentos de secagem adicional de 15 minutos. Há indicações que a maior porcentagem seria entre o tratamento de secagem de 40 e 60°C utilizando deformação específica de entre 10 e 14%. Temperaturas e deformações específicas superiores reduziu-se significativamente a porcentagem.

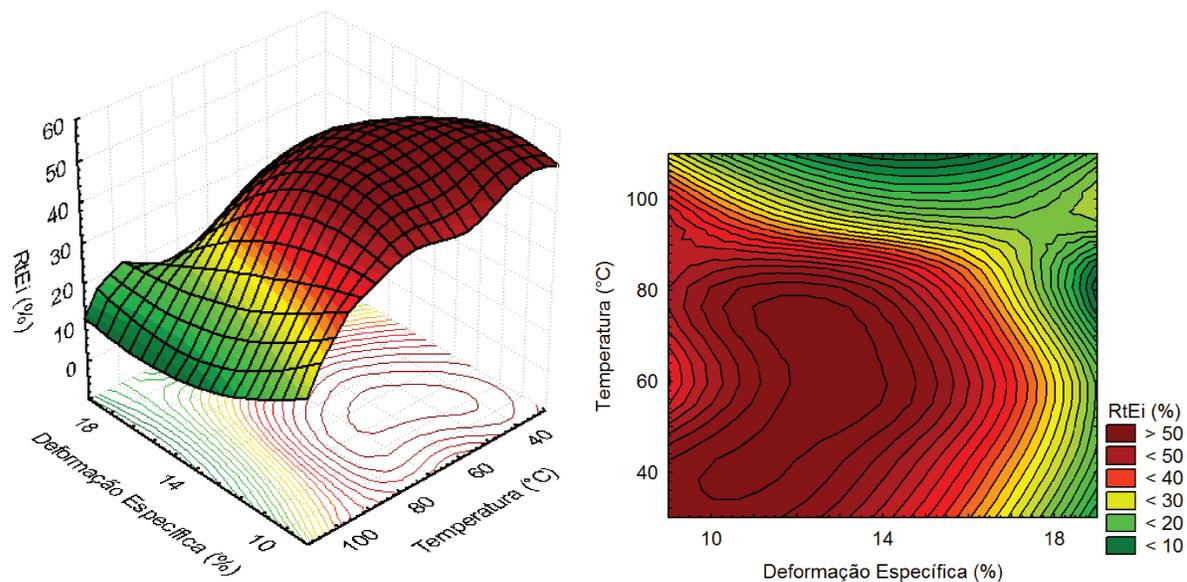


Figura 43. Gráfico de superfície 3D para a porcentagem de *grãos com ruptura total da casca com endosperma inteiro* (RtEi) para os diferentes tratamentos térmicos e deformações específica na direção da Largura com tratamento adicional de 15 minutos.

A Figura 44 apresenta o resultado do desempenho obtido na ruptura do tegumento através dos ensaios de alta taxa de deformação para a direção do comprimento nos tratamentos de secagem de 40, 60, 80 e 100°C com tratamentos de secagem adicionais de 15 minutos. Apenas neste ensaio e para esta direção as deformações específicas foram reduzidas, pois com a redução do teor de água do tegumento e esta posição sendo a mais propícia a ruptura, o tegumento ficaria mais sensível a deformações elevadas. Utilizando a deformação específica de 10%, a maior porcentagem de grãos com ruptura total do tegumento e endosperma inteiro foi nos tratamentos de secagem de 40 e 80°C, chegando a 70%. Os demais tratamentos variaram entre 50,00 a 60,00%. O tratamento de 100°C apresentou a maior porcentagem de grãos com ruptura total do tegumento e endosperma danificado, sendo de 36,66%. Isto pode ter ocorrido devido à redução excessiva do teor de água do grão. Na deformação específica de 12% a maior porcentagem de grãos com ruptura total do tegumento e endosperma inteiro foi do tratamento de secagem de 40°C, sendo este de 86,66%. Os demais tratamentos variaram entre 56,66% a 70,00%. O tratamento 100°C apresentou a maior porcentagem de grãos com ruptura total do tegumento e endosperma danificado, sendo de 30%. Utilizando a deformação de 14% a maior porcentagem foi no tratamento de 60°C, apresentando 76,66% de grãos com ruptura total do tegumento e endosperma inteiro. Os demais tratamentos variaram entre 46,66 a 70,00%. O tratamento de 100°C apresentou a maior porcentagem de grãos com ruptura total

do tegumento e endosperma danificado, sendo de 43,33%. Os demais tratamentos oscilaram entre 3,33% a 30,00%.

