

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

SECAGEM DE CEVADA:
UMA ANÁLISE EXPERIMENTAL DA ANATOMIA E DO MEIO DE TRANSPORTE

Marcos Paulo Felizardo
Aluno de Pós-Graduação

Prof. José Teixeira Freire
Orientador PPGEQ/UFSCAR

São Carlos, março de 2018

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

SECAGEM DE CEVADA:
UMA ANÁLISE EXPERIMENTAL DA ANATOMIA E DO MEIO DE TRANSPORTE

Marcos Paulo Felizardo
Aluno de Pós-graduação

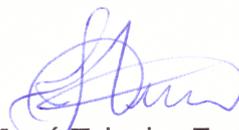
Prof. José Teixeira Freire
Orientador PPGEQ/DEQ/UFSCAR

Tese apresentada como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de doutor em Engenharia Química, área de concentração em Pesquisa e Desenvolvimento de Processos Químicos

São Carlos, março de 2018

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA DEFESA DE TESE DE MARCOS PAULO FELIZARDO APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS, EM 23 DE MARÇO DE 2018.

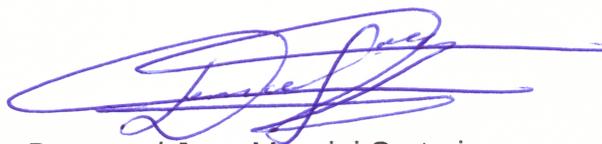
BANCA EXAMINADORA:



José Teixeira Freire
Orientador, UFSCar



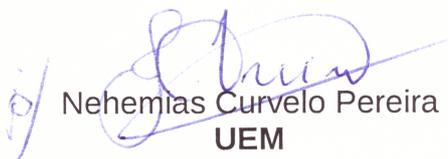
Gustavo Dias Maia
UFSCar



Dermeval Jose Mazzini Sartori
UFSCar



Maria Angélica Martins Costa
UNESP



Nehemias Curvelo Pereira
UEM

Dedico este trabalho com muito amor e carinho à minha família.

AGRADECIMENTOS

Primeramente a Deus, que me ama e colocou muitas pessoas mais que especiais que encontrei na minha vida. A Ele que me deu força nos momentos de maiores angústias. A Ele que me mostrou o amor nos momentos de solidão.

Aos meus pais, que receberam a árdua missão de me cuidar e fizeram isso da forma mais bela. O amor que existe em mim, vocês me deram e jamais serei capaz de retribuir. Mas serei eternamente grato.

A minha família que me apoia em todos os momentos, sempre serei grato por Deus me presentear com tanto amor.

Ao amor que encontrei, Wilian, você foi um presente de Deus. Obrigado por todo apoio nesse final!

Aos meus amigos e companheiros destes anos Ubiranilson, Liliana, Paula, Maísa, Hugo, Ariany, Bruna, entre muitos outros. Sem o apoio, as conversas e as risadas, estes anos teriam sido muito mais difíceis. Vocês são incríveis!

A todos os amigos, colegas e companheiros de minha graduação, centro de secagem e vida. Muito obrigado!

A Professora Maria Angélica, que desde minha iniciação científica acreditou em mim. Me apoiou durante estes anos e não me deixou cair. Eu não tenho palavras para agradecer sua amizade e seu carinho. Você é um anjo que Deus me deu a felicidade de conhecer e conviver.

Ao Grande Professor José Teixeira Freire pelo amor, carinho e dedicação. Seus ensinamentos são grandes e precisarei de outras vidas para ser tão grande.

Ao Professor Dermeval que me ensinou muito durante o mestrado, com muito carinho e dedicação. Muito obrigado!

Ao Professor Fábio Freire que sempre foi um incentivador durante estes anos.

Ao Professor Gustavo que é um amigo, sempre me apoiou em diversos momentos de dificuldades.

Aos Professores do Centro de secagem e aos técnicos do DEQ/UFSCar.

Ao Edilson Milaré que sempre se dispôs a trabalhar comigo e pelas conversas de apoio.

Ao Sr. Oscar que sempre com muito carinho me ajudou na elaboração de diversas partes de equipamentos.

A todos que direta e indiretamente me ajudaram, como já disse Deus me deu a oportunidade de conhecer inúmeras pessoas especiais e é difícil nomeá-las. A todos estes meu muito obrigado!

A CNPq e a CAPES pelo auxílio financeiro.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Imagem microscópica dos (a) tecidos externos ao endosperma e do (b) centro do endosperma.	4
Figura 2	Localização dos (a) carboidratos, (b) proteínas, (c) β -glicanas e (d) arabinoxilanas nas paredes das células vegetais do endosperma das sementes de cevada.	5
Figura 3	Imagem microscopia dos carboidratos (S) e proteínas (P).	6
Figura 4	Curva característica da umidade em base úmida em função do tempo de maceração.	7
Figura 5	Padrões de hidratação da cevada após 6 horas de umidificação e 18 horas de descanso ao ar a temperatura de 27°C mostrando o conteúdo de umidade medido por meio de raios-x nas seguintes regiões: (a) ventral, (b) meio do endosperma, (c) dorsal e (d) centro do endosperma.	9
Figura 6	Umidade em função do tempo de umidificação a 22°C para duas variedades (Sebastian e Cervoise) das sementes de (A) cevada inteira e (B) endosperma.	10
Figura 7	Perfis de umidades ao longo dos diâmetros da seção transversal da cevada para umidificação a temperatura de 25° C após (a) 6 horas e (b) 36 horas e 10°C após (c) 6 horas e (d) 36 horas.	11
Figura 8	Umidade em função do tempo parametrizada na temperatura, com os dados (a) experimentais e (b) simulação e ajuste de modelos	12
Figura 9	Imagens da seção longitudinal das sementes de cevada secas após 2, 3, 4, e 5 dias de germinação.	12
Figura 10	Medida do (a) comprimento, (b) largura, (c) espessura e (d) esfericidade de sementes de cevada em função da umidade em base seca.	13
Figura 11	Esfericidade em função da umidade em base seca, conforme as Equações 2 e 3.	15

Figura 12	Varição da esfericidade em função da umidade em base seca.	16
Figura 13	Taxa de secagem em função do adimensional de umidade durante a secagem em leito de jorro.	22
Figura 14	Imagem projetada de uma partícula com os quadros formados pelas retas tangentes ao contorno.	29
Figura 15	Esquemática do sistema experimental de sonda linear	35
Figura 16	Esquemática da unidade de fluidodinâmica e secagem em leito fixo e fluidizado.	37
Figura 17	Esquemática da unidade de secagem de corpos submersos.	44
Figura 18	Imagem de um grão de cevada implantado.	46
Figura 19	Disposição dos grãos de cevada para os experimentos de secagem com partículas isoladas submersas.	47
Figura 20	Detalhes da célula de medida para leito fixo com escoamento tangencial.	48
Figura 21	Detalhes das células de medidas de leito fixo com escoamento de ar intersticial.	49
Figura 22	Resultados da (a) massa relativa e (b) taxa da redução de massa em função do tempo de polimento.	53
Figura 23	Imagens das (a) superfícies das lixas e das (b) sementes ao longo dos dias de polimento.	54
Figura 24	Imagem dos três materiais obtidos após impactos dos grãos de cevada: (a) partículas da casca, (b) grãos quebrados e (c) grãos sem casca.	55
Figura 25	Imagem dos materiais na etapa de polimento: (a) grãos de cevada sem casca e (b) grãos de cevada polidos.	55
Figura 26	Resultados do teste de Tukey HSD para as diferenças entre as médias das amostras com 15 grãos para as medidas do (a) diâmetro máximo, (b)	56

diâmetro mínimo, (c) área projetada e (d) esfericidade.

Figura 27	Resultados do teste de Tukey HSD para as diferenças entre as médias das amostras com 45 grãos para as medidas do (a) diâmetro máximo, (b) diâmetro mínimo, (c) área projetada e (d) esfericidade.	57
Figura 28	Dimensões relativas em função do tempo de polimento.	58
Figura 29	Esfericidade relativa em função do tempo de polimento.	59
Figura 30	Comprimento relativo em função da umidade em base úmida durante reumidificação dinâmica parametrizado no tempo de polimento.	61
Figura 31	Largura relativa em função da umidade em base úmida durante reumidificação dinâmica parametrizada no tempo de polimento	62
Figura 32	Esfericidade relativa em função da umidade em base úmida durante reumidificação dinâmica parametrizada no tempo de polimento	63
Figura 33	Largura, comprimento e área projetada relativos em função da umidade em base úmida durante processo de reumidificação dinâmica para grãos inteiros	63
Figura 34	Largura, comprimento e área projetada relativos em função da umidade em base úmida durante processo de reumidificação dinâmica para grãos polidos por cinco dias.	64
Figura 35	Comprimento dos grãos inteiros de cevada com reumidificação estática e dinâmica.	65
Figura 36	Largura dos grãos inteiros de cevada com reumidificação estática e dinâmica.	65
Figura 37	Comprimento dos grãos polidos (5 dias) de cevada com reumidificação estática e dinâmica.	66
Figura 38	Largura dos grãos polidos (5 dias) de cevada com reumidificação estática e dinâmica.	67
Figura 39	Volume médio relativo de um grão em função da umidade em base úmida para grão de cevada inteiro e polido.	67

Figura 40	Esfericidade bidimensional em função da umidade em base úmida para grãos inteiros para reumidificação estática e dinâmica.	68
Figura 41	Esfericidades em função da umidade em base úmida de grãos inteiros para reumidificação estática e dinâmica.	69
Figura 42	Esfericidade bidimensional em função da umidade em base úmida de grãos polidos para reumidificação estática e dinâmica.	69
Figura 43	Esfericidades em função da umidade em base úmida de grãos polidos para reumidificação estática e dinâmica.	70
Figura 44	Fração mássica retida em peneiras de diferentes aberturas de malha para as sementes de cevada, núcleo e casca moídos.	71
Figura 45	Imagens de microscopia óptica das partículas retidas nas peneiras de abertura de malha nas faixas de (a) 0,71 até 0,85 mm, (b) 0,6 até 0,71 mm, (c) 0,355 até 0,425 mm e (d) 0,212 até 0,250 mm.	72
Figura 46	Imagens de microscopia óptica das partículas do núcleo moído retidas nas peneiras de abertura de malha nas faixas de (a) 0,3 até 0,355 mm, (b) 0,25 até 0,3 mm, (c) 0,212 até 0,25 mm e (d) 0,18 até 0,212 mm.	73
Figura 47	Imagens de microscopia óptica das partículas das sementes de cevada moídas retidas nas peneiras de abertura de malha nas faixas de (a) 0,3 até 0,355 mm, (b) 0,25 até 0,3 mm, (c) 0,212 até 0,25 mm e (d) 0,18 até 0,212 mm.	73
Figura 48	Imagens de microscopia óptica das partículas da casca moída retidas nas peneiras de abertura de malha nas faixas de (a) 0,3 até 0,355 mm, (b) 0,25 até 0,3 mm, (c) 0,212 até 0,25 mm e (d) 0,18 até 0,212 mm.	74
Figura 49	Massa específica real em função dos ciclos de injeção de hélio no picnômetro.	75
Figura 50	Massa específica do leito em função do número de batidas longitudinais da proveta graduada para grãos moídos, inteiros e polidos.	77
Figura 51	Massa específica relativa do leito empacotado em função do tempo de polimento.	78
Figura 52	Massa específica aparente dos grãos em função da umidade em base	79

úmida para cevada inteira.

Figura 53	Massa específica do leito em função do número de batidas parametrizado na umidade em base úmida para grãos inteiros.	80
Figura 54	Imagens das superfícies da proveta contendo leitos formados por grãos inteiros com (a) $(4,9\pm 0,3)\%$, (b) $(12,2\pm 0,2)\%$, (c) $(20,0\pm 0,4)\%$ e (d) $(30,8\pm 0,3)\%$ de umidade em base úmida.	81
Figura 55	Massa específica do leito em função do número de batidas parametrizado na umidade em base úmida para grãos polidos.	82
Figura 56	Imagens das superfícies da proveta contendo leitos formados por grãos polidos com (a) $(6,83\pm 0,11)\%$, (b) $(11,70\pm 0,04)\%$, (c) $(20,01\pm 0,08)\%$ e (d) $(30,16\pm 0,07)\%$ de umidade em base úmida.	82
Figura 57	Porosidade interpartículas em função do número de batidas parametrizado na umidade em base úmida para grãos inteiros.	84
Figura 58	Porosidade interpartículas em função do número de batidas parametrizado na umidade em base úmida para grãos inteiros.	85
Figura 59	Condutividade térmica efetiva do meio poroso em função da porosidade do leito para os produtos da moagem da casca e dos grãos de cevada.	88
Figura 60	Imagens de microcopia óptica das faces (a) dorsal e (b) ventral dos grãos sem casca e das faces (c) dorsal e (d) ventral dos grãos inteiros.	90
Figura 61	Adimensional da queda de pressão em função da velocidade do ar, parametrizado em diferentes tempos de polimento.	91
Figura 62	Velocidade mínima de fluidização em função do tempo de polimento para defluidização.	92
Figura 63	Queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar durante a fluidização.	93
Figura 64	Permeabilidade do meio poroso em função do tempo de polimento.	93
Figura 65	Umidade em base seca em função do tempo parametrizado nos tempos de polimento.	95

Figura 66	Difusividade efetiva em função da fração mássica removida durante a reumidificação dinâmica.	96
Figura 67	Temperaturas em função do tempo de imersão em escoamento de ar para grão inteiro seco submerso.	97
Figura 68	Temperaturas em função do tempo de imersão em escoamento de ar para grão inteiro úmido submerso.	98
Figura 69	Temperatura no centro do grão ($r=0$) em função do tempo de imersão em escoamento de ar para diferentes condições dos grãos de cevada.	99
Figura 70	Temperatura na superfície ($r=R$) em função do tempo de imersão em escoamento de ar.	100
Figura 71	Temperatura do fluido em função do tempo durante os experimentos de transferência de calor com partícula isolada submersa.	101
Figura 72	Calor diferencial de varredura em função do tempo para grão inteiro e polido seco.	101
Figura 73	Calor diferencial de varredura em função do tempo para grão inteiro e polido úmido.	102
Figura 74	Temperatura em função do tempo durante a fluidização de grãos inteiros secos.	103
Figura 75	Temperatura em função do tempo durante a fluidização de grãos inteiros úmidos.	103
Figura 76	Temperatura de entrada no leito fluidizado em relação ao tempo.	104
Figura 77	Temperatura de saída no leito fluidizado em relação ao tempo.	105
Figura 78	Temperaturas em diferentes posições axiais do leito fixo em relação ao tempo para grãos inteiros secos.	106
Figura 79	Temperaturas em diferentes posições axiais do leito fixo em relação ao tempo para grãos polidos secos.	107

Figura 80	Temperaturas em diferentes posições axiais do leito fixo em relação ao tempo para grãos inteiros úmidos.	108
Figura 81	Temperaturas em diferentes posições axiais do leito fixo em relação ao tempo para grãos polidos úmidos.	108
Figura 82	Temperaturas em $z=0,3$ cm em relação ao tempo para diferentes condições dos grãos de cevada.	109
Figura 83	Temperaturas em $z=1$ cm em relação ao tempo para diferentes condições dos grãos de cevada.	109
Figura 84	Temperaturas em $z=2$ cm em relação ao tempo para diferentes condições dos grãos de cevada.	110
Figura 85	Temperatura no centro ($z=0$) em função do tempo de imersão de leito em escoamento de ar.	111
Figura 86	Adimensional de umidade em função do tempo de imersão de grãos de cevada isolados submersos em escoamento de ar.	112
Figura 87	Taxa de secagem em função da umidade para grãos de cevada isolados em escoamento de ar.	112
Figura 88	Adimensional de umidade em função do tempo de secagem em leito fluidizado.	113
Figura 89	Taxa de secagem em função da umidade para grãos de cevada fluidizados.	114
Figura 90	Adimensional de umidade em função do tempo de secagem de grãos de cevada em leito fixo com escoamento de ar intersticial (perpendicular).	115
Figura 91	Taxa de secagem em função da umidade para grãos de cevada em leito fixo com escoamento de ar intersticial (perpendicular).	115
Figura 92	Adimensional de umidade em função do tempo de secagem de grãos de cevada em leito fixo sem escoamento de ar intersticial (tangencial).	116
Figura 93	Taxa de secagem em função da umidade para grãos de cevada em leito	117

fixo sem escoamento de ar intersticial (tangencial)

Figura 94	Adimensional de umidade em função do tempo de secagem de grãos inteiros de cevada em diferentes meios de secagem	118
Figura 95	Adimensional de umidade em função do tempo de secagem de grãos polidos de cevada em diferentes meios de secagem	119
Figura 96	Taxa de secagem em função da umidade para grãos inteiros de cevada em diferentes meios de secagem	119
Figura 97	Taxa de secagem em função da umidade para grãos polidos de cevada em diferentes meios de secagem	120

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Umidade em base úmida dos diferentes tecidos das sementes de cevada a 13°C.	8
Tabela 2	Mudanças na distribuição de água durante a germinação.	8
Tabela 3	Medidas das dimensões das sementes de cevada inteiras separadas.	6
Tabela 4	Resultados experimentais de massa específica e porosidade total do leito para grãos inteiros e polidos.	57
Tabela 5	Resultados experimentais de massa específica e porosidade total do leito para grãos de cevada, núcleo e casca moídos.	83
Tabela 6	Massas específicas do leito e porosidades para as diferentes técnicas de empacotamento.	84
Tabela 7	Condutividade térmica e porosidade do leito de sementes de cevada inteiras e polidas.	86

LISTA DE SÍMBOLOS

a	Constante da placa de orifício	$\text{m}^3/\text{min}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1/2}$
c	Coeficiente de Forchheimer	(-)
C	Comprimento do grão de cevada	(mm)
D	Difusividade Mássica da Água	(m^2/s)
E	Espessura do grão de cevada	(mm)
h	Perda de carga	(cmH_2O)
H	Altura do leito fixo	(m)
K	Condutividade térmica	($\text{w}/\text{m}^\circ\text{C}$)
L	Largura do grão de cevada	(mm)
P	Pressão	(Pa)
q	Calor linear	(W/m)
r	Raio	(m)
R	Raio do grão, equivalente a um cilindro	(m)
t	Tempo	(s)
T	Temperatura	($^\circ\text{C}$)
\dot{V}	Vazão volumétrica	(m^3/min)
v	Velocidade superficial do ar	(m/s)
X	Conteúdo de umidade	(-)
X^*	Adimensional de umidade	(-)
\bar{X}^*	Adimensional médio de umidade	(-)

Letras gregas

γ	Raíz da função de Bessel de primeira ordem	(-)
ε	Porosidade	(%)
κ	Permeabilidade	(m^2)
μ	Viscosidade dinâmica	(kg/m^3)
ρ	Massa específica	(g/cm^3)
φ	Esfericidade	(-)

Subscritos

ap	Aparente
bs	Base seca
eff	Efetivo
f	final
o	inicial
t	tempo

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	i
LISTA DE TABELAS.....	ix
LISTA DE SÍMBOLOS.....	x
SUMÁRIO.....	xi
ABSTRACT	xv
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1. Cevada	3
2.2. Aspectos morfológicos	3
2.3. Umidificação da cevada	6
2.4. Caracterização física.....	13
2.5. Secagem das sementes de cevada.....	16
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	26
3.1. Obtenção dos materiais	26
3.2. Dimensões, granulometria e forma dos grãos de cevada.....	29
3.3. Massas específicas da partícula e do sistema particulado	30
3.4. Porosidade da partícula e do sistema particulado	32
3.5. Condutividade térmica.....	33
3.6. Propriedades fluidodinâmicas	36
3.7. Reumidificação estática e dinâmica	40
3.7.1. Reumidificação dinâmica	40
3.7.2. Reumidificação estática	42
3.8. Experimentos de transferência de calor e massa	43
3.9. Análise e tratamento dos dados	50
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	52

4.1.	Obtenção dos materiais	52
4.2.	Propriedades físicas extensivas e intensivas	56
4.2.1.	Dimensões	56
4.2.2.	Dimensões e forma durante o polimento.....	58
4.2.3.	Dimensões durante a reumidificação dinâmica	60
4.2.4.	Dimensões com reumidificação estática	64
4.2.5.	Distribuição granulométrica do material moído	71
4.2.6.	Massa específica real dos materiais	74
4.2.7.	Massa específica do leito e o empacotamento.....	76
4.2.8.	Massa específica do leito durante o polimento.....	77
4.2.9.	Massa específica aparente e a umidade dos grãos	79
4.2.10.	Massa específica do leito e a umidade dos grãos	80
4.2.11.	Porosidade total dos grãos polidos e moídos	83
4.2.12.	Porosidade interpartículas	84
4.2.13.	Porosidade e o empacotamento	85
4.3.	Propriedades de transporte	87
4.3.1.	Condutividade térmica efetiva	87
4.3.2.	Propriedades fluidodinâmicas	90
4.3.3.	Difusividade mássica efetiva	94
4.4.	Transferência de Calor	96
4.4.1.	Partícula isolada	97
4.4.2.	Leito fluidizado	102
4.4.3.	Leito fixo	105
4.4.3.1.	Escoamento Perpendicular	105
4.4.3.2.	Escoamento tangencial.....	110
4.5.	Transferência de massa	111

4.5.1.	Partícula isolada	111
4.5.2.	Leito fluidizado	113
4.5.3.	Leito fixo	114
4.5.3.1.	Escoamento perpendicular	114
4.5.3.2.	Escoamento tangencial.....	116
4.5.4.	Meios de secagem.....	117
5.	CONCLUSÕES	121
6.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	123
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	124

RESUMO

Apesar das recentes motivações para aplicação na indústrias alimentícia, a caracterização dos grãos de cevada polido ainda são escassos na literatura. Com isso, o objetivo deste trabalho foi a análise experimental dos efeitos da anatomia vegetal e do meio de transporte no processo de secagem dos grãos de cevada. Os experimentos de polimento dos grãos de cevada foram realizados em tambor rotativo revestidos com lixa. Foram realizados experimentos para a avaliação das características físicas extensivas para grãos de cevada em diferentes níveis de polimento e dos grãos de cevada moídos e suas partes, além da caracterização das propriedades físicas intensivas dos meios porosos formados para estes materiais. Para estes materiais, foram medidas as propriedades de transporte, como: condutividade térmica efetiva em meio estagnado, permeabilidade, velocidade de mínima fluidização e difusividade mássica efetiva. Por fim, a transferência de calor e massa para grãos polidos (sem tecidos externo) e inteiros foram avaliadas por meio de medidas experimentais. Além disto, comparou-se os meios de secagem com partícula isolada submersa, leito fluidizado, leito fixo com escoamento intersticial (perpendicular) e leito fixo com escoamento tangencial. Verificou-se que em diferentes níveis de polimento as variações foram mais significativas na espessura dos grãos em relação as outras dimensões, além disto nas massas específicas dos meios porosos foram identificadas variações e estas correlacionadas com as variações dos grãos devido ao polimento. O processo de polimento em tambor rotativo possibilitou a retirada dos tecidos externos, onde para 5 dias de polimento não se observou os efeitos destes tecidos nas propriedades dos grãos polidos. Para este tempo foi retirado $(24,2 \pm 3,6)\%$ de massa da superfície. Foi possível a avaliação da transferência de calor e massa por meio destes meios de secagem e as caracterizações auxiliaram nas discussões dos dados. Os tecidos externos se mostraram uma barreira a transferência de calor e massa, além de serem uma resistência mecânica superficial nos grãos de cevada.

PALAVRAS-CHAVES: SECAGEM; TRANSFERÊNCIA DE CALOR; CARACTERIZAÇÃO FÍSICA; PARTÍCULA ISOLADA, FLUIDIZAÇÃO; LEITO FIXO.

ABSTRACT

Despite the recent motivations for application in the food industry, the characterization of polished barley grains is still scarce in the literature. In this way, the objective of this work was the experimental analysis of the effects of the plant anatomy and the transport medium on the drying process of the barley grains. The polishing experiments of the barley grains were carried out in rotary drum coated with sandpaper. Experiments were carried out to evaluate the extensive physical characteristics of barley grains at different polishing levels and ground barley grains and their parts, as well as the characterization of the physical properties of the porous media formed for these materials. For these materials, the transport properties were measured, such as: effective thermal conductivity in stagnant medium, permeability, minimum fluidization velocity and effective mass diffusivity. Finally, the transfer of heat and mass to polished grains (without external tissues) and whole grains were evaluated by means of experimental measurements. In addition, the drying media were compared with isolated submerged particle, fluidized bed, fixed bed with interstitial flow (perpendicular) and fixed bed with tangential flow. It was verified that in different levels of polishing the variations were more significant in the thickness of the grains in relation to the other dimensions, besides this in the specific masses of the porous media were identified variations and these were correlated with the variations of the grains due to the polishing. The rotary drum polishing process allowed the removal of external tissues, where for 5 days of polishing the effects of these tissues on the properties of the polished grains were not observed. For this time was removed $(24.2 \pm 3.6)\%$ of surface mass. The discussion of heat transfer and mass was carried out through the characterization of the grains and drying media. The external tissues were shown to be a barrier to heat transfer and mass, besides being a superficial mechanical resistance in the barley grains.

KEY-WORDS: DRYING; HEAT AND MASS TRANSFER; PHYSICAL CHARACTERIZATION; ISOLATED PARTICLE; FLUIDIZATION; FIXED BED.

1. INTRODUÇÃO

Os grãos de cevada têm como principal destinação a aplicação para malteação em todo o mundo. Os grãos malteados são importantes matérias-primas para as indústrias cervejeiras. Assim, muitos estudos de qualidade desta matéria-prima podem ser encontrados no meio científico.

A malteação consiste no processo de reumidificação das sementes até que se inicie a germinação (aproximadamente 45%), quando se alcança um determinado tamanho de radícula, o processo é interrompido com a secagem, reduzindo a umidade até que ocorra a morte fisiológica das sementes. Durante o processo de malteação, há o estímulo da atividade das enzimas, que quebram as longas cadeias de amidos em cadeias menores (açúcares) durante o processo de brasagem. Estes açúcares são importantes para o processo de fermentação e, portanto, na qualidade do produto final.

Na etapa de malteação ocorrem diversos fenômenos de transferência que são influenciados pela complexa estrutura morfológica destes grãos. Porém, nos estudos das descrições matemáticas destes fenômenos pouco se encontra da consideração da composição anatômica destes grãos.

Deste modo, verificou-se que os efeitos de tecidos e órgãos destas sementes são desprezados e são tratados de forma global, encobrendo os efeitos internos do processamento deste material.

Além disto, devido às características recentemente estudadas, como a presença da β -glicana, cada vez mais se tem aumentado o interesse destes grãos nas indústrias alimentícias. Isto se deve as características destes grãos, que quando foram inseridos na alimentação humana, demonstraram um grande potencial na redução dos índices glicêmicos. Tendo estas e outras vantagens, muitos estudos têm sido realizados para a inserção destes grãos tanto em pó ou de grãos sem casca na alimentação humana.

As farinhas obtidas dos grãos de cevada sem casca melhoram a qualidade de produtos de panificação, do ponto de vista da saúde. Além da utilização dos grãos como extensores da soja, milho e arroz.

Porém, apesar destes recentes apelos científicos no consumo dos grãos de cevada, pouco se encontra na literatura sobre caracterizações dos grãos após o seu

processamento mecânico, pois para o consumo na alimentação, geralmente, estes grãos passam por etapas de moagem e/ou de polimento. Estes processos mecânicos influenciam nas suas características físicas e de transporte, podendo alterar sua formação de meios porosos, além dos fenômenos de transferência de calor e massa.

Contudo, as caracterizações físicas e de transporte destes produtos derivados da cevada podem fornecer informações até mesmo para a semente utilizada para malteação. Pois estes processos mecânicos (moagem e polimento) permitem a separação das partes destes grãos e com a análise das propriedades destes materiais, pode-se entender como os efeitos das propriedades físicas e de transporte das partes influenciam no grão inteiro.

Com base nisto, o objetivo deste trabalho foi a análise experimental dos efeitos da anatomia vegetal e do meio de transporte no processo de secagem dos grãos de cevada.

Assim, para avaliarmos o objetivo geral, foram alcançados objetivos específicos, descritos a seguir.

- Estudo exploratório e analítico do processo de polimentos dos grãos de cevada;
- Caracterização dos grãos de cevada ao longo do processo de polimento;
- Caracterização dos grãos de cevada em relação a umidificação;
- Avaliação da influência dos tecidos externos nestas caracterizações;
- Determinação das condições de polimento em que os tecidos externos dos grãos de cevada não tinham mais efeito sobre as propriedades de transporte, e
- Estudo da transferência de calor e massa para grãos sem tecidos externos e inteiros.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Cevada

A principal forma de consumo da cevada é para a malteação na indústria cervejeira. Segundo Baik e Ullrich (2008), 2% das sementes de cevada produzida mundialmente são utilizadas para alimentação após polimento para retirada dos tecidos externos ao endosperma.

No Brasil, a produção de cevada foi de aproximadamente 330 mil toneladas no ano de 2013 de acordo com o IBGE (2014), sendo que a produção é concentrada predominantemente no estado do Paraná. O consumo nacional é principalmente para malteação, visando abastecer as indústrias cervejeiras nacionais.

Porém, segundo Santos, Couto e Andrade (2001), a demanda das sementes de cevada para suprir o consumo nacional é maior que a produção, sendo necessária uma grande importação dessa matéria-prima.

Em âmbito nacional tem-se uma diferença entre a produção e o consumo, o que torna imperativo a melhoria na qualidade do processamento a qualidade, reduzindo as perdas de matéria-prima e melhoria contínua do produto final. Para isso foram discutidos a seguir, os principais aspectos dos grãos de cevada e dos processos que são envolvidos até a malteação.

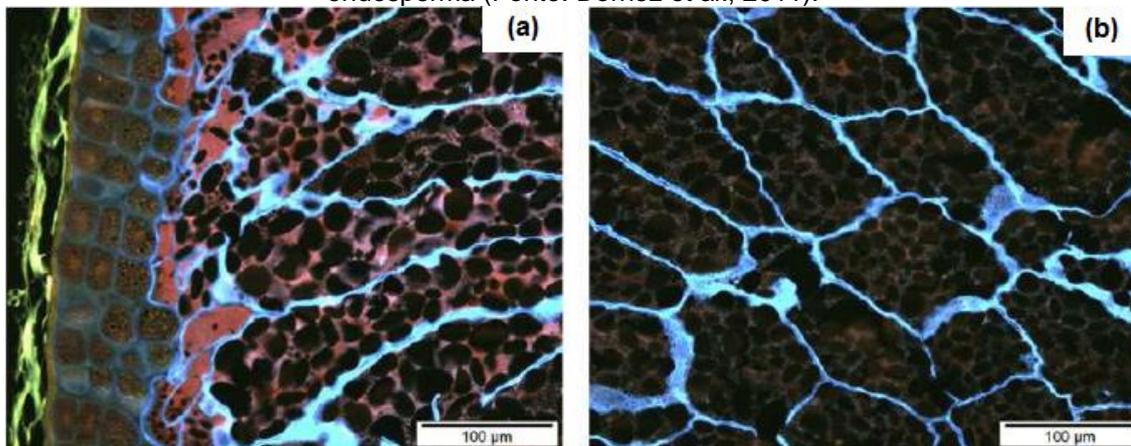
2.2. Aspectos morfológicos

Segundo Brookes, Lovett e Macwilliam (1976) a semente é composta pelo endosperma onde estão localizadas as reservas energéticas utilizadas durante a germinação, pelo embrião que contem os tecidos meristemáticos que formarão a plântula, pelo escutelo que tem grande importância na transferência de nutrientes do endosperma para o embrião durante a germinação e pelos tecidos de proteção que são a aleurona, pericarpo, testa e casca.

Na Figura 1 pode ser observada a imagem da seção transversal radial dos grãos de cevada, com ampliação da região dos tecidos externos e do centro do endosperma.

Através da Figura 1 podem ser observadas as distribuições das células vegetais, as paredes que as formam e os lumens das células presentes nos diferentes tecidos do endosperma que compõe as sementes de cevada.

Figura 1 - Imagem microscópica dos (a) tecidos externos ao endosperma e do (b) centro do endosperma (Fonte: Dornez et al., 2011).



Aprofundando mais a revisão na análise morfológica deste material, Dornez et al. (2011) e Jääskeläinen et al. (2013) afirmam que as paredes das células vegetais dos endospermas das sementes de cevada são formadas por microfibrilas de cadeias de β -glicanas com celulosas. Na Figura 2c pode-se observar que as cadeias de β -glicanas também se concentram nas regiões externas das paredes das células vegetais do endosperma. As arabinoxilanas (Figura 2d) e as β -glicanas são hemicelulose que apresentam regiões amorfas, estas distribuições das cadeias favorecem a absorção de água nas paredes celulares.

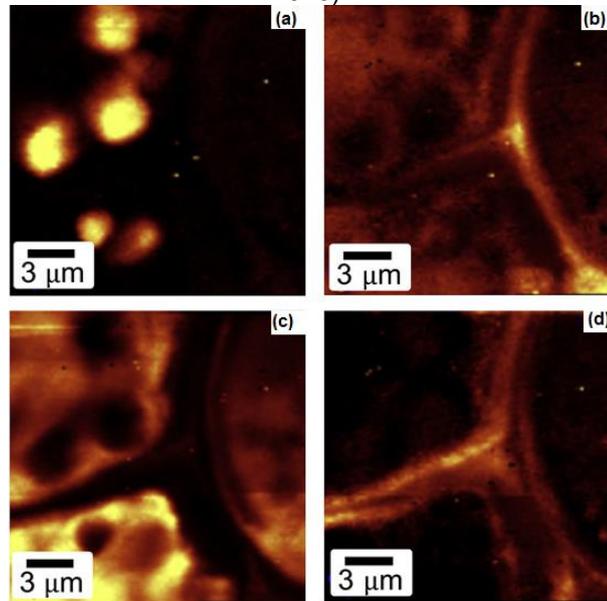
Segundo Jääskeläinen et al. (2013) os carboidratos e proteínas estão no lúmen das células vegetais do endosperma.

Sobre a composição e estrutura dos embriões e cascas dos grãos de cevadas, Henry (1988) afirma que o embrião é composto por uma concentração alta de açúcares e a casca é formada por cadeias de lignina, xilose, pentosanas e arabinoxilanas.

Estes compostos orgânicos são divididos em estruturais e não estruturais, devido as suas localizações nas paredes das células vegetais, os que estão localizadas nas paredes e os que estão presentes no lúmen, nos interstícios ou

espaços vazios entre as células, respectivamente (COZZOLINO; ROUMELIOTIS; EGLINTON, 2013).

Figura 2 - Localização dos (a) carboidratos, (b) proteínas, (c) β -glicanas e (d) arabinoxilanas nas paredes das células vegetais do endosperma das sementes de cevada (Fonte: Jääskeläinen et al., 2013).

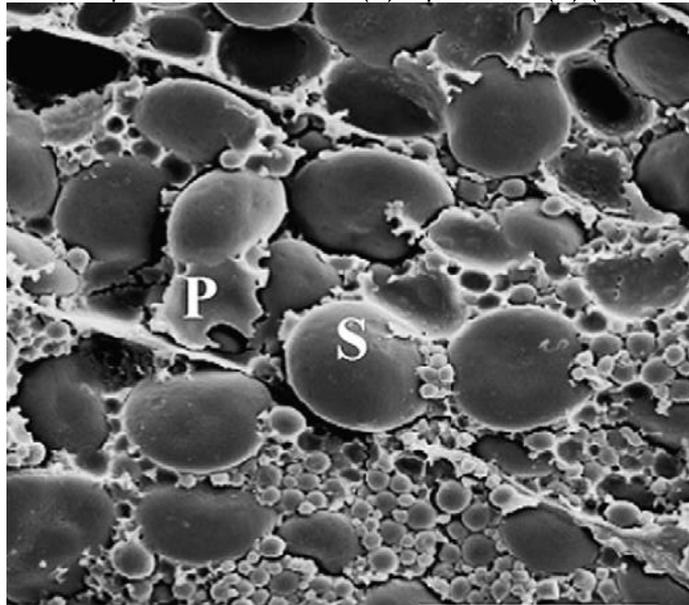


Os amidos e proteínas são classificados em compostos não estruturais e são importantes, pois são alguns dos principais nutrientes que compõe a reserva energética para o período de germinação (COZZOLINO; ROUMELIOTIS; EGLINTON, 2013; HENRY, 1988).

Na Figura 3 tem-se a microscopia da seção transversal do endosperma onde podem ser visualizados os amidos e proteínas presentes nos grãos de cevadas. Segundo Brookes, Lovett e Macwilliam (1976) os grânulos de amido apresentam duas faixas de diâmetro, onde os menores são consumidos e os maiores deteriorados durante a germinação.

Com base nisso, os estudos da morfologia vegetal e composição química das sementes de cevada são importantes para a melhor compreensão dos mecanismos de transferência de calor e massa. Toda a complexidade dessa formação vegetal influencia durante os processos de tais transferências, comuns durante os processos industriais, como a umidificação e a secagem.

Figura 3 - Imagem microscopia dos carboidratos (S) e proteínas (P) (Fonte: Dornez et al., 2011).



2.3. Umidificação da cevada

O processo de umidificação (ou maceração) é importante, pois com o aumento do conteúdo de umidade iniciam-se as atividades fisiológicas que darão formação aos tecidos das plântulas da cevada.

A influência dos tecidos e composição química da cevada durante a umidificação pode ser visualizada na Figura 4, que de acordo com Brookes, Lovett e Macwilliam (1976), os processos de umidificação das sementes de cevada com atividade fisiológica ativa ocorrem em três fases.