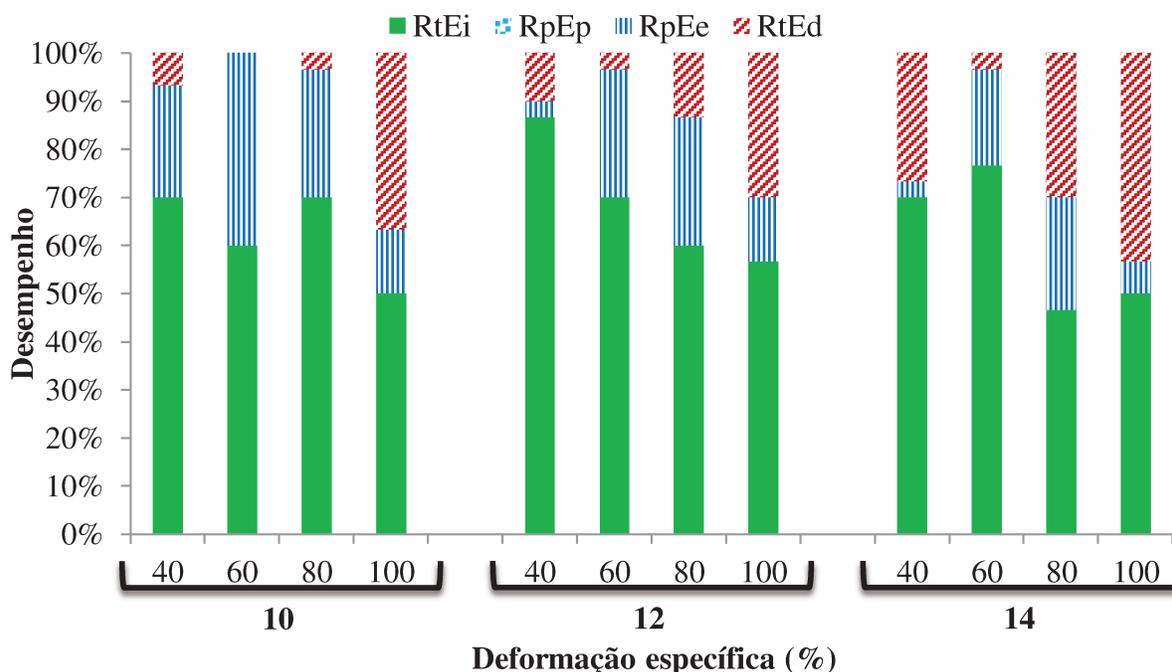


Figura 44. Desempenho da ruptura dos grãos de mamona através do impacto único e direcionado na ruptura total do tegumento com endosperma inteiro (RtEi), ruptura parcial do tegumento com endosperma protegido (RpEp), ruptura parcial do tegumento com endosperma exposto (RpEe) e ruptura total do tegumento com endosperma danificado (RtEd), expresso em porcentagem, para os tratamentos de secagem de 40, 60, 80 e 100°C, com tratamento adicional de 15 minutos, a diferentes deformações específicas ao longo da direção do Comprimento.

O gráfico de superfície 3D ilustrado na Figura 43 indica-nos a porcentagem de grãos com ruptura total do tegumento e endosperma inteiro para a direção do comprimento nos diferentes tratamentos térmicos e deformações específicas com tratamentos de secagem adicional de 15 minutos. Observa-se que para a temperatura de 60°C com o aumento da deformação específica ocorreu um acréscimo na porcentagem. Inversamente, para a temperatura de 80 e 100°C com o aumento da deformação específica ocorreu uma redução na porcentagem. Para a temperatura de 40°C verifica-se um aumento na porcentagem com o aumento da deformação, apresentando o maior valor utilizando a deformação específica de 12%, valores superiores de deformação específica a porcentagem reduziu-se. Conforme o observado para a direção da largura, indica-nos que temperaturas e deformações específicas superiores reduz-se significativamente a porcentagem.

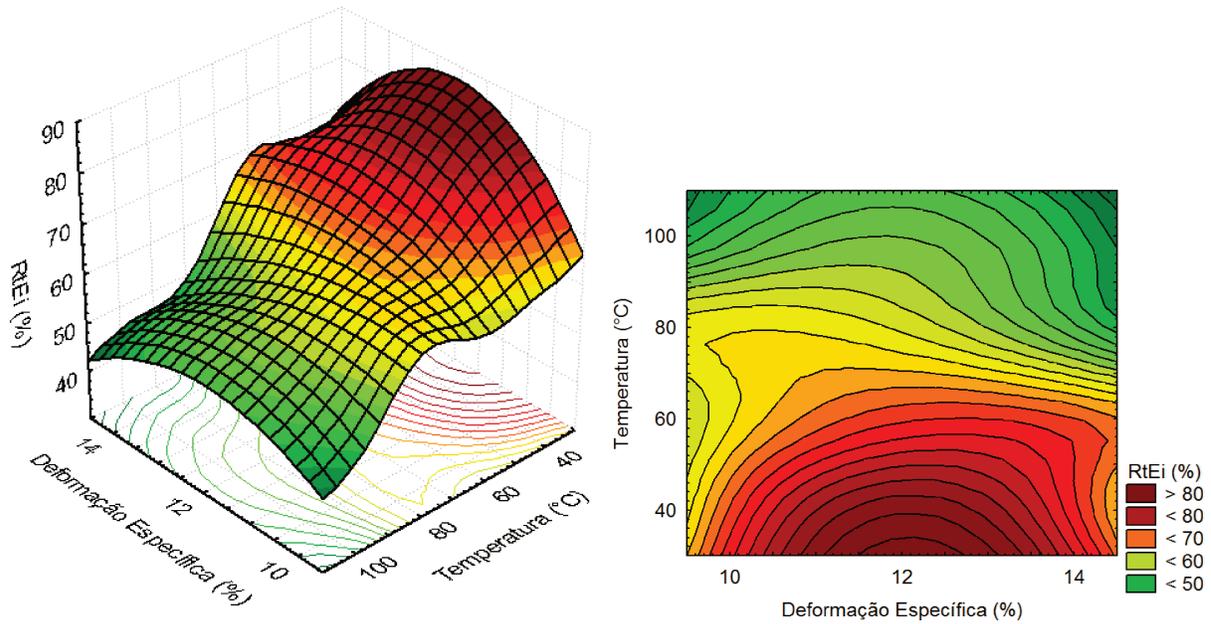


Figura 45. Gráfico de superfície 3D para a porcentagem de *grãos com ruptura total da casca com endosperma inteiro* (RtEi) para os diferentes tratamentos térmicos e deformações específica na direção do Comprimento com tratamento adicional de 15 minutos.