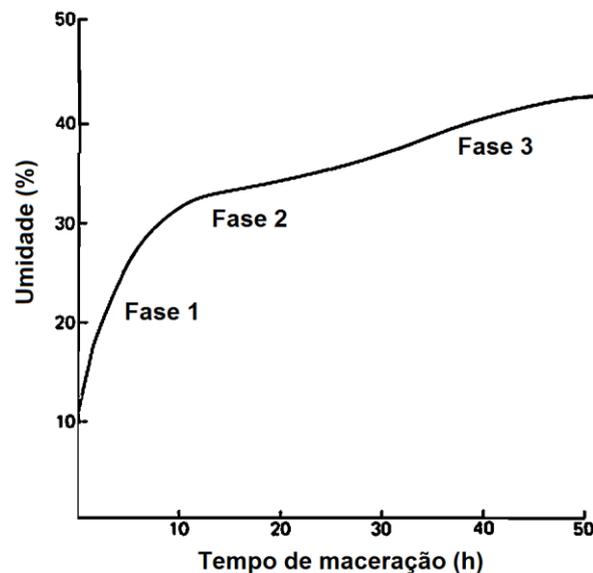
Os parágrafos a seguir apresentam as características principais para cada fase da umidificação de cevada, segundo Brookes, Lovett e Macwilliam (1976).

A primeira fase (Figura 4) apresenta um período curto de tempo, onde a absorção de umidade ocorre apenas por mecanismos físicos, recuperando a umidade perdida durante a maturação. A água absorvida penetra inicialmente nas camadas externas do grão. Durante este período a testa e o pericarpo são as principais barreiras para a absorção de água.

Na segunda fase (Figura 4) há uma redução da absorção de água, sendo que o conteúdo de umidade é aproximadamente constante em relação ao tempo. Nesta fase inicia-se a conversão de amidos em açúcares, tais processos hidrolíticos

aumentam a pressão osmótica que resulta na maior absorção de água no final desta fase, durante este processo pode ocorrer o início da formação de novos tecidos.

Figura 4 - Curva característica da umidade em base úmida em função do tempo de maceração (Fonte: Brookes, Lovett e Macwilliam, 1976).



Por fim, na terceira fase (Figura 4) a absorção de água é correlacionada com o início da atividade metabólica. O estágio é associado com o início da germinação com o visível alongamento das células meristemáticas que formarão as primeiras estruturas das plântulas.

Verifica-se que a absorção de umidade é influenciada pelas atividades fisiológicas das sementes (principalmente a partir da segunda fase de umidificação). Além disto, como foi descrito anteriormente, as sementes de cevada são compostas por tecidos com diferentes composições químicas e características morfológicas, desta forma a absorção não é homogênea no volume das sementes.

Isto pode ser visto nos resultados obtidos por Reynolds e MacWilliam (1966) onde pode ser constatada uma heterogeneidade da absorção de água pelos tecidos, sendo possível verificar uma alta taxa de absorção de água no início da umidificação pelo embrião e casca, seguidas pelo escutelo. Durante a umidificação há uma resistência à transferência de umidade dos tecidos de proteção (pericarpo, testa e

aleurona) para o núcleo (endosperma e embrião), estas constatações podem ser observadas conforme a Tabela 1.

Devido a heterogeneidade na absorção de umidade, se a umidificação for interrompida antes do equilíbrio das atividades de água em todos os tecidos, como é comum nas indústrias de processamento, como as maltearias, inicia-se um processo de distribuição de umidade até que a atividade de água seja igual em todos os tecidos.

Tabela 1 - Umidade em base úmida dos diferentes tecidos das sementes de cevada a 13°C (Adaptado de Reynolds e MacWilliam, 1966).

Tempo (horas)	Umidade (b.u.) a 13° C					
	Escutelo	Embrião	Pericarpo, testa e Aleurona	Endosperma	Casca	Grão
2	18,5	33	11,4	10	40,5	21,6
4	36,8	43,6	15,6	12,5	43,1	25,9
6	50	51,3	26,8	21,4	44,9	28,6
24	57,9	57,9	36,4	35	47,1	38,4

Um dos primeiros trabalhos para análise da distribuição de umidade nos tecidos morfológicos que compõe as sementes de cevada foi de Kirsop, Reynolds e Griffiths (1967). Com base na Tabela 2 pode se constatar que nas primeiras duas horas a água é transferida dos espaços vazios para o embrião. Estes espaços vazios estão localizados entre os diferentes tecidos morfológicos, principalmente nas regiões de interface dos tecidos de proteção e o embrião.

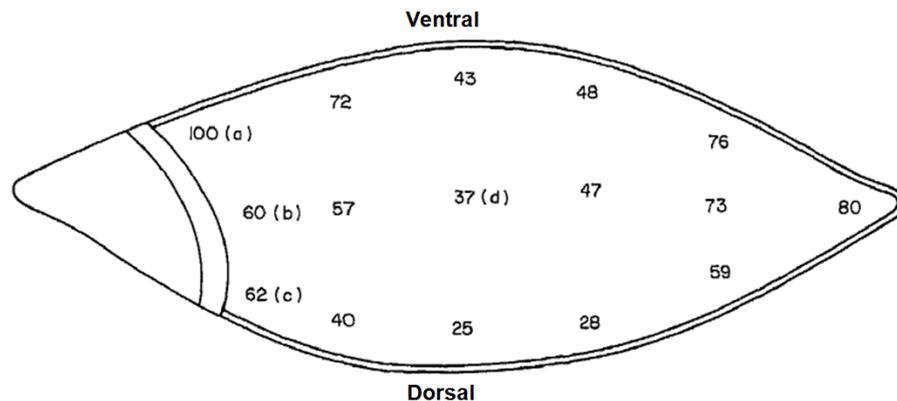
Após a absorção de todo conteúdo de umidade presente nestes espaços vazios pelo embrião, inicia-se a transferência da umidade presente no endosperma para o embrião, como pode ser constatado observando a Tabela 2.

Tabela 2 - Mudanças na distribuição de água durante a germinação (Adaptado de Kirsop, Reynolds e Griffiths, 1967).

Tempo de germinação (dias)	Massa de água (mg)		
	Embrião	Endosperma	Espaços vazios
0	1,8	24,4	3,6
2	5,2	24,6	0
3	7,7	20,8	0
5	9,6	18,9	0

Outros resultados importantes que contribuem para a compreensão da umidificação e dos mecanismos de absorção de umidade são apresentados por Davies (1991). Este autor utilizou a técnica de raios-x para a análise dos padrões de hidratação das sementes de cevada que podem ser observados na Figura 5.

Figura 5 – Padrões de hidratação da cevada após 6 horas de umidificação e 18 horas de descanso ao ar a temperatura de 27°C mostrando o conteúdo de umidade medido por meio de raios-x nas seguintes regiões: (a) ventral, (b) meio do endosperma, (c) dorsal e (d) centro do endosperma (Fonte: Davies, 1991).



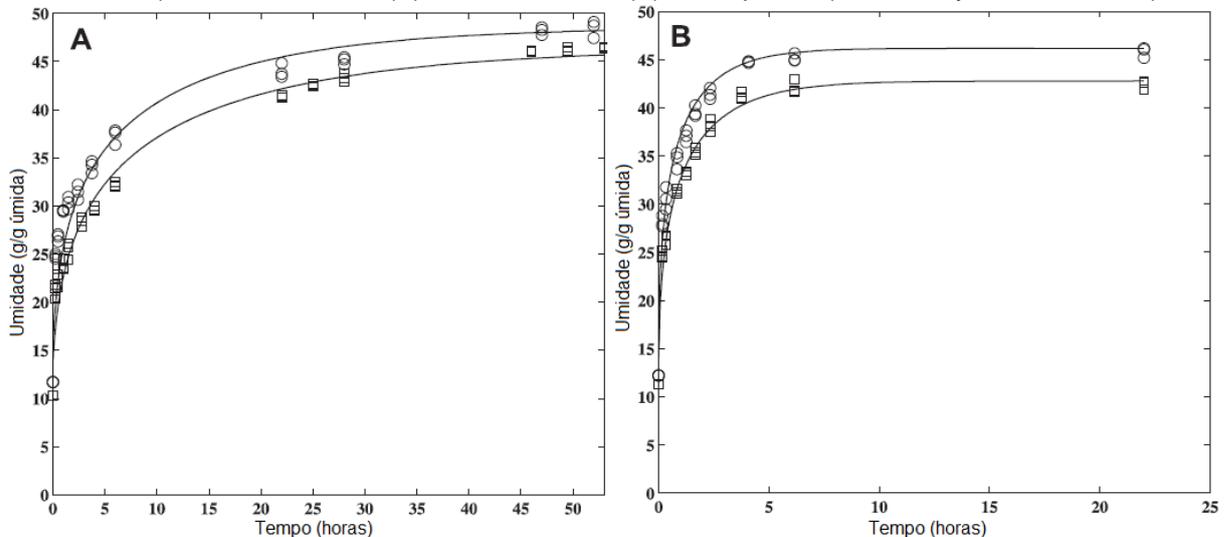
Conforme a Figura 5, a absorção de água ocorre principalmente pela região ventral próxima ao embrião, o que pode ser afirmado devido às altas concentrações de umidades nestas regiões ventrais e as baixas concentrações de umidade nas regiões centrais. Com base nestes resultados, Davies (1992) propôs um novo índice de qualidade de malte a partir da verificação por raios-x de altos valores de conteúdo de umidade na região ventral próxima ao embrião.

Os resultados apresentados por Davies (1991) comprovam que os tecidos externos funcionam como uma barreira para a transferência de umidade para o interior das sementes de cevada. Esta constatação foi confirmada por Mayolle et al. (2012) através de resultados de cinética de umidificação, observando a umidade em base úmida em função do tempo para a semente inteira e para o endosperma isolado dos tecidos externos, estes resultados são apresentados na Figura 6.

Como pode ser observado pela Figura 6, o processo de umidificação do endosperma ocorreu em um período menor de tempo do que para as sementes inteiras. Segundo Mayolle et al. (2012) a difusividade efetiva estimada para o

endosperma foi seis vezes maior que para as sementes inteiras, comprovando que os tecidos externos são barreiras para a transferência de umidade.

Figura 6 - Umidade em função do tempo de umidificação a 22°C para duas variedades (Sebastian e Cerveise) das sementes de (A) cevada inteira e (B) endosperma (Fonte: Mayolle et al., 2012).



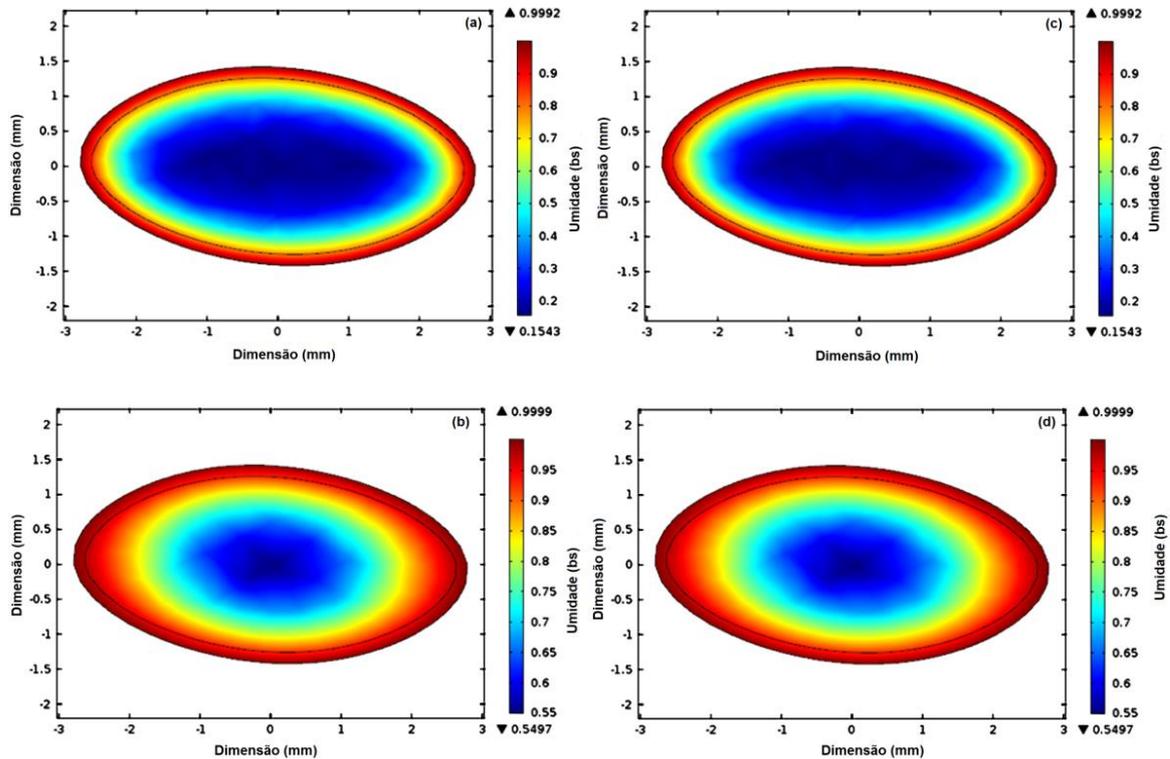
Além destes fatores que influenciam na umidificação das sementes de cevada, Cozzolino, Roumeliotis e Eglinton (2013) afirmam que características relacionadas à composição química das paredes das células vegetais, como o grau de polimerização também influenciam neste processo de transferência de massa. Isto indica que as estruturas morfológicas tem efeito na umidificação, mas também a composição das paredes das células vegetais.

Com base no que foi descrito anteriormente, pode-se constatar que as concentrações de umidade no interior da semente não são contínuas. Montanuci et al. (2014) simularam a umidificação de cevada obtendo valores próximos aos experimentais, porém os perfis de umidades não representam as características morfológicas e química inerentes às sementes de cevada, como pode ser visto na Figura 7.

Os perfis de umidade são apresentados como contínuos, porém se compararmos a Figura 7 com a Figura 5, pode-se observar que existem diferenças significativas da simulação com os dados estimados por raios-X. Isso ocorre, pois Montanuci *et al.* (2014), não consideraram a influência dos diferentes tecidos em seu

equacionamento, estando em inconformidade com os dados apresentados por Reynolds e MacWilliam (1966), Kirsop, Reynolds e Griffiths (1967) e Davies (1991).

Figura 7 - Perfis de umidades ao longo dos diâmetros da seção transversal da cevada para umidificação a temperatura de 25° C após (a) 6 horas e (b) 36 horas e 10°C após (c) 6 horas e (d) 36 horas (Fonte: Montanuci et al., 2014).

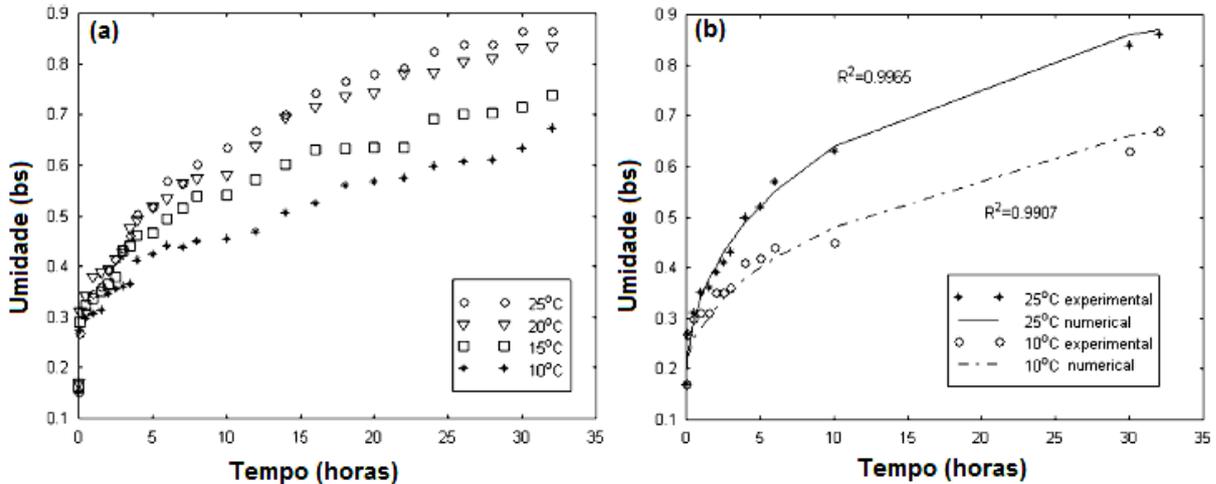


Observando os dados experimentais na Figura 8a e comparando com os ajustes das simulações da Figura 8b, pode-se constatar que apesar dos valores de coeficiente de variância explicada próximos a unidade. Montanuci et al. (2014) não apresentaram parte dos dados que estão na segunda fase de umidificação conforme curva característica apresentada por Brookes, Lovett e Macwilliam (1976). Admite-se que possivelmente os modelos não representaram todas as fases da umidificação e os autores tiveram como objetivo uma aproximação para mostrar o processo de uma forma global, analisando os tempos iniciais da umidificação e a estimativa do conteúdo de umidade final após aproximadamente 30 horas de umidificação.

Pode-se afirmar com base nos estudos encontrados na literatura e apresentados nesta revisão que o processo de umidificação das sementes de cevada é complexo e, conforme se analisa mais profundamente as características

deste processo, constata-se que esta complexidade é inerente à estrutura morfológica e composição química das sementes de cevada.

Figura 8 - Umidade em função do tempo parametrizada na temperatura, com os dados (a) experimentais e (b) simulação e ajuste de modelos (Fonte: Montanuci et al., 2014).



Visto que, o processo de umidificação é importante para o início da germinação (malteação) para a produção de cerveja. Tem-se a importância no aprofundamento dos estudos da transferência de massa com enfoque nas estruturas morfológicas e influências da composição química.

Existem outros efeitos nas sementes devido à transferência de massa, um destes efeitos é apresentado na Figura 9 obtido por Tarr, Diepeveen e Appels (2012).

Figura 9 - Imagens da seção longitudinal das sementes de cevada secas após 2, 3, 4, e 5 dias de germinação (Fonte: Tarr, Diepeveen e Appels, 2012).



As imagens apresentadas na Figura 9 são de sementes após os diferentes períodos de germinação de 2, 3, 4 e 5 dias, onde para sua interrupção foi realizado um processo de secagem. Os autores afirmam que com a umidificação ocorreu a expansão das sementes. Após o período de germinação, realizou-se a secagem

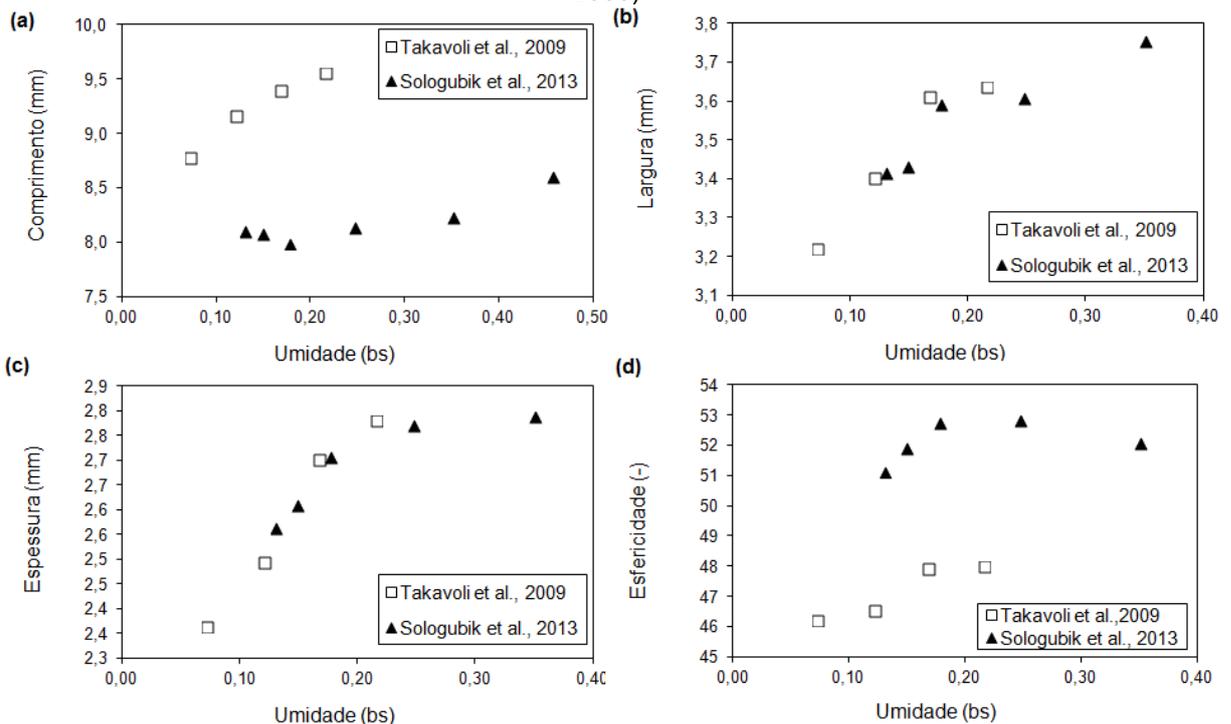
para interrupção do processo fisiológico das sementes, acarretando em novo encolhimento. Porém, constatou-se que este encolhimento não foi igual em todos os tecidos, formando lacunas entre os tecidos de proteção e o endosperma, como pode ser observado no quadro B da Figura 9.

Portanto, esses resultados mostram que há variações nas características físicas das sementes de cevada durante os processos de secagem e umidificação, evidenciando a importância da análise nos estudos de caracterização física encontrados na literatura.

2.4. Caracterização física

Com base no que foi discutido anteriormente, com relação ao processo de umidificação e as dimensões dos grãos de cevada, tem-se na Figura 10 as medidas de comprimento, largura, espessura e esfericidade desses grãos em função da umidade em base seca.

Figura 10 - Medida do (a) comprimento, (b) largura, (c) espessura e (d) esfericidade de sementes de cevada em função da umidade em base seca (Adaptado de Sologubik et al., 2013; Tavakoli et al., 2009).



Com base na Figura 10 observamos a variação dimensional durante a absorção de umidade nos grãos de cevada, para as seguintes medidas: comprimento (C, Figura 10a), largura (L, Figura 10b) e espessura (E, Figura 10c) em função do tempo de umidificação. Estes resultados foram obtidos dos trabalhos de Tavakoli et al. (2009) e Sologubik et al. (2013). Os dados de esfericidade (φ) das sementes de cevada foram estimados através da Equação 1.

$$\varphi = \frac{\sqrt[3]{C \cdot L \cdot E}}{C} \cdot 100 \quad 1$$

Segundo Sologubik et al. (2013) com base em seus resultados, a esfericidade aumenta conforme aumenta a umidade das sementes de cevada até um valor específico de umidade e, continuando o processo de umidificação, observa-se a redução da esfericidade. Segundo estes autores o aumento da esfericidade se deve ao aumento proporcional de comprimento, largura e espessura das sementes de cevada e logo depois ocorre um aumento superior no comprimento comparado com as medidas de largura e espessura das sementes de cevada, causando a redução do valor de esfericidade.

Sologubik et al. (2013) e Tavakoli et al. (2009) ajustaram equações empíricas aos dados experimentais de esfericidade em função do conteúdo de umidade das sementes de cevada, que estão relacionadas a seguir.

Os resultados das medidas das dimensões e forma de Sologubik et al. (2013) são para amostras de cevada *scarlett*, a Equação 2 é empírica e foi ajustada aos dados experimentais de esfericidade em função da umidade em base seca das sementes de cevada.

$$\varphi(X_{bs}) = -55 \cdot X_{bs}^2 + 34,65 \cdot X_{bs} + 47,88 \quad 2$$

Estes autores utilizaram o conteúdo de umidade (X_{bs}) em base seca com faixa de validade entre 0,12 e 0,46.

Tavakoli et al. (2009) utilizou a variedade *Nosrat* de cevada, a Equação 3 é empírica e foi ajustada aos dados experimentais de esfericidade em função da umidade das sementes de cevada em base seca.

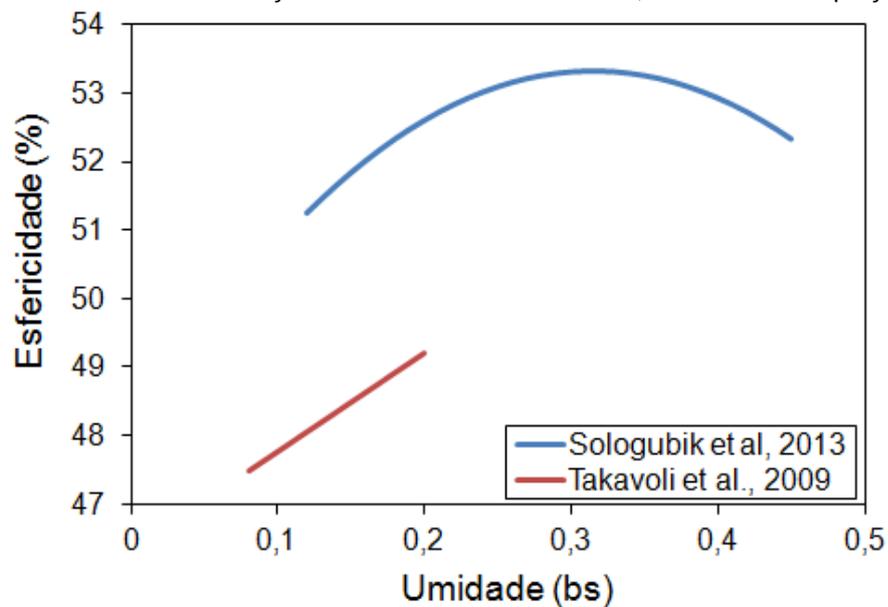
$$\varphi(X_{bs})=14,3 \cdot X_{bs}+46,35$$

3

Estes autores utilizaram o conteúdo de umidade (X_{bs}) em base seca com faixa de validade entre 0,07 e 0,21.

Na Figura 11 foram plotados os dados de esfericidade em função do conteúdo de umidade conforme as Equações 2 e 3.

Figura 11 - Esfericidade em função da umidade em base seca, conforme as Equações 2 e 3.



Conforme a Figura 11 pode ser observado que os valores de esfericidade obtidos por Tavakoli et al. (2009) são menores que os obtidos por Sologubik et al. (2013). Isso devido às diferentes variedades de sementes e proveniências.

Os dados dos dois autores apresentaram faixas de validades coincidentes entre os valores de conteúdo de umidade de 0,12 e 0,21. Portanto, para comparação dos dados de esfericidade foi utilizado esse intervalo comuns aos dois conjuntos de dados experimentais encontrados na literatura.

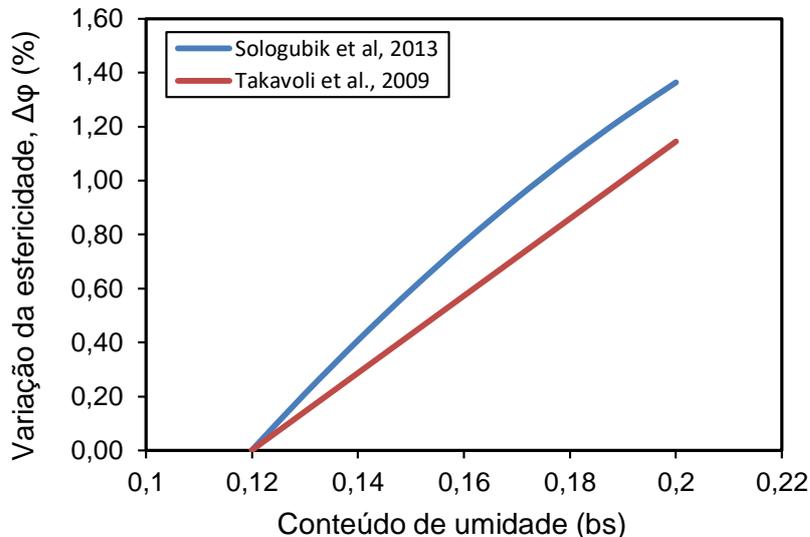
Dentro desta faixa de validade, as variações de esfericidades ($\Delta\varphi$) obtidas pela Equação 4 em função da umidade estão apresentadas na Figura 12.

$$\Delta\varphi=\varphi(X_{bs})-\varphi(X_{bs}=0,12)$$

4

De acordo com a Figura 12 pode-se observar que na mesma faixa de umidade as variações de esfericidade em função da umidade para os dois autores foram próximas, ou seja, há uma diferença significativa entre os valores absolutos de esfericidade em função da umidade, porém esta diferença foi menor para os valores de variação de esfericidade em função da umidade. Portanto, pode-se constatar que as influências como espécie e local de proveniência das sementes de cevada tem efeito nos valores absolutos de esfericidade, mas o comportamento das variações em função da umidade no processo de umidificação não apresenta tal sensibilidade para estes efeitos, ou seja, estes efeitos são mais importantes nos valores iniciais absolutos de esfericidade.

Figura 12 - Variação da esfericidade em função da umidade em base seca (Adaptado de Sologubik et al., 2013; Tavakoli et al., 2009).



Com base na revisão realizada, sobre a morfologia, características químicas e físicas das cevadas, obteve-se as bases necessárias para avaliar os estudos presentes na literatura sobre a secagem das sementes de cevada.

2.5. Secagem das sementes de cevada

Através do que foi descrito anteriormente, pode-se constatar que as complexas estruturas morfológicas, características químicas e físicas das sementes influenciam nos fenômenos de transferência de calor e massa que ocorrem durante a secagem.

Porém, os primeiros estudos de secagem das sementes de cevadas não consideraram estes efeitos, sendo que a maioria destes estudos focou nos métodos de secagem das sementes de cevada e na modelagem dos fenômenos envolvidos.

A seguir, são apresentadas as sínteses dos estudos realizados da secagem de sementes de cevada que foram encontradas na literatura até o momento.

Um dos primeiros trabalhos encontrados foi o de Boyce (1965), que avaliou métodos analíticos de modelagem da umidade e da temperatura do leito de sementes de cevada, focando principalmente na transferência de calor. Os experimentos foram realizados em secadores do tipo leito fixo, com seção transversal quadrada de dimensões de 12,25x12,25 in. A camada espessa foi estipulada com 12 in de profundidade e a delgada com 1 in de profundidade.

O autor utilizou balanços de energia e equações empíricas da literatura para a descrição dos dados experimentais de secagem em camada fina, deste processo foram obtidos dados como umidade de equilíbrio dinâmico, coeficiente de transferência de calor por condução, entre outros. A partir disto, os cálculos para a descrição matemática da secagem em camada espessa foi discretizando o leito camada-a-camada. Por fim, compararam-se os dados experimentais obtidos com os calculados pela modelagem realizada para um leito espesso de sementes de cevada, onde se teve erros relativos menores que 10%.

Observa-se que este estudo realizado tinha como base apenas a modelagem matemática da secagem de sementes de cevada. Apesar das aplicações possíveis desta modelagem, a motivação principal foi em relação a caracterização da secagem em camada espessa através dos conceitos e experimentos em camada delgada.

A seguir, são apresentados alguns trabalhos mais aplicados, como de Smith (1984), que utilizou métodos de programação dinâmica para a minimização dos custos energéticos para a secagem das sementes de cevada, bem como, a redução da formação e desenvolvimento de fungos, para condições do ar de secagem próximas das condições ambientes. O método utilizado foi simples sendo que o objetivo foi a aplicação após a colheita das sementes, evitando que no estoque, antes do transporte para indústria, o material tenha o desenvolvimento de fungos. A umidade em base seca final foi na faixa de 0,24 a 0,34, com velocidade do ar na faixa de 0,05 a 0,2 m/s e alturas de leito de 1, 3 e 5 metros.

A faixa de umidade em base seca final para Smith (1984) chegou a valores superiores aos obtidos após a colheita atualmente. Com base em Markowski, Bialobrzewski e Modrezewska (2010), a faixa do conteúdo de umidade (base seca) das sementes de cevada na colheita é de 0,21 a 0,25. E isso se deve, pois se aguarda a maturação e a redução da umidade das sementes no campo, o objetivo é reduzir os custos de energia necessários para a redução dos conteúdos de umidades até valores seguros quanto à formação de fungos.

Do ponto de vista do equipamento, para a secagem de materiais advindos da agricultura O'Callaghan, Menzies e Bailey (1971) avaliaram diferentes secadores para sementes de cevada e trigo. Foram utilizados equacionamentos baseados na taxa de secagem em camada fina e nos balanços de calor e massa. Foram validadas essas equações com base nas seguintes configurações de secadores: leito fixo, leito fluidizado, secador de fluxo cruzado, contracorrente, concorrente e tambor rotativo.

O'Callaghan, Menzies e Bailey (1971) constataram que os erros relativos em leito fluidizado foram maiores que 10%, além disso, para sementes de trigo e de cevada os parâmetros da secagem foram aproximados para os dois tipos de materiais, supondo que as características de secagem não apresentaram variações significativas entre eles. Para leitões empacotados obtiveram-se erros percentuais menores que 10% para camada fina, porém os resultados mostraram que não devem ser utilizados os dados obtidos da secagem em camada fina para os cálculos com camada espessa quando se tem alteração da variedade de cevada.

Alem das avaliações matemáticas destes equipamentos, outra importante contribuição de O'Callaghan, Menzies e Bailey (1971) foram as medidas dos perfis de umidade das sementes de cevada ao longo da camada espessa durante a secagem de sementes de cevada em leito fixo. Para isto, eles utilizaram telas finas entre as camadas das sementes para obter as medidas de massa em relação ao tempo.

Estes resultados experimentais foram importantes nas validações de diversos trabalhos de modelagem matemática e computacional como para Mandas e Habte (2002) que utilizaram o método de diferenças finitas com processo iterativo preditor corretor de primeira e segunda ordem para resolver um conjunto de quatro

equações diferenciais parciais não lineares obtidos dos balanços de massa e energia e as equações de transferência de calor.

Alem deste trabalho, com base na modelagem do tipo caixa preta têm-se os trabalhos realizados com base nos resultados apresentados por O'Callaghan, Menzies e Bailey (1971).

Farkas, Reményi e Biró (2000a) avaliaram os efeitos das topologias das redes neurais, Farkas, Reményi e Biró (2000b) avaliaram os efeitos das propriedades físicas, como temperatura, velocidade e umidade relativa do ar, estas condições foram avaliadas nos dois trabalhos, com base nos dados de saída, que são as umidades ao longo do leito em função do tempo. As conclusões de ambos os estudos são que estas condições e variáveis tem efeitos sobre os dados de saída da rede e as estimativas obtidas tiveram correlação satisfatória com os dados experimentais, sendo menores aos de outros estudos realizados anteriormente.

Seguindo ainda o mesmo tipo da modelagem, Hazarika e Datta (2014) utilizaram os dados de O'Callaghan, Menzies e Bailey (1971), estimaram uma expressão para descrever a cinética de secagem em leito fixo por meio dos perfis de umidade ao longo do leito, utilizando como ferramenta a inversão de redes neurais e a equação de Lewis com dependência do tipo Arrhenius na temperatura no período de taxa de secagem constante.

Dentre outros autores que apresentaram resultados experimentais de secagem se tem Bruce (1985), que utilizou três modelos presentes na literatura para a secagem de sementes de cevada na faixa de temperatura do ar de 50 a 150°C, para velocidade do ar de 0,56 m/s, em uma célula de base circular com área de 0,2 m² e 300 gramas de sementes, formando uma monocamada.

Os modelos utilizados foram as equações de Newton, de Page e a solução numérica da Lei de Fick da difusão para esfera com difusividade dependente da umidade. Com base na validação em dados experimentais, a solução numérica da Lei de Fick foi o que apresentou a maior aproximação dos dados observados com os calculados. Além disto, Bruce (1985) constatou que para temperaturas acima de 45°C sementes de cevada produzem um malte de menor qualidade.

Verifica-se que com Bruce (1985) inicia-se uma preocupação com a qualidade da semente na secagem, avaliando-se parâmetros de estimativa indireta da qualidade fisiológica das sementes, com o índice de germinação, que relaciona o

número de sementes germinadas e o número de sementes sob as condições favoráveis a germinação.

Com base nisto, tem-se o trabalho de Jílek (1993), que realizou experimentos de secagem com sementes de cevada com conteúdo de umidade entre 8 a 29% por 5 horas, realizando a retirada de amostras em intervalos de 30 minutos para a verificação do índice de germinação e as temperaturas do ar de secagem foram de 40, 50, 60 e 70°C. Com esses dados foi determinada uma expressão para a temperatura crítica de secagem em função do conteúdo de umidade inicial das sementes e do tempo de exposição ao ar de secagem.

A temperatura crítica de secagem abordada por Jílek (1993) significa que para um lote de sementes, com um determinado conteúdo de umidade inicial e seco em um determinado intervalo de tempo, existe uma temperatura que causará um determinado valor de redução no índice de germinação das sementes, neste trabalho, os valores de variações no índice de germinação das sementes de cevada aceitáveis foram de 1% e 3%.

Ou seja, Jílek (1993) estudou as duas variáveis (temperatura do ar e tempo de secagem), que segundo ele tem efeito negativo no índice de germinação. Observa-se que a partir deste estudo que outros pesquisadores partiram para avaliação da secagem em condições favoráveis a qualidade fisiológica.

Como Jayas e Sokhansanj (1989), que realizaram um estudo de secagem de cevada em camada fina para temperaturas do ar abaixo de 35°C, foram avaliados os efeitos da temperatura, da umidade relativa e da velocidade do ar para secagem da cevada. Com base na equação de Page, verificaram a constante de secagem ajustada aos dados experimentais e verificaram os efeitos comentados anteriormente. As conclusões foram que variando a temperatura do ar entre 5 a 35°C teve o maior efeito, que variando o fluxo do ar entre 0,3 a 0,6 m³/(s.m²) que não teve efeito e variando a umidade relativa do ar entre 35 a 80% tem-se um efeito pouco significativo na secagem de cevada.