Com estes resultados apresentados, verificou-se que a exposição dos grãos de mamona de cada tratamento a novos tratamentos de secagem com as respectivas temperaturas reduziu-se expressivamente a porcentagem de grãos com ruptura total do tegumento e endosperma inteiro, independente da posição. A ocorrência desta queda na porcentagem deve ser devido à retirada excessiva de água do grão aumentando a fragilidade do endosperma, principalmente nos tratamentos de secagem acima de 60°C.

4.6. Análise da qualidade do óleo

A tabela 11 demonstra os valores obtidos da análise de acidez, índice de peróxido e teor de água do óleo com os respectivos coeficientes de variação. Segundo a classificação comercial do óleo de mamona tipo 1 (ABOISSA, 2010) a acidez, expressa em porcentagem de ácido oleico, não deve ser superior à 1,00 %, o índice de peróxido deve ser de no máximo 10 meq.kg⁻¹ amostra (ANVISA, 1999) e o teor de água do óleo não deve ser superior a 3750 ppm após extração do óleo dos grãos.

Tabela 11. Valores médios obtidos para acidez, índice de peróxido (IP) e teor de água do óleo com os respectivos coeficientes de variação.

Tratamento de secagem	Acidez (%)	CV (%)	IP (mEq.kg⁻¹ amostra)	CV (%)	Teor de água do óleo (ppm)	CV (%)
Terreiro	0,09 e	13,32	0,80 a	12,50	3862 d	8,13
40°C	0,13 c	8,66	0,70 ab	0,00	5132 b	2,71
60°C	0,11 d	0,00	0,60 abc	16,67	4468 c	1,66
80°C	0,22 b	0,00	0,50 bc	0,00	5960 a	3,51
100°C	0,64 a	0,91	0,40 c	25,00	6414 a	1,28

Médias seguidas da mesma letra na coluna não diferem estatisticamente entre si (Tukey, p<0,05).

Apesar da acidez do óleo de todos os tratamentos de secagem estarem dentro do limite permitido pela classificação comercial, os valores indicam que o aquecimento dos frutos de mamona durante a secagem causou um aumento significativo da acidez com a elevação da temperatura de secagem. Os valores indicam que a secagem efetuada no terreiro apresentou a menor acidez, 0,09%, enquanto que os frutos secos com a temperatura de 100°C apresentaram acidez de 0,64%. Isso tendência que secagens efetuadas com temperaturas superiores a 100°C poderão ocasionar maior acidificação do óleo, e conseqüentemente, queda na classificação comercial e perda de preço no mercado. Os coeficientes de variação apresentaram abaixo de 13,32%, demonstrando variabilidade média dos resultados experimentais (GOMES, 1985).

O índice de peróxido apresentou valores bem abaixo do estabelecido pela ANVISA (1999), sendo o valor máximo de 0,80 mEq.kg⁻¹ amostra para o tratamento de secagem efetuado no terreiro. A variação dos valores médios foi inversa ao enc ontrados na Acidez, pois com o acréscimo da temperatura de secagem o índice de peróxido reduziu-se, mas não tão significativamente. Apenas no tratamento de secagem de 100°C apresentou alta variabilidade dos valores, apresentando coeficiente de variação de 25%, os demais tratamentos apresentaram valores inferiores a 16,67%, demonstrando que este índice é muito variável ou o número de repetições efetuadas foi pequeno para esta análise. Mas estes valores são aceitáveis, pois são muito inferiores ao estabelecido pela ANVISA (1999).

Os valores de teor de água do óleo indicam também uma ascensão com o acréscimo da temperatura de secagem, similar ao ocorrido com a Acidez. Este fato deve ter ocorrido devido a redução no tempo de secagem, e com altas temperaturas, a água retirada foi apenas a água adsorvida, superficialmente à superfície sólida no interior dos grãos, não havendo tempo para as trocas de calor e redução da água absorvida do grão, retida por forças capilares nos interstícios da matéria seca (BORÉM, 2008).

Pode-se notar que a secagem efetuada no terreiro, de forma lenta e gradativa, apresentou valores médios de teor de água 40% inferiores aos de secagem efetuada a temperatura de 100°C. Nenhum dos tratamentos de secagem apresentaram valores de teor de água dentro dos padrões comerciais do óleo de mamona tipo 1, sendo o teor de água máximo de 3750 ppm. Apenas o tratamento de secagem no Terreiro se enquadra nos padrões comerciais tipo 3, onde o teor de água máximo é de 5000 ppm. Para atingir o padrão comercial com relação ao teor de água, seriam necessários procedimentos adicionais para efetuar a retirada de água do óleo, demandando maior gasto energético na indústria.