Arinze et al. (1994) realizou a avaliação de estratégias de controle da secagem em camada fina, com velocidade do ar de aproximadamente 0,5 m/s, massa de 300 gramas de sementes, resultando em uma camada de espessura de 13 mm e sem aquecimento do ar de secagem. Foram avaliadas diversas condições das sementes de cevada, do ar de secagem e das condições para a colheita das

sementes. Estes autores constataram por meio dos resultados experimentais, que se tem a redução da qualidade das sementes de cevada quando há a prolongação do tempo da secagem. Portanto, sendo necessária a utilização de uma fonte de calor para fornecer energia para retirada de umidade pelo ar de secagem, com isso aumentando a velocidade da secagem.

Estes resultados demonstram a importância do tempo de secagem, como foi abordado por Jílek (1993) e comentado anteriormente.

Arinze et al. (1994) avaliaram a aplicação destes conhecimentos obtidos para a minimização dos custos do processo de secagem durante o armazenamento das sementes pelo produtor. Os autores fizeram uma ampla listagem de dados que favorecem o projeto e seleção de secadores com baixa temperatura do ar de secagem.

A partir de O'Callaghan, Menzies e Bailey (1971), da literatura encontrada, não tiveram estudos de secagem de sementes de cevada em outros tipos de equipamentos de secagem diferente do leito fixo. Sendo exploradas diversas modelagens e avaliações das condições operacionais de secagem destas sementes neste equipamento, porém sem avaliar outras formas de contato entre fluido e partícula durante este processo.

Até que Markowski et al. (2007) avaliaram a secagem em leito de jorro e radiação infravermelha com base nos parâmetros de qualidade fisiológica. A seguir, foram descritas as principais informações sobre os equipamentos, bem como as condições operacionais.

No leito de jorro, a massa de sementes foi de 1,6 kg de sementes, correspondendo a uma altura de aproximadamente 24 cm, a temperatura do ar de secagem foi variada entre 30 a 45°C e velocidade do ar de secagem foi de $(23 \pm 0,5)$ m/s.

Para radiação infravermelha, a massa foi de 0,7 kg, a potência da radiação infravermelha foi variada entre 0,048 a 0,107 w/m² e velocidade do ar foi de 0,5 m/s.

Os autores constataram de acordo com os resultados obtidos, que a difusividade obtida não variou entre as duas formas de secagem e não se teve redução significativa dos parâmetros de estimativa indireta da qualidade fisiológica.

A partir destes estudos, tiveram outros trabalhos com a secagem de sementes em leito de jorro. Markowski, Bialobrzewski e Modrezewska (2010)

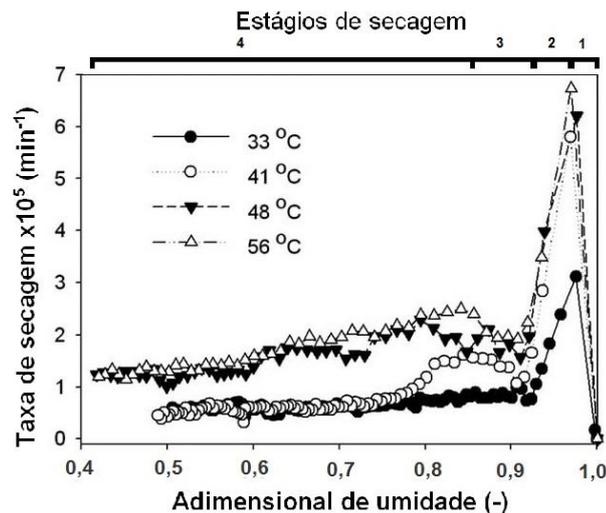
realizaram a secagem de sementes de cevada em leito de jorro de base cônica, com temperaturas entre 33 a 56°C, a massa de sementes foi de 3,2 kg, que corresponde a uma altura de leito estático de $(33,3\pm 0,5)$ cm e a velocidade do ar de secagem foi de $(30,0\pm 0,1)$ m/s.

Estes autores avaliaram os efeitos do tipo da geometria das sementes empregada na modelagem da secagem em leito de jorro, utilizando e comparando a geometria de uma esfera e de um elipsoide simétrico não axial. Pode se observar que a geometria elipsoidal apresenta melhor concordância aos dados calculados com os dados experimentais.

O que está de acordo com os estudos de geometria para a estimativa da densidade e da distribuição de tamanho de sementes de cevada, realizadas por Walker e Panozzo (2012) e Sýkorová et al., (2009), respectivamente.

Outra constatação importante foi que durante a secagem das sementes de cevada em leito de jorro foram observados quatro estágios na secagem, como pode ser visto na Figura 13 (MARKOWSKI; BIAŁOBRZEWSKI; MODRZEWSKA, 2010).

Figura 13 - Taxa de secagem em função do adimensional de umidade durante a secagem em leito de jorro (Adaptado de Markowski, Bialobrzewski e Modrzewska, 2010).



O primeiro estágio ocorre rapidamente e foi caracterizado como o período de aquecimento, onde a taxa de secagem foi crescente.

No segundo estágio tem-se a taxa de secagem decrescente, os autores indicam que nesta etapa teve-se a formação de umidade superficial que aumentou a

coesão das sementes de cevada, dificultando a movimentação característica deste equipamento e reduzindo rapidamente a taxa de secagem.

O terceiro estágio tem-se um rápido crescimento da taxa de secagem, porém menor que o apresentado no primeiro estágio, isto se deve a evaporação da umidade superficial, reduzindo a coesão e a altura da fonte alcança o valor máximo e também a taxa de secagem. Por fim, no quarto período a taxa de secagem volta a diminuir com o adimensional de umidade, porém com inclinação menos acentuada comparada ao segundo período de secagem (MARKOWSKI; BIALOBRZEWSKI; MODRZEWSKA, 2010).

Com base na Figura 13, Markowski, Bialobrzewski e Modrezewska (2010) constataram que o mecanismo predominante de transferência de massa foi de difusão.

A revisão sobre secagem de sementes de cevada apresentou que as pesquisas realizadas até o momento avaliaram diferentes formas de modelagem, equipamentos e contato entre fluido e partículas. Porém, não foram considerados aspectos como os tecidos, composição química, entre outros fatores mostrados anteriormente, que influenciam na transferência de massa.

Com base nisso, mediante a escassez de pesquisas nesta área encontrou-se um trabalho de Ghosh, Jayas e Gruwel (2009), avaliando o coeficiente aparente de difusão de água para a temperatura de $(20,5 \pm 0,5)^\circ\text{C}$ para o endosperma e o embrião de sementes de cevada, para isto estes autores utilizaram imagens de ressonância magnética e sementes nuas, o valor calculado para este coeficiente foi aproximadamente duas vezes maior para o embrião em relação ao endosperma.

Os resultados de Ghosh, Jayas e Gruwel (2009) foram coerentes com os resultados de Reynolds e MacWilliam (1966) para umidificação, que encontrou uma maior adsorção de água em um menor tempo pelo embrião, conforme Tabela 1. Porém, no trabalho de Ghosh, Jayas e Gruwel (2009) não foi possível a avaliação da influência dos tecidos que envolvem o embrião e endosperma, que também podem estar favorecendo a maior adsorção pelo embrião em relação ao endosperma.

Segundo Brookes, Lovett e Macwilliam (1976), o embrião não é totalmente recoberto pelos tecidos de proteção e o pericarpo e a testa, que são as principais barreiras para adsorção de água durante a umidificação. Portanto, a difusividade aparente de água ser maior para o embrião, além de ser devido à estrutura

morfológica, pode ser estar relacionada à barreira à transferência de massa não envolver esse órgão das sementes de cevada.

Por meio desta revisão, pode-se constatar que muitos estudos foram realizados para os grãos de cevada. Avaliações da estrutura morfológica e da fisiologia destes grãos foram desenvolvidas de forma a garantir uma visão geral dos aspectos físicos, químicos e biológicos para este material. Com base nestes estudos as fases e perfil da absorção de umidade com o tempo foram estudados, observando que as sementes de cevadas, com qualidade fisiológica, apresentam além da fase física de absorção de água por sua matriz porosa, duas fases devido as suas atividades fisiológicas e de formação de tecidos de uma futura plântula.

Além disto, foram observados que as umidades finais dos tecidos e órgãos dos grãos de cevada são diferentes ao longo da umidificação, identificando variações longitudinais e radiais. Bem como foram constatados nos estudos das propriedades físicas que estes grãos apresentam retratibilidade com a umidade.

Porém, todos estes aspectos estudados foram pouco considerados até o momento do estudo da secagem destes grãos, sendo estudados e analisados a modelagem e controle do processo de secagem para este material, mas sem implementar todos os aspectos estudados nas outras áreas de conhecimento.

Verificando estas informações e conhecimento na literatura foi possível a identificação da necessidade de entender as variações dos grãos e dos sistemas particulados formados com a retirada dos tecidos externos ao endosperma e embrião. Pois, cada vez mais estes produtos estão sendo inseridos no mercado alimentício, porém poucas informações das variações das propriedades físicas e de transporte destes materiais foram encontradas na literatura.

Além disto, com as caracterizações destas propriedades para os diferentes produtos obtidos dos grãos de cevada foi possível a avaliação e discussão das variações dos mecanismos entre estes materiais. Desta forma, sendo constatadas as influências dos tecidos externos e da estrutura do grão de cevada sobre a

transferência de calor e massa, além da formação de meios porosos por essas partículas.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Para o desenvolvimento deste trabalho, um conjunto de metodologias e técnicas foi utilizado. Sendo realizadas as caracterizações físicas, como dimensões, esfericidade, massas específicas e porosidade dos grãos e de leitos de cevada.

Além das propriedades físicas, foram estudadas as propriedades de transporte, como a condutividade térmica, permeabilidade e difusividade mássica efetiva da água durante a reumidificação.

Para alcançar os objetivos deste trabalho, estas propriedades foram avaliadas para os grãos inteiros e polidos, também para grãos de cevada e suas partes moídas. Desta maneira, além de ser possível a análise destas propriedades para materiais com diversas aplicações nas indústrias de alimentos, ainda é possível a avaliação dos efeitos morfológicos dos diferentes tecidos e órgãos dos grãos nestas propriedades estudadas.

Após estas análises foram feitas as secagem em diferentes meios de secagem, tais como secagem com partícula isolada submersa, leito fixo submerso com escoamento tangencial, leito fixo com escoamento de ar intersticial (perpendicular) e leito fluidizado. Desta maneira, foi possível avaliar meios de secagem muito comuns para a avaliação da cinética de secagem de materiais. Estes experimentos foram realizados tanto para grãos inteiros como polidos, sendo que a condição de polimento foi definida com base nas caracterizações dos grãos ao longo do processo de polimento.

Assim sendo, a seguir foram descritas essas metodologias para que seja possível a análise dos resultados e discussões.

3.1. Obtenção dos materiais

Para este estudo foram utilizados grãos de cevada fornecidos pela empresa Agromalte, colhidos no estado do Paraná e armazenados em temperatura de aproximadamente 4°C (CARVALHO e NAKAGAWA, 1980). A umidade dos grãos em base úmida foi de $(11,42 \pm 0,15)\%$ durante o armazenamento.

A retirada das palhas, grãos quebrados, folhas, entre outros materiais leves foram realizadas em um elutriador da marca De Leo, o ajuste de velocidade para elutriação foi de 60% da capacidade máxima do equipamento.

Após este processo de separação, uma seleção manual foi realizada com o auxílio de uma lupa com lâmpada fluorescente circular acoplada, retirando os grãos com superfície danificada e outros materiais (como outros tipos de grãos).

Para se alcançar os objetivos deste trabalho, utilizaram-se três técnicas de retirada dos tecidos externos, que foram descritas a seguir.

A técnica manual de retirada dos tecidos externos possibilitou a avaliação da fração mássica dos tecidos externos ao endosperma e embrião. Utilizando uma lâmina de aço foi realizado o descascamento e raspagem da superfície, separando o núcleo (endosperma e embrião) dos tecidos externos (pericarpo, testa, aleurona e casca). A quantificação destes materiais foi realizada com balança de precisão de 0,00001 g (Shimadzu AEG-80SM) e para cada amostra utilizou-se dez grãos de cevadas, com três repetições.

Para avaliação da transferência de massa foi utilizada a técnica de polimento das sementes em tambor rotativo, com lixas de granulometria 80 nas paredes para aumentar a atrição do material. A cada batelada foi realizado o polimento de aproximadamente 350 g em um tambor de 14 cm de diâmetro e 10 cm de comprimento.

O tempo de polimento foi avaliado pela influência da retirada de massa dos grãos de cevada nas propriedades de transporte. Por meio desta avaliação foi definida a condição em que os tecidos externos não ofereciam mais resistência a transferência de massa nos grãos de cevada.

Este método utilizou a máxima rotação do tambor rotativo, que foi de aproximadamente 45 RPM, um valor baixo quando comparado aos brunidores convencionais em escala de laboratório que tem uma rotação em cerca de 1000 RPM (Satake TM05C). Isto se deve a necessidade de reduzir a possibilidade de formação de fissuras internas, formando canais preferenciais internos aos grãos, mascarando a avaliação dos efeitos dos tecidos externos na transferência de massa.

Durante os experimentos de polimento foram realizadas medidas da massa dos grãos que estavam no tambor rotativo, além da medida das propriedades físicas e de transporte. A rotação foi interrompida em intervalos de 24 horas e foi realizada

a limpeza das paredes do tambor e a troca das lixas. Para a medida da massa dos grãos de cevada, esse material foi retirado do tambor e elutriado (De Leo) por um período de cinco minutos para que o pó fosse retirado da superfície dos grãos. Os grãos de cevada foram colocados novamente no tambor rotativo, após as medidas.

As medidas de dimensões, forma e massa específica do leito foram realizadas ao longo do tempo de polimento, em intervalos de 24 horas.

As medidas de permeabilidade, velocidade mínima de fluidização, difusividade efetiva da água foram realizadas ao longo do tempo de polimento, em intervalos de 48 horas.

Foi observada uma melhor condição de polimento, o qual será vista nos resultados posteriormente, em que não havia mais influência dos tecidos externos dos grãos de cevada. Para esta condição foi realizado os experimentos de secagem nos diferentes meios de secagem. No caso da metodologia de secagem com partícula isolada submersa foi feita a comparação dos resultados da secagem destes grãos polidos com os dos grãos sem casca (obtidos pela primeira técnica, a técnica manual).

Para as medidas da condutividade térmica foram utilizadas duas metodologias em série. Primeiramente a retirada da casca, material mais frágil, por meio de impactos mecânicos (Metalúrgica 7000 light) e em seguida a realização do polimento no tambor rotativo por 24 horas. A cada batelada foi utilizada uma massa de aproximadamente 600 gramas no impactador mecânico por um período de 2 minutos.

Após a impactação, a separação da casca foi realizada por meio de elutriação (De Leo). Os grãos foram selecionados manualmente, retirando os materiais com danos físicos visíveis. Estes grãos foram polidos no tambor rotativo por 24 horas para a retirada de resquícios dos tecidos externos incrustados à superfície do endosperma.

Estes grãos polidos foram utilizados para a medida de condutividade térmica de grãos de cevada sem casca. Também esses grãos e as cascas retiradas no impactador mecânico foram moídos para as medidas desta propriedade térmica.

Imagens desses materiais foram obtidas por meio de câmera digital (Kodak EasyShare C182) para avaliação qualitativa das condições visuais destes materiais.

A seguir encontram-se as metodologias para caracterizações destes materiais.

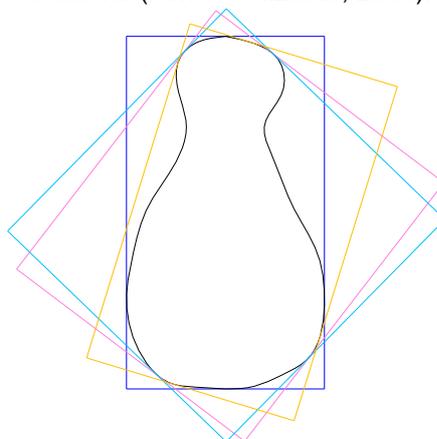
3.2. Dimensões, granulometria e forma dos grãos de cevada

As medidas das dimensões das sementes foram realizadas através de análise de imagem no programa aplicativo *Image Pro-Plus 6*[®]. Para esta medida foram utilizadas imagens digitais obtidas por câmera digital (Kodak EasyShare C182). Nestas imagens, uma régua foi utilizada para quantificar a relação do número de pixels a uma medida espacial (milímetro). Com esta relação através das regiões formadas pelas bordas da projeção bidimensional das sementes, se tem as medidas de dimensões dos grãos e também de fatores de forma, como a esfericidade.

Walton (1948) indicou o conceito do diâmetro de Feret para a medida de materiais particulados. O diâmetro de Feret é obtido da distância entre duas retas paralelas e tangentes às bordas de projeção bidimensional das sementes (Figura 14), o autor relaciona o conceito com a medida de uma partícula com paquímetro. Dessa forma, podendo ser relacionado o diâmetro de Feret máximo e mínimo com o comprimento e largura dos grãos, respectivamente.

Além desta medida, foram realizadas as medidas de diâmetro obtido da distância dos dois pontos extremos tangentes a borda projetada do grão de uma reta que passa pelo centro do grão.

Figura 14 - Imagem projetada de uma partícula com os quadros formados pelas retas tangentes ao contorno (Fonte: Felizardo, 2014).



Para a estimativa da esfericidade, foi utilizada a Equação 5, que é dada do inverso da circularidade (MASSARANI e PEÇANHA, 1988).

$$\varphi_{2D} = \frac{\text{Área}}{\text{Perímetro}^2} \cdot 4 \cdot \pi \quad 5$$

Com as análises de imagens foram obtidas somente as medidas bidimensionais. Desta forma, para obter a medida da espessura das sementes utilizou-se um paquímetro digital de precisão de 0,01 mm (Messen).

Com as medidas de comprimento (C), largura (L) e espessura (E), pode se obter a esfericidade por meio das medidas de tamanho dos grãos tridimensionais (MASSARANI e PEÇANHA, 1988).

$$\varphi_{3D} = \frac{\sqrt[3]{C \cdot L \cdot E}}{C} \quad 6$$

Foram utilizadas 3 amostras com 15 sementes, sendo que foram observados em testes preliminares que esse tamanho de amostra apresenta reprodutibilidade das medidas das dimensões e formas dos grãos de cevada.

A distribuição granulométrica dos materiais moídos foi medida por meio de metodologia gravimétrica em peneiras, para isto foi utilizado peneirador (Restche) com amplitude de vibração de 1 mm por 30 minutos. Cada experimento de distribuição granulométrica utilizou 50 gramas de material e peneiras de abertura de malha entre 0,090 mm e 1,4 mm, com base nas especificações de Allen (1990). Estes testes foram realizados com os tecidos externos (pericarpo, testa, aleurona e casca), núcleo (endosperma e embrião) e grãos (todas as partes) moídos.

3.3. Massas específicas da partícula e do sistema particulado

As medidas de massa específica real e aparente dos grãos de cevada foram obtidas por meio de picnometria gasosa (AccuPyc 1330 V3.03-Micromeritics) e líquida, respectivamente. Sendo que o gás utilizado de referência foi o hélio e o líquido foi o hexano.