COSTA (2006) avaliou a qualidade do óleo extraído a frio de grãos de mamona das cultivares BRS-149 Nordeste e BRS-188 Paraguaçu encontrado valores de acidez de 0,83% e 0,12%, índice de peróxido de 0,57 mEq.kg^{-1 amostra} e 0,10 mEq.kg^{-1 amostra}, e de teor de água de 4400 ppm e 5000 ppm, respectivamente para as cultivares. Os valores encontrados pelo autor difere-se dos encontrado para a cultivar AL Guarany 2002, mas dentro dos padrões comerciais para o óleo de mamona tipo 1, exceto no teor de água que se assemelham ao encontrados neste experimento. O autor não mencionou quais os procedimentos de pós-colheitas e o teor de água dos grãos anteriormente a extração do óleo, sendo estes parâmetros importantes para a obtenção de óleos de qualidade. Esta comparação da qualidade de óleos de diferentes cultivar é importante, pois na indústria não se classifica por cultivar ou métodos de pós colheita, apenas por ser óleo de mamona conforme classificação comercial.

5. CONCLUSÕES

Dos ensaios realizados podemos concluir que:

- Devido à heterogeneidade do amadurecimento dos frutos de mamona, secagens realizadas a baixas temperaturas podem ser prejudicadas, demandando maior atenção no procedimento.
- A secagem dos frutos de mamona a diferentes temperaturas influencia nas propriedades mecânicas dos grãos de mamona.
- Apesar da variabilidade dos valores apresentados, pode-se verificar que com o aumento da temperatura de secagem a força de ruptura e a energia de ruptura do tegumento na direção do comprimento reduziram-se, e inversamente, com o aumento da temperatura de secagem estes valores para a direção da largura elevaram-se.
- A deformação específica de 14% apresentou a maior porcentagem de grãos com ruptura total do tegumento e liberação do endosperma inteiro, independente da direção e do tratamento de secagem, sendo esta a deformação específica limite.
- A direção da largura demonstrou desempenho inferior à posição do comprimento na ruptura total do tegumento e liberação do endosperma inteiro e sem danos, independente do tratamento de secagem.
- O endosperma do grão de mamona interfere na resistência do tegumento, pois a deformação necessária para a ruptura do grão é superior ao espaçamento estimado existente entre os mesmos, mesmo utilizando altas taxas de deformação.
- O desempenho da decorticação dos grãos de mamona pode ser afetado com grãos secos a temperaturas mais elevadas, acima de 60°C, pois a retirada excessiva de água do endosperma prejudica sua resistência deixando-o mais frágil.
- A exposição dos grãos de mamona a tratamentos adicionais de secagem por 15 minutos reduziu a porcentagem de grãos com ruptura total do tegumento e liberação do endosperma inteiro, principalmente em temperaturas acima de 60°C, devido à retirada demasiada de água no endosperma, evidenciando que este tempo foi excessivo.
- A qualidade do óleo pode ser afetada pelo tratamento de secagem dos frutos de mamona, mas temperaturas inferiores a 100°C apresentaram qualidade dentro dos padrões comerciais para o óleo de mamona tipo 1.

– O equipamento DIRADEL demonstrou bom desempenho e repetitividades nos ensaios, sendo sua utilização importante para a redução do tempo de ensaios e aumento expressivo na quantidade de repetições.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Pode-se verificar neste trabalho que a resistência dos grãos de mamona, principalmente o endosperma, é influenciada pelo teor de água. Desta forma, novos estudos devem ser efetuados para verificar a resistência do grão a diferentes teores de água levantando novamente as propriedades mecânicas dos grãos tais como força máxima de ruptura, deformação específica e Rigidez, a diferentes teores de água. Aliado a isto, um estudo da cinética de secagem de cada componente do grão de mamona, endosperma e tegumento, far-se-á necessário para verificar qual a perda de água deste componente a diferentes temperaturas de secagem, podendo assim, determinar o tempo de exposição do grão a secagem para se obter o teor de água desejado em cada componente e efetuar o estudo das propriedades mecânicas do grão.

Neste trabalho, apenas foram efetuados o levantamento das propriedades mecânicas e físicas dos grãos de mamona, não sendo definido ou projetado um dispositivo capaz de decorticar os grãos e reduzir as perdas aqui citadas na indústria de extração de óleo. Como sugestão, o desenvolvimento, projeto e construção de um decortificador de grãos de mamona poderá ser efetuado tendo como embasamento este trabalho, com os dados e a experiência aqui adquirida, podendo assim promover uma redução dos custos no processo de extração do óleo de mamona e melhoria na qualidade do óleo.

Outro ponto a ser analisado são os mecanismos de extração de óleo empregado na indústria, utilizando prensa tipo expeller, que necessitam de atrito e teor de fibras para uma extração eficiente. A retirada total do tegumento dos grãos de mamona poderá prejudicar esta extração do óleo, pois com ele o coeficiente de atrito e o teor de fibras são elevados. Deve ser efetuado um estudo se realmente é necessário este tegumento para a extração do óleo dos grãos de mamona em prensas tipo expeller ou, se necessário, analisar a quantidade mínima para a extração sem prejudicar o processo, promovendo uma redução do custo operacional nos procedimentos posteriores a extração.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABOISSA – Óleos Vegetais. Produtos: **Óleo de mamona**. Disponível em <http://www.aboissa.com.br/>. Acessado em: 10/11/2010.

AGICO GROUP – Anyang General International Co. **Product**. Disponível em: <http://www.ayimpex.com/> Acesso em: 18/11/2010.