Porém, observando os resultados constatou-se inconsistência na relação da massa específica aparente e real. Pois, os valores foram muito próximos indicando que não havia poros na estrutura no grão de cevada, o que não é coerente para materiais biológicos.

Portanto assumiu-se, inicialmente, que os diâmetros dos poros dos grãos de cevada eram muito grandes permitindo a difusão muito rápida das moléculas de hexano, não permitindo a medida da massa específica aparente com precisão.

Partindo desta hipótese foram implementadas algumas técnicas para a medida da massa específica aparente do grão de cevada, que foram descritas a seguir.

Foi medida a massa inicial de grãos de cevada (aproximadamente 2 g) em balança analítica (0,0001 g) e foi realizada a obstrução dos poros utilizando imersão em parafina fundida, para qual foi obtida a massa dos grãos recobertos. Desta maneira garantindo que, a maior parte dos macroporos dos grãos estava recoberta por parafina, não permitindo a absorção do líquido (ASTM C914-95, 2004).

O líquido usado para esta técnica foi água devido à reduzida interação entre estes compostos.

Para cada picnometria foram contados os grãos na massa de aproximadamente 2 gramas, sendo possível a estimativa da massa de 100 grãos e também o volume médio de uma partícula.

Para a medida da massa específica do leito de grãos de cevada foi utilizada a técnica de empacotamento de um leito de sementes em proveta graduada, obtendo a massa específica do leito através da relação de massa e volume.

Porém, a medida de massa específica do leito foi separada em dois valores, que foram diferenciados na descrição da metodologia, a seguir.

As sementes foram colocadas na proveta, de volume de 250 mL, sob a ação da gravidade por meio do despejamento de aproximadamente 100 gramas de material. Com a medida deste volume foi estimada a massa específica do leito aerado pela relação de massa e volume. Após a obtenção deste valor, a proveta foi disposta em um suporte de madeira, no qual a altura máxima que a proveta poderia subir da base do suporte era de aproximadamente 8 cm.

No suporte a proveta foi levantada a altura máxima e solta em condições aproximadas de queda livre. Estas batidas longitudinais (ou impactos) foram

realizadas até que não houvesse variação do volume observado na proveta, obtendo-se o valor de massa específica do leite empacotado pela relação de massa e volume (Lima, 2009).

3.4. Porosidade da partícula e do sistema particulado

Por meio das massas específicas medidas foi possível a estimativa das porosidades interpartículas e intrapartículas (MOHSENIN, 1970).

A porosidade intrapartículas ($\varepsilon_{particula}$), porosidade interna do grão, foi obtida pela relação da massa específica aparente (ρ_{ap}) e real (ρ_{real}), conforme Equação 7.

$$\varepsilon_{particula} = \left(1 - \frac{\rho_{ap}}{\rho_{real}}\right) \cdot 100 \quad 7$$

A porosidade interpartículas (ε_{leito}), porosidade entre os grãos em um leite, foi obtida pela relação da massa específica aparente (ρ_{ap}) e do leite (ρ_{leito}), conforme Equação 8.

$$\varepsilon_{leito} = \left(1 - \frac{\rho_{leito}}{\rho_{ap}}\right) \cdot 100 \quad 8$$

A porosidade total (ε_{total}), porosidade interna dos grãos e entre os grãos em um leite, foi obtida pela relação da massa específica real (ρ_{real}) e do leite (ρ_{leito}), conforme Equação 9.

$$\varepsilon_{total} = \left(1 - \frac{\rho_{leito}}{\rho_{real}}\right) \cdot 100 \quad 9$$

Para todos os casos que foram realizados estas medidas, o procedimento foi realizado com três repetições.

3.5. Condutividade térmica

A medida da condutividade térmica efetiva do leito de sementes foi feita por meio do método da sonda linear, em regime transiente e meio estagnado. Devido à grande variabilidade deste experimento na preparação e configuração dos meios porosos, esta medida foi realizada variando diferentes técnicas de empacotamento e avaliando o valor medido de condutividade térmica.

As diferentes técnicas de empacotamento resultaram em uma variação da massa específica do leito, proporcionando uma variação de porosidade do meio poroso. Desta forma, foi possível avaliar os valores de condutividade térmica efetiva em diferentes porosidades para os materiais moídos: grão e casca.

A primeira configuração de leito foi obtida com o empacotamento aerado, ou seja, o material moído foi despejado na célula de medida de uma altura fixa, tomando cuidado para que não houvesse impactos, evitando assim que o leito reduzisse seu volume inicial.

A segunda configuração de leito foi obtida com o leito empacotado, os materiais moídos foram despejados de uma altura fixa, e então, foram realizados impactos em queda livre, de uma altura de aproximadamente 8 cm, até que o volume não se alterasse.

Para a terceira configuração de leito, os materiais moídos foram dispostos na célula de medida, seguindo o mesmo procedimento da segunda configuração e compactados por meio de impactos sobre a superfície superior do meio poroso.

Para a realização destes impactos utilizou-se um sistema semelhante a um êmbolo, que consistia em uma base de PVC perfurada acoplada a um tubo de cobre. O tubo de cobre apresentou 30 cm de altura e 6,4 mm de diâmetro interno, o mesmo diâmetro interno continuava na base de PVC do sistema de compactação.

Neste tubo, com o auxílio de uma marreta emborrachada foram aplicados impactos, tomando o cuidado de manter aproximadamente a mesma força em cada impacto. Durante os impactos a base de PVC comprimia a superfície do meio poroso, reduzindo a porosidade. Estes impactos foram realizados, até que não houvesse mais redução do volume do leito.

Para a posterior inserção da sonda no meio poroso, uma guia para manter um espaço suficiente para as dimensões da sonda foi utilizada. Esta guia foi construída em tubo maciço de cobre com altura de 28 cm e diâmetro de 6 mm.

Para a quarta configuração de leito, o material foi adicionado a célula de medida, seguindo o mesmo procedimento da segunda configuração e a compressão do leito foi realizada por uma prensa hidráulica. Neste processo de compactação aplicou-se a força de 1,5 toneladas. A força foi aplicada em três ciclos de carga e descarga, para possíveis acomodações do material no interior do leito.

Para a compressão do meio poroso, o mesmo embolo foi acoplado à prensa e também a mesma guia foi utilizada para manter o espaço em que foi inserida a sonda.

Para todas as formas de empacotamento foram adicionadas quantidades de materiais moídos até o preenchimento total da célula de medida de condutividade térmica, porém estas massas de materiais foram divididas em quatro partes para evitar grandes variações longitudinais devido à propagação de forças na preparação do leito.

Cada técnica de empacotamento foi repetida três vezes. Para cada repetição foram realizadas três replicatas de medida de condutividade térmica.

Além dos experimentos realizados com os grãos moídos foram realizados experimentos com os grãos inteiros e os polidos (conforme descrito no item 2.1. Obtenção do Material).

Entre as replicatas, os leitões foram mantidos aproximadamente por 18 horas sem fornecimento de calor, para que a condição homogênea de temperatura fosse satisfeita.

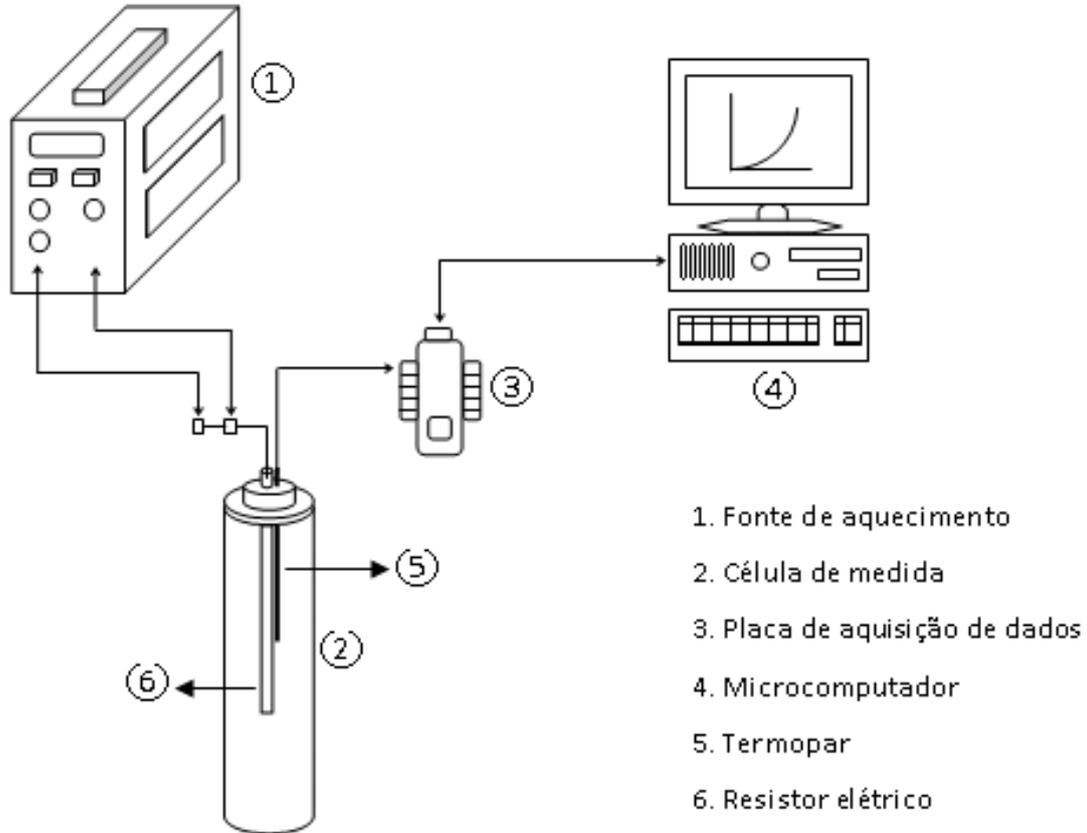
O sistema para medida desta propriedade está esquematizado na Figura 15, que consiste de uma sonda (6) composta por uma resistência elétrica isolada, com potência nominal de 600 W e tensão elétrica de 220 V, a geometria cilíndrica da sonda apresenta 6,4 mm de diâmetro e 26,5 cm de comprimento.

Para as medidas foi utilizada uma fonte elétrica regulada em tensão de $(9,75 \pm 0,15)$ V e corrente elétrica de 0,13 A, o calor fornecido por meio da resistência por unidade de comprimento (q) nestas condições foi de $(4,30 \pm 1,29)$ W/m.

Iniciando o fornecimento de calor pela fonte elétrica (1), foi realizada a medida da temperatura na parede da fonte com um termopar, tipo J (5), localizado na altura média longitudinal ao longo do tempo, estes dados foram lidos pela placa de aquisição da Personal daq/56, com cinco canais analógicos “*differentia*” e/ou dez

canais analógicos “*single-ended*” e cinco canais digitais e foram armazenados através de um microcomputador (4).

Figura 15 - Esquemática do sistema experimental de sonda linear (fonte: Perazzini, 2014).



Carslaw e Jaeger (1959) apresentam o modelo matemático e a sua solução para o caso de uma sonda linear infinita para uma geometria cilíndrica. Uma simplificação na solução leva a Equação 10, que é utilizada para a determinação da condutividade térmica efetiva (K_{eff}).

$$\frac{\partial T}{\partial \ln(t)} \cong \frac{q}{4 \cdot \pi \cdot K_{eff}}$$

10

Rearranjando a Equação 10, a condutividade térmica efetiva (K_{eff}) pôde ser estimada utilizando os dados experimentais obtidos, no equipamento conforme a Figura 15.

3.6. Propriedades fluidodinâmicas

Ao longo do tempo de polimento dos grãos de cevada foram observados que as propriedades físicas, como as dimensões, apresentaram variações devido a retirada dos tecidos externos, como era esperado. Desta forma, foram realizadas as avaliações de propriedades fluidodinâmicas, como permeabilidade, coeficiente de Forcheimmer e velocidade de mínima fluidização para os tempos de 2, 4, 6 e 8 dias de polimento e também para os grãos inteiros.

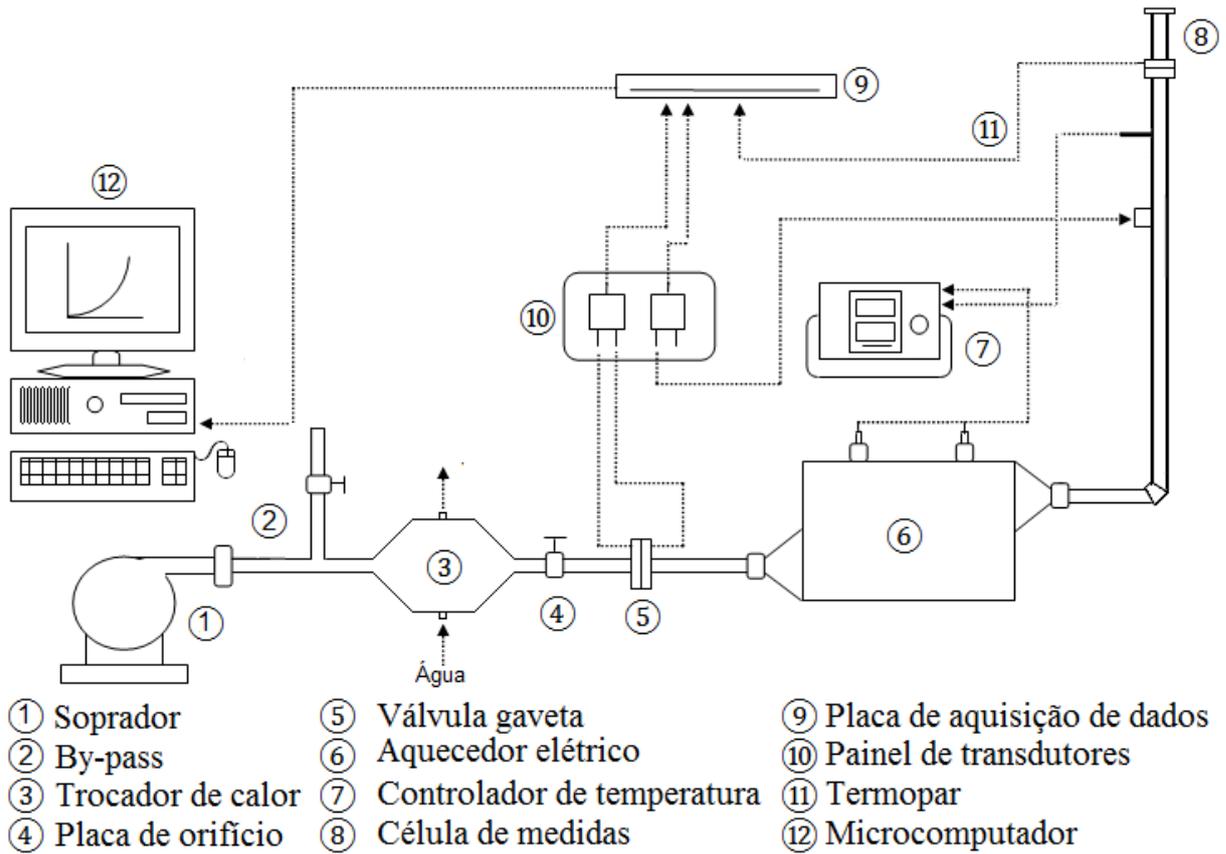
Para isto, foi construído e instrumentado um sistema de escoamento de ar, conforme Figura 16. Nesta Figura apresenta-se a esquematização da unidade fluidodinâmica, que consiste em um soprador de 2 HP de potência (1) que escoo o ar por uma tubulação de 2 pol. de diâmetro constante ao longo de toda tubulação, a vazão de escoamento foi controlada por válvulas do tipo gaveta de 2 pol. de diâmetro (2) constituindo um sistema “by-pass”, devido as baixas temperaturas necessária para a secagem de grãos e sementes, tem-se um trocador de calor casco-tubo (3), a medida de vazão do ar de secagem foi estimada através da perda de carga (Δh) de uma placa de orifício (5), calibrada através de um tubo Venturi padrão, conforme Equação 11.

$$\dot{V}[\text{m}^3/\text{min}] = a \cdot \sqrt{\Delta h [\text{cm coluna de água}]}$$

11

Por meio deste experimento, o valor da constante (a) da Equação 11 obtido foi de $(0,281 \pm 0,002) \text{ m}^3/(\text{min} \cdot \text{cm}^{1/2})$.

Figura 16 - Esquematização da unidade de fluidodinâmica e secagem em leito fixo e fluidizado (Adaptado de Perazzini, 2014).



O aquecimento do ar foi realizado através de um sistema de duas resistências elétricas, com 1000 W de potência cada, ligadas em série que compõe um sistema de aquecedor elétrico (6). Porém não foi utilizado o sistema de aquecimento para os experimentos fluidodinâmicos, pois se necessitava variar a velocidade e para valores muito baixos de velocidade, as resistências poderiam superaquecer. Porém, este componente foi utilizado nos experimentos de secagem, descritos posteriormente.

Antes da célula de fluidodinâmica (8) na tubulação vertical foram localizadas 5 placas defletoras, 8 diâmetros (aproximadamente 42 cm) abaixo da tomada de pressão para homogeneização do perfil de velocidades do ar de secagem. Além deste cuidado, a tubulação vertical apresenta cerca de 20 vezes o diâmetro do tubo para o desenvolvimento do escoamento do ar de secagem.

Para a verificação da queda de pressão na placa de orifício (4) foram utilizados transdutores de pressão da marca Auto Tran Incorporated, sendo que para as menores velocidades do ar foram utilizados um transdutor de faixa operacional de

0 a 2 pol. de água (modelo 600D2"1D14) e para maiores velocidades do ar com faixa operacional de 0 a 5 pol. de água (modelo 600D10"1D14). Isto permitiu que fosse possível uma maior precisão das medidas abaixo de 1 m/s, melhorando a reprodutividade das medidas para esta faixa de velocidade. A queda de pressão no leito foi obtida através de transdutores da mesma marca, com faixa operacional de 0 a 10 pol. de água, estas faixas operacionais foram determinadas com base em experimentos preliminares com auxílio de um manômetro de coluna de água.

Antes da entrada na célula (8) foi colocado um termopar encapsulado tipo T, com junção isolada e bainha em aço inoxidável de 3 cm de comprimento e 3 mm de diâmetro, esta medida foi utilizada pelo controlador de temperatura (7) Flyever FE50s com função de variar a potência fornecida as resistência do aquecedor elétrico (6) para se ter a temperatura desejada. A calibração dos termopares foi realizada em poço de calibração da marca Block Calibrator, DB- 35L.

Os instrumentos de medida de temperatura (termopares) e pressão (transdutores) foram recebidos por uma placa de aquisição (9) da Personal daq/56, com dez canais analógicos "*differentia*" e/ou vinte canais analógicos "*single-ended*" e dez canais digitais. Estes dados foram armazenados em um microcomputador (12).

A célula tinha forma cilíndrica, com aproximadamente 5 cm de diâmetro e 30 cm de altura. A altura do leito fixo inicial para todos os materiais foi de 3,5 cm, sendo que o empacotamento foi realizado conforme Zotin (1985).

Para a medida da permeabilidade foi acoplada a célula fluidodinâmica na saída na linha de escoamento de ar, com a vazão interrompida, realizando a primeira medida. Desta forma, sendo calibrada a tensão correspondente as variações de pressões zero, assim obtendo a relação de tensão e queda de pressão para os transdutores.

A partir disto, por meio das válvulas (itens 2 e 4 na Figura 15) aumentou-se a velocidade obtendo-se os dados de queda de pressão no leito para as diferentes velocidades até que foi observada a fluidização das partículas.

Com os dados experimentais de queda de pressão no leito (ΔP) em função da velocidade superficial (v) do ar na entrada do leito ajustados a Equação 12 foram obtidos a permeabilidade (κ) e o coeficiente de Forchheimer (c) (MASSARANI, 1989).

$$\frac{\Delta P}{H} = \frac{\mu_{ar}}{\kappa} \cdot v + \frac{c \cdot \rho_{ar}}{\sqrt{\kappa}} \cdot v^2$$

12

A espessura do leito (H) foi de aproximadamente 0,035 m como especificado anteriormente. Para as propriedades do ar, os valores foram de $1,85 \times 10^{-5}$ N.s/m² para viscosidade dinâmica do ar e 1,16 kg/m³ para massa específica do ar, estes valores foram obtidos por meio de Incropera e Dewitt (2003) para temperatura de aproximadamente 27°C.

Continuando o experimento de fluidodinâmica, após a fluidização do material aumentou-se a velocidade superficial do ar até aproximadamente 4 m/s. A partir desta velocidade, utilizando o conjunto de válvulas foi reduzida a velocidade, obtendo-se os valores de queda de pressão no leito para cada velocidade até que fosse interrompido todo o escoamento de ar pelo leito.

Por meio do método das retas tangentes foi estimada a velocidade de mínima fluidização.

Todas as propriedades fluidodinâmicas foram medidas para os grãos de cevada inteiros e para grãos polidos em 2, 4, 6 e 8 dias. As diferentes condições de polimento apresentam diferentes frações mássicas de materiais retirados dos grãos, com isso variando as propriedades do meio poroso para estas partículas.

O mesmo método foi realizado para avaliar os valores de velocidade de mínima fluidização para partículas esféricas de vidro “ballotini” com diâmetro médio de 925 μ m, densidade de 2,5 g/cm³ e altura estática de leito de 3,5 cm. Desta forma, avaliando a qualidade dos dados experimentais fornecidos pela unidade experimental construída, conforme Lima (2009).

Além desta avaliação, preliminarmente, constatou-se que as variações percentuais radiais de velocidade do ar e temperatura foram menores de 10%, valores razoáveis do ponto de vista da engenharia. As medidas de velocidade do ar e temperatura foram obtidas por termoanemômetro (TSI 8346).

3.7. Reumidificação estática e dinâmica

Para avaliação da transferência de massa foram realizados experimentos de reumidificação dos grãos de cevada por meios das metodologias estáticas e dinâmicas.

A seguir, foram descritas as metodologias e análises realizadas para os diferentes materiais.

3.7.1. Reumidificação dinâmica

Os experimentos de absorção de água foram realizados para 2, 4, 6 e 8 dias e para cada tempo de polimento foram obtidos dois lotes de sementes com diferentes bateladas.

A metodologia foi baseada no trabalho de Shimoda *et al.* (1998) e os detalhes estão descritos a seguir.

As reumidificações dinâmicas foram realizadas em agitador orbital da marca Tecnal (TE 420) com rotação de 210 RPM e temperatura de 25°C, foram utilizados erlenmeyer de 125 mL com 100 mL de água destilada e massa de sementes de 5 gramas.

Esta rotação foi escolhida com base em testes preliminares, onde se avaliou a movimentação dos grãos no interior dos erlenmeyer, de forma que os grãos tivessem uma boa mistura com a água. Esta condição foi satisfeita quando o grão estava totalmente suspenso no meio líquido. Esta temperatura possibilita um processo lento de absorção da água, podendo se observar de forma mais clara os efeitos das variações dos materiais na cinética de umidificação.

A imersão dos grãos foi interrompida em intervalos de 15 minutos no período inicial de 45 minutos. Após este período, os grãos ficavam imersos em intervalos de 45 minutos e novamente eram feitas interrupções do agitador.

As interrupções das imersões eram para as medidas de massa das sementes em balança (GE 400) de precisão de 0,001 g e as medidas de dimensões por análise de imagem. Para a medida da massa era feita a retirada da umidade superficial com um tecido de algodão. Após as medidas, os grãos eram imersos novamente na água destilada e continuava-se a agitação.

Os experimentos de reumidificação dinâmica foram realizados até que a umidade alcançasse valores próximos de 35 % em base úmida (ou 0,60 em base seca), de forma a garantir que somente os mecanismos físicos de difusão influenciassem no valor de umidade em função do tempo, evitando as fases com que a atividade fisiológica tivesse influência sobre o processo de difusão de água para o interior dos grãos conforme Brookes, Lovett e MacWilliam (1976).

Estes experimentos foram realizados para os grãos de cevadas inteiros e polidos por 2, 4, 5, 6 e 8 dias. Para cada tempo de polimento foram realizados dois experimentos (dois lotes para cada tempo) e para cada lote foram realizadas três cinéticas de absorção de água. Desta forma, foi possível analisar as reprodutibilidades dos experimentos de polimento com base nos desvios padrões das umidades entre as cinéticas de reumidificações nas mesmas condições de polimento. Para as sementes inteiras (sem polimento) foram realizadas três repetições dos experimentos de reumidificação.

Com base nos dados experimentais de cinética de reumidificação dos grãos de cevada nas diferentes condições de polimento e inteiros foram realizadas as modelagens da umidade dos grãos em função do tempo, para estimar a difusividade efetiva da água durante a imersão. Para isso foi utilizado o modelo difusivo considerando a resistência externa desprezível ($Bi_m \rightarrow \infty$).

Este modelo foi baseado na formulação pseudo-homogênea para um cilindro infinito, considerando um meio isotrópico, onde a concentração é relacionada ao conteúdo de umidade do meio poroso. Essa hipótese é razoável devido à mistura proporcionada pelo agitador orbital.

A partir destas constatações, por meio de uma analogia da Lei de Fick, tem-se a Equação 13.

$$\frac{\partial X^*(r,t)}{\partial t} = D_{\text{eff}} \cdot \left[\frac{\partial^2 X^*(r,t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial X^*(r,t)}{\partial r} \right] \quad 13$$

onde X^* é o adimensional de umidade, que é dado em função da umidade em base seca no tempo t (X_t), umidade final (X_f) e umidade inicial (X_o) (Equação 14).

$$X^* = \frac{X_t - X_f}{X_0 - X_f} \quad 14$$

Para resolução da Equação 13, foi considerado um cilindro infinito com raio de $0 < r < R$, com base nisto tem-se às seguintes condições inicial e de contornos, entre as equações Equação 15 a Equação 17.

$$\text{C. I.: } X^*(r, t)|_{t=0} = 1, (0 < r < R) \quad 15$$

$$\text{C. C. 1: } \lim_{r \rightarrow 0} X^*(r, t) = \text{finito}, (t > 0) \quad 16$$

$$\text{C. C. 2: } X^*(R, t) = 0, (t > 0) \quad 17$$

Com isto, para o tempo inicial este meio poroso tem um conteúdo de umidade em base seca inicial (X_0) e no centro (ou $r=0$) tem se um valor finito de umidade e na superfície ($r=R$) a resistência externa à transferência de massa é considerada desprezível.

Com base nestas condições de contorno e inicial e nas hipóteses estabelecidas por meio do método de separação das variáveis é encontrada uma solução para Equação 13, devido experimentalmente ser obtida a média da concentração de umidade espacial em função do tempo (\bar{X}^*), então, é aplicada a função média de uma variável ao longo de uma coordenada espacial (r), obtendo-se a Equação 18.

$$\bar{X}^* = 4 \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{1}{\gamma_n}\right)^2 \cdot \exp\left[-\gamma_n^2 \cdot \frac{D_{\text{eff}} \cdot t}{R^2}\right] \quad 18$$

onde γ_n são as raízes da função de Bessel de primeira ordem.

3.7.2. Reumidificação estática

A reumidificação estática foi feita em recipientes de vidros com vedação em PVC. Nestes recipientes foi adicionada uma massa de aproximadamente 200 g de

material, onde foi adicionada uma massa de água que forneceria um valor de umidade específico.

Para isto, a umidade inicial do material foi medida pelo método gravimétrico em estufa a $(105\pm 3)^{\circ}\text{C}$ por 24 horas. Com este valor de umidade, calculou-se a massa de água necessária para se obter um valor determinado de umidade. Após isto, o material foi mantido em refrigeração a temperatura de aproximadamente de 4°C até que o material se homogeneizasse com a água adicionada, mais que 48 horas.

As reumidificações forneceram valores aproximados de 5%, 11%, 20% e 30%. Sendo que, para menor umidade (5%), um processo de secagem foi realizado em estufa a 45°C por 72 horas.

Para as diferentes umidades, foi realizada a medida de dimensões, forma, massas específicas real, aparente e de leito e porosidades intrapartículas e interpartículas.

Os testes de reumidificação estática foram realizados com amostras de grãos inteiros e polidos.

Para estas caracterizações, foram preparadas três amostras para cada valor de umidade, para cada amostra foi realizado 3 repetições das medidas das propriedades.

3.8. Experimentos de transferência de calor e massa

Os experimentos de transferência de calor e massa foram realizados em diferentes meios de secagem, sendo estes, partícula isolada submersa, leito fixo submerso com escoamento tangencial, leito fixo com escoamento de ar intersticial (perpendicular) e leito fluidizado.

Os primeiros dois meios de secagem foram realizados em túnel de vento, que está esquematizado na Figura 17.

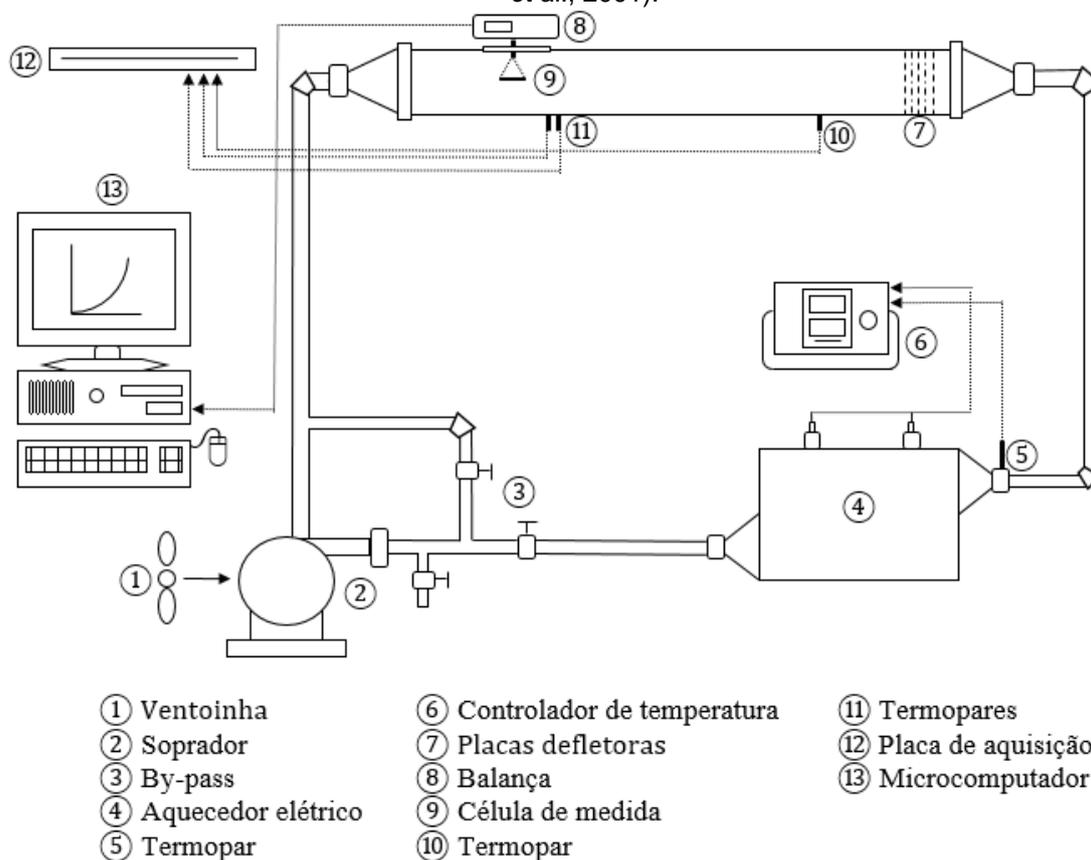
Uma ventoinha (1) circula o ar numa caixa de isolamento acústico para evitar superaquecimento do soprador (2). O soprador consiste num compressor radial (IBRAN), para o qual a vazão de ar é controlado por um conjunto de válvulas do tipo gaveta (3), formando um sistema de tubos para saída de ar e recuperação, após

estabelecida a vazão, o ar é aquecido por um aquecedor elétrico (4) com duas resistências em série de 750 W, a potência fornecida a estas resistências são controladas por controlador de temperatura (6) (Flyever FE50s). A temperatura controlada foi medida pelo controlador por meio de termopar, tipo T, (5) localizado na saída do aquecedor.

Após a etapa de preparação do ar, este foi escoado para a câmara de vento retangular de seção de 0,15 m x 0,10 m, no qual o comprimento foi de 2,5 m. Para homogeneização do escoamento do ar foi utilizado um sistema de placas defletoras (7), que garantiu o achatamento do perfil de velocidade e temperatura na seção transversal da câmara de vento.

Verificou-se com nove medidas, sendo 3 na altura e 3 no comprimento da seção transversal do escoamento, que as variações de temperatura e velocidade do ar na seção transversal do escoamento não ultrapassavam 10%, isto confirmou dados avaliados por Cassandre *et al.* (2001).

Figura 17 - Esquemática da unidade de secagem de corpos submersos (Adaptado de Cassandre *et al.*, 2001).



Além disto, observou-se que os menores desvios encontrados estavam centralizados na seção transversal do escoamento. Desta forma, definindo-se a melhor posição da amostra suspensa (9) na região central da seção transversal da câmara de ar. Para medidas de massa ao longo do tempo de imersão no escoamento de ar, a célula de medida foi acoplada a uma balança semi-analítica (0,001 g) (Gehaka BG400). Diferentes suportes foram utilizados para manter a amostra suspensa e estes serão descritos posteriormente.

A balança obtinha as medidas de massa em intervalos de aproximadamente 0,95 s, então se transferia estes dados por meio de porta serial RS-232 para o microcomputador (13). No microcomputador os dados foram lidos e armazenados pelo software Hyperteminal.

Um termopar localizado aproximadamente a um metro após as placas defletoras mediu a temperatura do ar e dois termopares foram localizados próximos da posição da amostra para as medidas de transferência de calor. Estes dados de temperaturas eram transferidos para uma placa de aquisição (Personal Pdaq/56) e no microcomputador estes dados eram recebidos e armazenados com software da placa de aquisição.

Para a medida da transferência de calor no grão de cevada, foi realizada a medida da temperatura no centro do grão de cevada e na superfície do grão de cevada. Estas medidas foram realizadas com um termopar implantável (tipo T) da Cole Parmer, tendo em vista que estes termopares eram muito finos e não ofereciam grandes perturbações ao escoamento.

Para a medida da temperatura superficial, os grãos de cevada foram colocados sobre uma base circular de cobre (diâmetro 15 mm), na qual um termopar foi fixado a parede da superfície de cobre com fita adesiva de alumínio (423 3M).

Para a medida simultânea da temperatura do centro do grão, um termopar foi implantado no seu interior. Isto foi possível com a perfuração do grão com uma agulha de aproximadamente 1 mm de diâmetro, para a centralização deste furo, iniciou-se a perfuração na extremidade oposta do embrião e verificou-se se a agulha saiu centralizada no embrião. Caso isso não fosse satisfeito a amostra era descartada e reiniciava-se o procedimento de perfuração.

Com a perfuração realizada, o comprimento do grão foi medido com paquímetro (0,01 mm), então o termopar foi inserido, sendo que o comprimento de termopar implantado correspondia a meio comprimento do grão. Para evitar efeitos de contato, o termopar foi inserido envolto em uma grossa camada de pasta térmica (implastec). O grão foi posicionado com a região dorsal exposta ao escoamento livre.

A Figura 18 mostra o grão de cevada inteiro com o termopar implantável no seu interior.

Figura 18 - Imagem de um grão de cevada implantado (Fonte: Acervo Pessoal, 2018).



Após esta preparação, iniciava-se a aquisição de temperaturas e então o sistema de grão e termopar foi inserido no escoamento de ar.

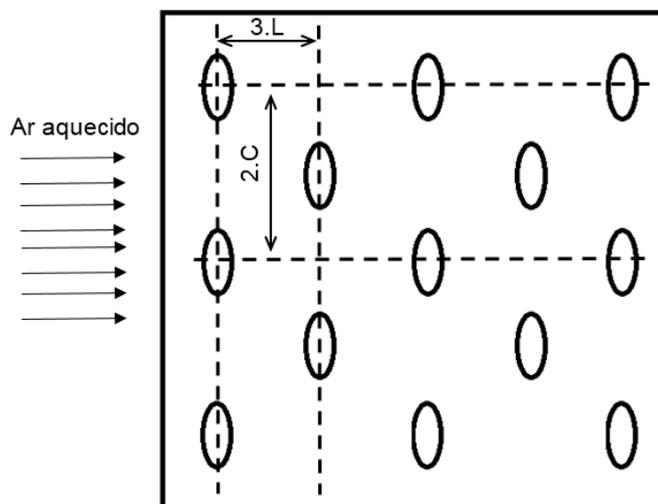
Uma análise final foi realizada por meio da calorimetria (SHIMADZU, DSC-50) diferencial de varredura (do inglês "*Differential Scanning Calorimetry – DSC*") em que o fluido utilizado foi o nitrogênio. Inicialmente foi feita uma rápida rampa de aquecimento de 20°C/min até 60°C, permanecendo nesta temperatura. Esse procedimento foi montado para representar o mais integralmente possível os experimentos de secagem realizados, de forma a identificar eventos endotérmicos ou exotérmicos nestas configurações experimentais. O cadinho utilizado foi de alumínio e o grão foi posicionado com a face dorsal livre.

Este experimento foi realizado para grão inteiro e polido, tanto para úmido quanto para seco. Sendo que o grão úmido foi obtido com aproximadamente 30% (b.u.) de umidade por método de reumidificação estática e o grão seco foi com umidade de armazenamento (11,42±0,15)%.

Para as medidas de transferência de massa de partículas isoladas submersas foram realizados experimentos de secagem. Para isto, foram feitas as

medidas de massa em relação ao tempo de contato do material com o escoamento de ar aquecido. O suporte da amostra foi uma tela rígida quadrada de aproximadamente 5 cm de lado e abertura de malha de aproximadamente 2,5 mm, onde 13 grãos foram posicionados conforme Figura 19.