ANSELMO, G. C. S. *et. al.* Desenvolvimento e avaliação de um descascador de mamona de acionamento manual. In: III Congresso Brasileiro de Mamona, 2008, Salvador. **Anais...** Salvador: Embrapa, 2008.

ANVISA. Resolução nº 482, de 23 de setembro de 1999, Regulamento técnico para fixação de identidade e qualidade de óleos e gorduras vegetais, **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, p. 82 - 87, 1999.

AOCS - **Official Methods and Recommended Practices of the AOCS**. 5th edition, 1998.

ARAÚJO, M. C. **Caracterização mecânica da castanha de caju (*Anacardium occidentale L.*) para fins de beneficiamento e desenvolvimento de decortificador de cilindros rotativos**. 2005. 131 f. Tese (Doutorado) Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005.

ARAÚJO, M. C.; FERRAZ, A. C. O. Efeito da umidificação, tratamento térmico e deformação sobre a decorticação da castanha de caju 'CCP 76' por meio de impacto único e direcionado. **Engenharia Agrícola**, v. 26, p. 335-653, 2006.

ARAÚJO, M.C.; FERRAZ, A.C.O. Características físicas e mecânicas do endocarpo e da amêndoa da castanha de caju 'CCP 76' antes e após tratamento térmico. **Engenharia Agrícola**. v. 28, n.3, p. 565-578, 2008.

ARAÚJO, M.C. et al. Design characteristics and performance evaluation of a cashew nut decorticator based on limited high rate deformation. In: CIGR-International Conference of Agricultural Engineering e XXXVIII CONBEA, 2008, Foz do Iguaçu. **Anais....**, 2008, p. 1-3.

ASAE Standards. 2002. **S410.1**: Moisture measurement: Peanuts. St. Joseph, Mich. ASAE.

AZEVEDO, D. M. P.; LIMA, E.F. **O Agronegócio da mamona no Brasil**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2001. 350p.

AZEVEDO, D.M.P.; BELTRÃO, N.E. **O Agronegócio da Mamona no Brasil**. 2ª ed. Brasília: Embrapa Informação tecnológica, 2007. 504 p.

BARGALE, P. C.; IRUDAYARAJ, J.; MARQUIS, B. Studies on Rheological Behaviour of Canola and Wheat. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 61, n. 4, p. 267-274, 1995.

BIODIESELBR. História da mamona. Disponível em: <http://www.biodieselbr.com/plantas/mamona/historia-mamona.htm>. Acessado em: 30/11/2010.

BORÉM, F. M. **Pós-colheita do café**. Lavras; Editora UFLA, 2008. 631 p.

BRAGA, G. C. et al. Mechanical behavior of macadamia nut under compression load. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v.72, p.239-245, 1999.

- BRASIL. Ministério da Agricultura e Reforma Agrária. Secretaria Nacional de defesa Agropecuária. **Regras para Análise de Sementes**. Brasília, 365p, 1992.
- BROOKER, D. B.; BAKKER-ARKEMA, F. W.; HALL, C. W. **Drying and storage of grains and oilseeds**. Westport: AVI, 450 p., 1992.
- CAMPOS, H. R.; PRADO, O. T.; VENTURINI, W. R. Sistema de aplicação de torta de mamona e fertilizantes minerais na adubação da cebola. **Bragantia**. Campinas, v. 22, n. único, 1963.
- CARVALHO, M. L. M.; ALVES, R. A.; OLIVEIRA, L. M. Radiographic analysis in castor bean seeds (*Ricinus communis L.*). **Revista brasileira de sementes**, v. 32, n. 1, p. 170-175, 2010.
- CHEN, C. Factors which affect equilibrium relative humidity of agricultural products. **Transactions of the ASAE**, v.43, p. 673-683, 2000.
- CONAB Companhia Nacional de Abastecimento, **Série histórica**. 2009. Disponível em: www.conab.gov.br. Acessado em: 16/10/2010.
- COSTA, T. L. **Características físicas e físico-químicas do óleo de duas cultivares de mamona**. 2006. 113f. Dissertação (mestrado) - Centro de Ciências e Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2006.
- DORSA, R. **Tecnologia de Óleos Vegetais**. Campinas: Ideal, 2004.
- DUNNING, J.W. Processing of Castor Beans. **Journal of the American Oil Chemists' Society**, v. 31, n. 7, p. 290-291, 1954.
- ECIRTEC Equipamentos e Acessórios Industriais Ltda. **Produtos**. Disponível em: <http://www.ecirtec.com.br> Acesso em: 18/11/2010.
- ELIAS, Moacir Cardoso (coordenador) Projeto CNPq Código: 5.07.02.114. **Temperatura dos grãos na secagem e tempo de armazenamento nas características químicas e físico-químicas dos óleos de mamona e soja para produção de biocombustíveis**. UFPeL, Pelotas-RS, 2006.
- FAN, J.; SIENBENMORGEN, T.J.; MARKS, B.P. Effects of variety and harvest moisture content on equilibrium of moisture contents of rice. **Applied Engineering in Agriculture**, v.16, p. 245-251, 2000.
- FAOSTAT - Food And Agriculture Organization Of The United Nations, **Production, Crops**, 2008. Disponível em: <http://faostat.fao.org/site/567/default.aspx#ancor>. Acessado em: 16/11/2010.
- FERRAZ, A. C. O.; FABBRO, D.; M, I.; SILVA, J. M.; AMARAL, R.; RODRIGUES, A. L. G.; PENTEADO, S. R.. Projeto e desenvolvimento de um sistema processador para quebra de frutos de Teca com liberação de sementes. **Engenharia Agrícola**, v. 18, n. 1, p. 52-58, 1997.
- FERRAZ, A. C. O.; PESSOA, J. D. C.; GOMES, D. . Propriedades físicas e mecânicas para decorticação da castanha-do-Brasil. In: V Congresso Ibero-americano de Tecnologia Postcosecha y Agroexportaciones, 2007, Cartagena. Tecnologia, Calidad y Seguridad Hortofrutícola: **Anais...**, p. 818-825, 2007.

FRANÇA, P. R. C. et. al. Confeção e avaliação de uma máquina descascadora de frutos de *Ricinus communis L.* da cultivar BRS Nordestina. In: IV Congresso Brasileiro de Mamona, 2010, João Pessoa. Inclusão Social e Energia: **Anais...** Campina grande: Embrapa Algodão, p. 1515-1520, 2010.

FREIRE, R. M. M. **EMBRAPA - Cultivo da mamona**. Sistemas de Produção, 4 – 2ª edição ISSN 1678-8710 Versão Eletrônica Set-2006. Disponível em: http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Mamona/CultivodaMamona_2ed/index.html. Acessado em: 05/07/2009.

FREIRE, R. M. M. Ricinoquímica. In: AZEVEDO, D.M.P. de; LIMA, E.F. **O agronegócio da mamona no Brasil**. Comunicação para transferência de tecnologia, p. 295-335, 2001.

GELY M, SANTALLA EM. Higroscopic properties of castor seeds (*Ricinus Comunis L.*). **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, v.26, n. 1, p. 181-188, 2009.

GOMES, F.P. **Curso de Estatística Experimental**. 11ª Edição. Piracicaba: Livraria Nobel, 466 p., 1985.

GONELI, A. L. D. *et al.* Propriedades físicas dos frutos de mamona durante a secagem. **Revista Brasileira de Armazenamento**, v. 33, p. 148-155, 2008.

GONELI, A.L.D. **Variação das propriedades físico-mecânicas e da qualidade da mamona (*Ricinus communis L.*) durante a secagem e o armazenamento**. 2008. 199f. Tese (doutorado), Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2008.

GOYUM SCREW PRESS – Oil Expeller Division. Products – Decorticator. Disponível em: <http://www.oilmillmachinery.com/> Acesso em: 18/11/2010.

GUPTA, R. K.; DAS, S. K. Performance of centrifugal dehulling system for sunflower seeds. **Journal of Food Engineering**, v. 42, p. 191-198, 1999.

GUPTA, R.K., DAS, S.K. Fracture resistance of sunflower seed and kernel to compressive loading. **Journal of Food Engineering**, v. 46, n. 1, p. 01-08, 2000.

HALL, C.W. **Drying and storage of agricultural crops**. Westport: AVI, 381 p., 1980.

HEMERLY, F.X. **Mamona: comportamento e tendência no Brasil**. Brasília: EMBRAPA – DTC, 69p. (EMBRAPA-DCT. Documento, 2), 1981.

HENRY, Z. A.; SU, B.; ZHANG, H. Resistance of Soya Beans to Compression. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v.76, n. 2, p. 175-181, 2000.

JAIN, R.K.; KUMAR, S. Development of a cashew nut Sheller. **Journal of Food Engineering**, n. 32, p. 339-345, 1997.

KNOWLTON, T. et al. **The importance of storage, transfer and collection**. Chemical Engineering Progress, n. 90, p. 44-54, 1994.

LEUBNER, G. **Endospermic seed structure (*Eudicots*): Euphorbiaceae - castor bean - *Ricinus communis***.2007. Disponível em: <http://www.seedbiology.de/structure.asp>. Acessado em: 15/12/2009.

LIANG, T. A new processing system for maximizing macadamia nut kernel recovery. **Transactions of the ASAE**, v. 20, n.3, p. 438-443, 1977.

LIANG, T. Designing a constant deformation macadamia nut cracker. **Transaction of the ASAE**, v. 23, n.5, p. 1093-1096, 1980.

LIMA, C. C. et al. Caracterização química de resíduos da produção de biodiesel compostados com adição mineral. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, n. 3, 2009.

MACEDO, F. C. O. et al. Tolerância à seca em genótipos de mamona. In: III Congresso Brasileiro de Mamona, 2008, Salvador. **Anais...** Salvador: Embrapa, 2008.

MACÊDO, L.R.;WAGNER,W.J. **Revisão bibliográfica sobre a cultura da mamona**. Belém: SUDAM/DSP, 35p., 1984.

MANZANO, Adilson. (adilson@ecirtec.com.br). Descascadores de mamona [Mensagem pessoal]. Mensagem recebida por adriano.bastos@feagri.unicamp.br em 27 fev. 2010.

MAPA. Portaria nº 65, de 16 de fevereiro de 1993, Norma de identidade, qualidade, embalagem, marcação e apresentação da mamona, **Diário Oficial da União**, Seção 1, p. 2225, 1993.

MASE, G.E. **Theory and problems of Continuum Mechanics**. New York: McGraw-Hill Book, 221 p., 1970.

MELO, W. C. et al. Acid and enzymatic hydrolysis of the residue from Castor Bean (*Ricinus communis L.*) oil extraction for ethanol production: detoxification and biodiesel process integration. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, vol.19, n.3, 2008a.

MELO, W. C. et al. Produção de etanol a partir de torta de mamona (*Ricinus communis L.*) e avaliação da letalidade da torta hidrolisada para camundongos. **Química Nova**, v. 31, n. 5, 2008b.

MENSAH, J.; NELSON, G.; HERUM, F.; RICHARD, T. G. Mechanical properties related to soybean seedcoat cracking during drying. **Transactions of the ASAE**. v. 27, n. 2, p. 550-555, 1984.

MIALHE, L. G.; RÍPOLI, T. C.; OMETTO, D. A. Estudo de um mecanismo descascador de mamona. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, 18º, 1989, Recife. **Anais...**Recife: SBEA, 1992. V.1, p. 143-158 apud AZEVEDO E BELTRÃO (2007).

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

NAG, K. **Development of a sunflower seed decorticator**. Kasetsart Biblioteca Universitária: Conferência Anual da Universidade Kasetsart, 2010, p. 100-115. Disponível em: <http://www.lib.ku.ac.th/KUCONF/KC2411006.pdf>. Acesso em: 18/11/2010.

NAKA, S. **Determinação das propriedades físicas dos grãos de mamona variedade ‘Guarany’ visando armazenagem em silos verticais**. 2010. 106 f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2010.

NÓBREGA et al. Germoplasma. In: AZEVEDO, D.M.P.; BELTRÃO, N.E. **O Agronegócio da Mamona no Brasil**. 2ª ed. Brasília: Embrapa Informação tecnológica, 504 p., 2007.

OLAOYE, O.J., Some physical properties of Castor Nut relevant to the design of processing equipment. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v.77, n. 1, p. 113-118, 2000.

- OLIVEIRA, E. P.; SILVA, Z. E.; ALVES, S. B.; BARROS, A. C. F. Estudo da secagem de frutas e sementes de mamona na cadeia produtiva da mamona (*Ricinnus Communis L*). In: V Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, 2008, Salvador. **Anais...** Salvador: ABCM, 2008.
- OLIVEIRA, M. et al. Efeitos da temperatura do ar de secagem estacionária na qualidade do óleo de mamona. In: 1ª Reunião Técnica Anual de Pesquisa de Agroenergia - RS, Pelotas, 2007. **Anais...** Pelotas, 2007.
- PATIL, T. R. Development of castor depodder and decorticator. Science Tech Entrepreneur. Aug. 2010. Disponível em: http://www.techno-preneur.net/information-desk/sciencetech-magazine/2010/august10/Development_of_Castor.pdf. Acessado em: 30/09/2010.
- PELEG, M. Flow ability of food powders and methods for its evaluation- a review. **Journal of Food Processing Engineering**, v.1, p.303-328, 1977.
- PLAXTON, W. The Plaxton Lab. Plant biochemistry & metabolic control. Disponível em: <http://post.queensu.ca/~plaxton/> Acessado em: 30/09/2010.
- QIAOPAI – Grains & oil seed – Shelling expert. **Products**. Disponível em: <http://www.qiaopai.com>. Acesso em: 18/11/2010.
- RAMOS, N. P. et al. Semeadura do híbrido Lyra de mamona (*Ricinus communis L.*) sob plantio direto. **Ciência e agrotecnologia**, v. 32, n. 2, p. 481-486, 2008.
- RATTI, C. Shrinkage during drying of foodstuffs. **Journal of Food Engineering**, v. 23, n. 1, p. 91-105, 1994.
- RESENDE, O. et al. Comportamento mecânico dos grãos de feijão submetidos a compressão. **Revista brasileira de engenharia agrícola e ambiental**, v.11, n.4, p. 404-409, 2007.
- RIBEIRO, D. M. et al. Propriedades mecânicas dos grãos de soja em função do teor de água. **Engenharia Agrícola**, v.27, n.2, p. 493-500, 2007.
- RITTNER, H. **Óleo de Mamona e Derivados**. Editado pelo autor. 1996.
- RODRIGUES, A.L.G. **Utilização de indentes cônicos associados ao impacto para quebra da noz macadâmia**. 92p. Dissertação (Mestrado). Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1996.
- ROSSI, S.J.; ROA, G. **Secagem e armazenamento de produtos agropecuários com uso de energia solar e ar natural**. Campinas: ACIESP. 1990. 295p. Publicação ACIESP nº 22.
- RUFFATO, S.; COUTO, S. M.; QUEIROZ, D. M. Módulo de elasticidade de grãos de milho submetidos a impactos mecânicos. **Revista brasileira de engenharia agrícola e ambiental**, v. 5, n.1, p. 101-106, 2001.
- SANTOS, F. S. et al. Adubação orgânica, nutrição e progresso de cercosporiose e ferrugem-do-cafeeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 43, n. 7, 2008.
- SEGERLING, L.J.; DAL FABBRO, I. A failure criterion for apple flesh. **Transactions of the ASAE**, n. 78-3556, 1978.
- SEVERIANO, L.S. et al. Variabilidade no percentual do tegumento da semente de mamona e sua importância para o melhoramento. **Revista Ciência Agronômica**, v. 40, n. 1, p. 94-98, 2009.

SOKHANSANJ, S.; LANG, W. Prediction of kernel and bulk volume of wheat and canola during adsorption and desorption. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 63, p. 129-136, 1996.

TANG, G.P.; LIANG, T.; MUNSHMEYER, F. A variable deformation macadamia nut cracker. **Transactions of the ASAE**, v. 25, n.6, p. 1506-1511, 1982.

TUDE-AKINNTUNDE, T.Y.; AKINTUNDE, B.O. Some physical properties of sesame seed. **Biosystems Engineering**, v. 88, p.127-129, 2004.

UNICAMP. Faculdade de Engenharia Agrícola. Kil Jin Park, *et al.* **Secador convectivo conjugado de fluxo perpendicular e/ou paralelo ao leito de secagem**. BR n. PI0003447-9, 21/07/2000, 02/01/2008.

ZUCHI, J. et al. Influência do aumento da temperatura de secagem na qualidade de sementes de mamona. In: 1ª Reunião Técnica Anual de Pesquisa de Agroenergia - RS., Pelotas, 2007. **Anais...** Pelotas, 2007.

ZUCHI J, PESKE S, BEVILAQUA G. Retardamento de colheita, método de secagem e qualidade de sementes de mamona. **Revista brasileira de sementes**, v. 31, n.3, p. 09-15, 2009.

8. APÊNDICE

8.1. Apêndice 1 – Procedimento simplificado para realização de ensaios com o DIRADEL

A Figura 45 numera e ilustra as partes componentes do DIRADEL necessárias para sua operação onde: 1 – Plataforma; 2 – Êmbolo; 3 – Sensor ótico; A – Caixa de comando; B – Cilindro pneumático.

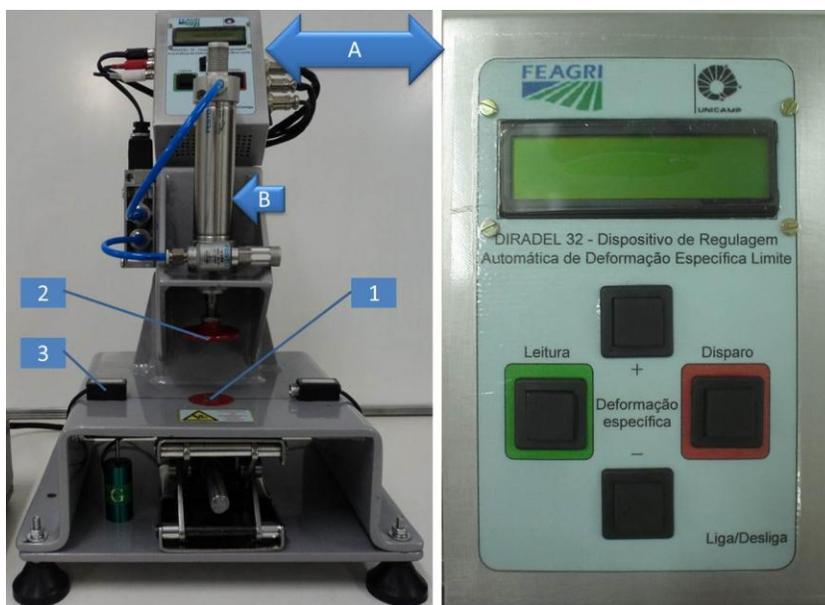


Figura 46. Vista frontal do DIRADEL com destaque ao painel de controle do equipamento.

Inicialmente deve-se conferir se todos os cabos estão ligados adequadamente na Caixa de comando (A). Liga-se então o equipamento através do Botão Liga/Desliga posicionado na lateral da caixa de comando, verificando se não há erros informados no display do equipamento. O produto é então posicionado adequadamente na Plataforma (1) na direção que se deseja ensaiar e Pressiona-se o botão “Leitura”, onde a Plataforma (1) descerá até que o feixe laser do Sensor ótico (3) seja detectado, medindo-se a dimensão do Produto em milímetros, informando-a no display do equipamento. A deformação específica a ser testada deve ser informada através dos botões + ou -, e indicada no visor do equipamento em porcentagem. Deve-se então, pressionar o botão “Disparo”, o qual se posiciona o Produto com a deformação específica desejada. Mantendo-se pressionado o botão “Disparo” por 3 segundos o golpe é efetuado pelo Cilindro Pneumático (B) e o Êmbolo (2) atua na deformação do produto. Após este procedimento a Plataforma (1) retorna para a posição de inicial de forma

que o operador possa fazer a avaliação do grau de ruptura do produto e iniciar um novo ensaio. Caso pressione o botão “Disparo” por tempo inferior a 3 segundos, o disparo é abortado e a Plataforma (1) retorna para a posição inicial.

8.2. Apêndice 2 – Lista dos Componentes eletrônicos utilizados para a construção do DIRADEL

- 3 resistores de 10kW;
- 4 resistores de 560W;
- 1 resistor de 150W;
- 1 resistor de 1kW;
- 3 capacitores de 100n;
- 1 capacitor de 100μF;
- 1 capacitor de 10Nf;
- 1 capacitor de 1μF;
- 2 capacitores de 27pF;
- 1 CI 7805 (Regulador de tensão linear);
- 1 CI PIC18F452 da Microchip (microcontrolador);
- 1 CI 4N25 (Acoplador óptico);
- 1 transistor BC548;
- 5 transistores IRF630
- 1 diodo 1N4001;
- 5 diodos UF4001;
- 1 chave seletora de três posições;
- 1 CON3;
- 1 Motor de passo com passo de 1,8° e 200 passos por rotação, 3A;
- 1 sensor óptico;
- 1 display de LCD;
- 1 solenoide;
- 1 potenciômetro de 10k;
- 1 cristal oscilador;