Figura 19 - Disposição dos grãos de cevada para os experimentos de secagem com partículas isoladas submersas (Fonte: Acervo Pessoal, 2018).



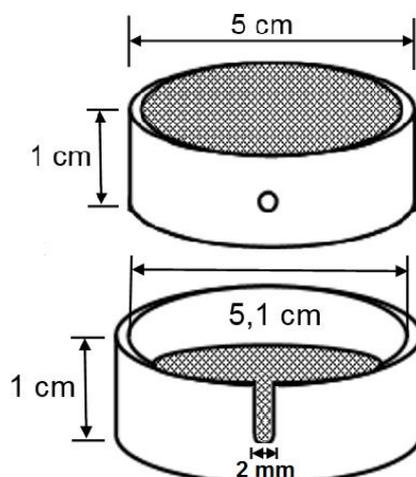
Na direção axial do escoamento os grãos foram distanciados em aproximadamente três vezes a largura do grão e no sentido perpendicular ao escoamento a distância foi de aproximadamente duas vezes o comprimento do grão. Com isto, buscou-se ter o menor efeito do grão a jusante no grão a montante do escoamento de ar. Estes valores foram estabelecidos por meio de experimentos preliminares, em que se observou que com um menor número de grãos e com maior espaçamento entre eles, não houve influência na cinética de secagem, porém os desvios de padrões das perturbações do escoamento sobre a estabilidade da medida da massa representaram uma maior porcentagem em relação a média.

Para a medida da massa dos grãos foi utilizado o sistema de aquisição online, conforme Figura 17.

Para a medida de temperatura durante a transferência de calor de leito fixo com escoamento de ar tangencial utilizou-se uma célula circular, construída em aço

galvanizado, para contenção dos grãos. A espessura do leito fixo foi de 1 cm e diâmetro de 5,1 cm, aproximadamente, que foi esquematizada na Figura 20.

Figura 20 - Detalhes da célula de medida para leito fixo com escoamento tangencial (Fonte: Adaptado de Perazzini, 2014).

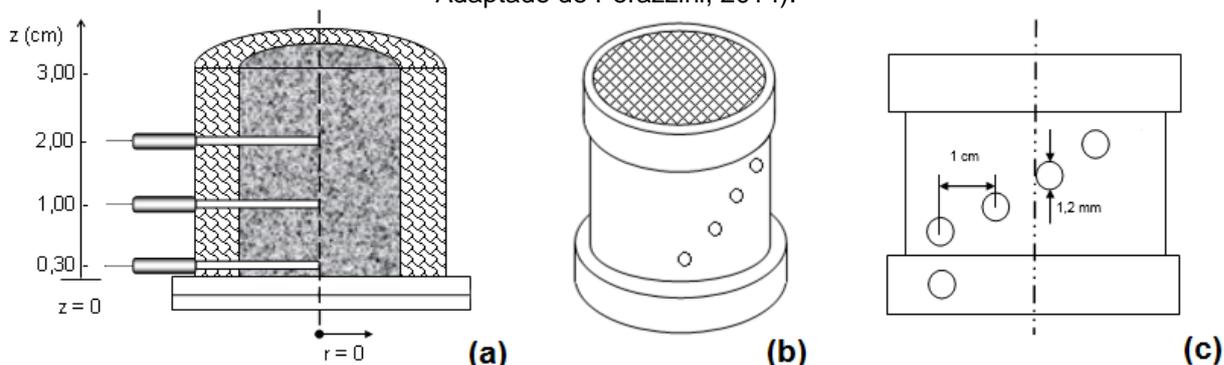


Na base da célula de medida foram soldados quatro correntes de aço, as quais foram unidas por um gancho, pelo qual a célula foi suspensa. Para as medidas de temperatura no centro do leito foi utilizado um termopar com 1,2 mm de diâmetro do tipo T.

Para as medidas de transferência de massa foram obtidos dados de cinética de secagem do leito de grãos de cevada com escoamento tangencial. Este experimento foi realizado na mesma célula da Figura 20, porém sem o furo de inserção do termopar. E o gancho que unia as correntes (presos na base) foi fixado na balança semi-analítica da Figura 17 (item 8). Para este experimento foi utilizado o sistema de aquisição online de massa da Figura 17 (itens 8, 9 e 13).

Para as medidas de transferência de calor em leito fixo com escoamento de ar intersticial, ou seja, perpendicular a área da base do leito foi realizada medidas de temperatura axiais ao escoamento. Foram feitas medidas em célula de seção circular, com diâmetro de aproximadamente 5,1 cm e altura de leito de aproximadamente 3 cm que pode ser vista na Figura 21.

Figura 21 – Detalhes das células de medidas de leito fixo com escoamento de ar intersticial (Fonte: Adaptado de Perazzini, 2014).



Para este experimento foi obtido a temperatura da mistura (ar e sólido), por isso a primeira medida foi feita em 0,3 cm, para que não fosse localizado na base do leito e fosse medida apenas a temperatura do ar. Da mesma maneira na extremidade superior, devido ao leito úmido encolher durante a medida, o leito preparado teve 3 cm de altura, mas a medida de temperatura foi apenas até 2 cm.

Para a medida de transferência de massa foi realizada a secagem com a mesma célula da Figura 21, porém com apenas 1 cm de altura de leito fixo. Para a medida da massa de grãos, a amostra era retirada em intervalos de tempo que tinha variação de massa maior que 100 mg, onde o intervalo de tempo inicial foi de 2,5 min. Estes critérios de intervalos de medidas da massa foram realizados para leito fixo com escoamento intersticial e leito fluidizado.

Por fim, a medida de transferência de calor em leito fluidizado foi realizada com a temperatura de entrada e de saída do leito. Para o experimento de secagem e de transferência de calor foi utilizada a célula descrita para os experimentos de fluidodinâmica (seção 2.6).

Para todos os experimentos de transferência de calor, exceto com partículas isoladas submersas, foram utilizados termopares do tipo T, com diâmetro de 1 mm e comprimento de 2,56 cm, aproximadamente.

Todos os experimentos de secagem e de transferência de calor foram realizados com temperatura de 60°C e velocidade do ar de aproximadamente 1 m/s.

Exceto para o leito fluidizado que foi utilizado uma velocidade 50% acima da mínima fluidização, para se garantir uma mistura homogênea.

A temperatura foi definida com a maior temperatura possível no túnel de vento (Figura 17). Desta maneira, optou-se por essa máxima temperatura para se

umentar a diferença da temperatura do escoamento com a temperatura ambiente. Assim, favorecendo a redução de incertezas das medidas de transferência de calor nos grãos de cevada.

A velocidade foi definida com base nas oscilações da medida da massa da célula da Figura 20 vazia, para velocidades maiores que 1 m/s, a amostra oscilava mais, com isso oscilando a medida da massa, tendo-se desvios maiores que 10%. Assim, definiu-se a velocidade do ar em 1 m/s para os experimentos de transferência de calor e massa.

Todos os experimentos de secagem foram realizados com grãos inteiros e polidos e para os experimentos de transferência de calor estes grãos foram preparados úmidos e secos, para avaliação dos efeitos da umidade.

Os grãos úmidos foram reumidificados pela metodologia estática descrita anteriormente, a umidade foi de aproximadamente 30%.

Os grãos secos para a transferência de calor eram obtidos após secagem até massa estável nas mesmas condições operacionais. Após isto, estes grãos eram armazenados refrigerados (temperatura de 4°C) até os experimentos de transferência de calor, em placas de petri vedadas com PVC.

Os grãos secos que precisavam ter os furos para as medidas das temperaturas do seu centro foram secos, nas mesmas condições com as agulhas no seu interior, para que seus furos não encolhessem com a secagem e impossibilitasse a implantação do termopar.

A umidade adimensional durante a secagem foi calculada conforme Equação 14.

3.9. Análise e tratamento dos dados

Os dados descritivos, como dimensões, forma, entre outros, foram avaliados suas distribuições pelo teste de Shapiro Wilk, as comparações entre valores com distribuições normais foram realizadas pelo teste de Tukey, sendo possível avaliar se as diferenças entre as médias apresentam uma variação estatisticamente significativa com base no desvio padrão entre estes dados e suas distribuições (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2011; D'HAINAUT, 1997).

Os ajustes de equações foram avaliados por meio de coeficientes estatísticos com base nos melhores valores de variância explicada e erros quadrados médios entre os dados experimentais e o modelo matemático.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Inicialmente, os resultados deste trabalho abrangeram a avaliação dos efeitos do polimento sobre as propriedades físicas e de transportes dos grãos de cevada. Para este estudo foi definida condições de polimento em que as propriedades não tiveram efeitos dos tecidos externos ao endosperma. Desta maneira, definiu-se o tempo de polimento para o qual foram avaliados os efeitos dos tecidos externos na transferência de calor e massa.

Então foram avaliados os efeitos dos tecidos externos e do meio de secagem sobre os fenômenos de transferência de calor e massa.

4.1. Obtenção dos materiais

A fração mássica dos tecidos externos (pericarpo, testa, aleurona e casca) dos grãos de cevada foi de $(7,78 \pm 0,49)\%$.

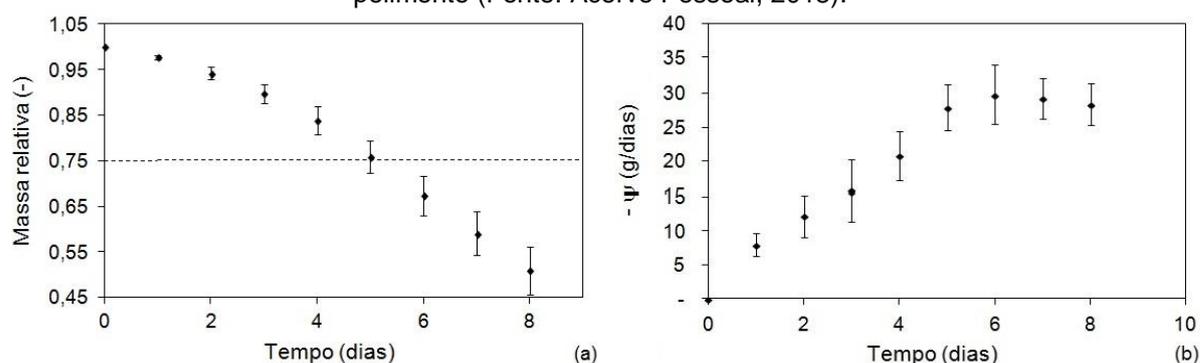
Para processos de descascamento por atrição, Gray *et al.* (2010) e Gamel e Abdel-Aal (2012) afirmaram que com a remoção da fração mássica entre 11 a 15% retira-se parte da casca, pericarpo e testa entre 22 a 25% retira-se também parte da aleurona e testa.

Esse resultado mostra que devido a dependência do contato entre a superfície abrasiva e as partículas, o processo de atrição precisa retirar uma parte do endosperma e do embrião para que os tecidos externos (pericarpo, testa, aleurona e casca) não tenham efeito sobre as características do grão.

Tendo como base essas características foram comparadas as frações mássicas retiradas dos grãos de cevada por outras técnicas utilizadas neste trabalho.

Para o polimento lento, têm-se na Figura 22, os dados experimentais de cinética de atrição dos grãos de cevada.

Figura 22 - Resultados da (a) massa relativa e (b) taxa da redução de massa em função do tempo de polimento (Fonte: Acervo Pessoal, 2018).



Pode-se observar na Figura 22a que, quanto maior o tempo de polimento maior foram os desvios da medida da massa das sementes, isso se deve à prolongação do processo de polimento surgindo alguns efeitos não esperados, como a quebra das sementes.

Além disto, algumas sementes podem ter ficado aderidas às paredes das lixas ou no meio do pó, produzido pelo lixamento, que foram descartados durante a limpeza do tambor e a troca das lixas.

Constata-se pela Figura 22a que em 5 dias de polimento 25% de material foi retirado da superfície do grão, que conforme Gray *et al.* (2010) e Gamel e Abdel-Aal (2012) para esta fração, todos os tecidos de proteção foram retirados. Pela Figura 22b pode-se observar que a taxa da remoção de material a partir do quinto dia de polimento mudou seu perfil.

Antes de 5 dias de polimento a taxa teve um crescimento aproximadamente linear e após este tempo foi constante (Figura 22b), indicando que antes de 5 dias a presença de tecidos de proteção ofereceria uma resistência à atrição mecânica. Conforme esses tecidos foram retirados, aumentava-se a taxa de remoção de material. Quando ocorreu a retirada total dos tecidos foi observada que a taxa de remoção de material foi constante, devido ao endosperma e embrião oferecer uma resistência radial homogênea para a atrição mecânica.

Isso confirma e se mostra de acordo com as informações de Gray *et al.* (2010) e Game e Abdel-Aal (2012), podendo ser inferido que, os tecidos externos oferecem uma resistência mecânica para a proteção do endosperma e embrião, importantes na germinação e atividade fisiológica do grãos.

Na Figura 23b podem-se visualizar as superfícies das lixas e dos grãos de cevada ao longo do polimento. Constata-se por essas imagens que a partir do quinto

dia de polimento, o endosperma não estava mais recoberto pela casca, apenas uma pequena quantidade da casca recobria o embrião.

Na Figura 23a verifica-se que as superfícies das lixas a partir do terceiro dia estavam recobertas por uma grande quantidade de material branco, característico do endosperma.

Após as análises da cinética de remoção de massa por polimento e a observação dos resultados com a literatura, foi possível a análise dos resultados para a técnica de impactos mecânicos, seguido de polimento por 24 horas.

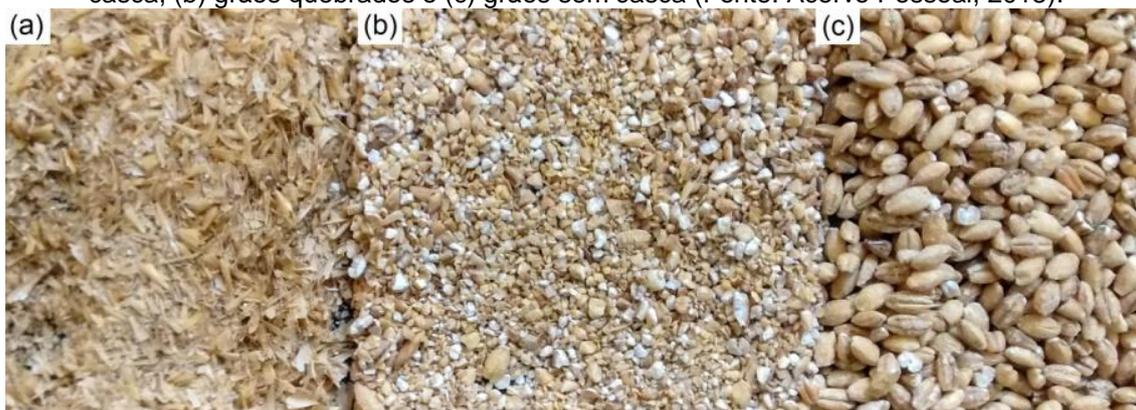
A fração mássica retirada por impactos mecânicos foi de $(6,77 \pm 0,30)\%$, que corresponde ao material na Figura 24a. Observa-se que este valor de fração foi menor que o valor de fração mássica dos tecidos externos (retirada manual), indicando que esta fração removida era constituída principalmente de casca.

Figura 23 - Imagens das (a) superfícies das lixas e das (b) sementes ao longo dos dias de polimento (Fonte: Acervo Pessoal, 2018).



Isto era esperado, pois o material da casca tem propriedades mecânicas características de material frágil, que com os impactos se rompem facilmente e assim desprendem-se dos grãos de cevada.

Figura 24 - Imagem dos três materiais obtidos após impactos dos grãos de cevada: (a) partículas da casca, (b) grãos quebrados e (c) grãos sem casca (Fonte: Acervo Pessoal, 2018).



A diferença observada entre as frações mássicas retiradas pelas técnicas de impactos mecânicos e descascamento manual mostra que nem todos os tecidos externos foram retirados da superfície dos grãos (Figura 24c), sendo necessária uma etapa de polimento para a retirada dos tecidos restantes.

A fração mássica retirada com 24 horas de polimento foi de $(14,30 \pm 0,47)\%$, somando-se este valor a fração mássica retirada por impactos mecânicos obtém-se que a fração mássica total retirada foi de aproximadamente 21,07%, valor próximo aos estabelecidos por Gray *et al.* (2010) e Gamel e Abdel-Aal (2012).

Na Figura 25 podem-se comparar os grãos de cevada antes (Figura 24c) e depois do processo de polimento final. Constata-se nesta Figura que os resquícios de casca foram retirados e uma maior homogeneidade foi conferida a estes materiais com o polimento final.

Figura 25 – Imagem dos materiais na etapa de polimento: (a) grãos de cevada sem casca e (b) grãos de cevada polidos (Fonte: Acervo Pessoal, 2018).



Após a avaliação da obtenção dos diferentes materiais, pode-se seguir com a análise dos resultados de caracterização das propriedades físicas e de transporte.

4.2. Propriedades físicas extensivas e intensivas

4.2.1. Dimensões

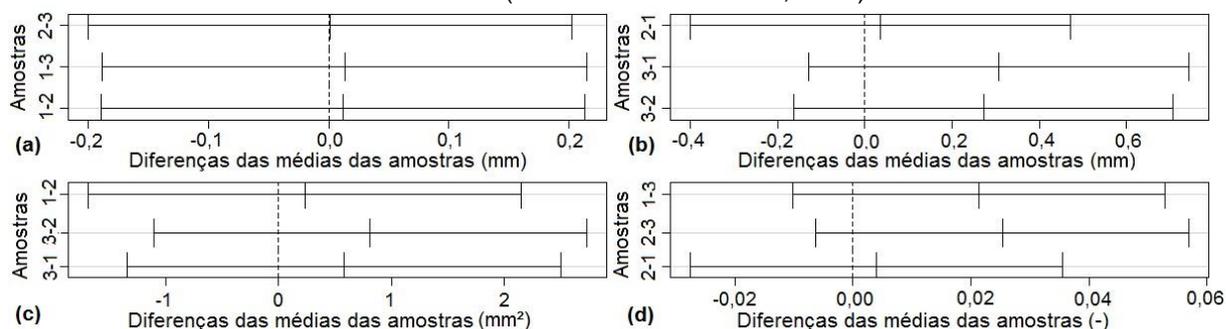
Foram realizados testes de reprodutibilidade das medidas de dimensões com amostras de 15 e 45 grãos em triplicata, para estas amostras foram realizadas as medidas de diâmetros máximo e mínimo, área projetada e esfericidade.

Para todas as amostras foram confirmadas as distribuições normais dos dados de diâmetros, área projetada e esfericidade com nível de confiança de 95% para o teste de Shapiro-Wilk, o teste paramétrico foi realizado para as amostras com 15 e 45 grãos apresentando p-valor maior que 0,05.

Na Figura 26 estão apresentados os resultados dos testes de Tukey HSD para as medidas de dimensões e esfericidade para as 3 amostras com 15 grãos.

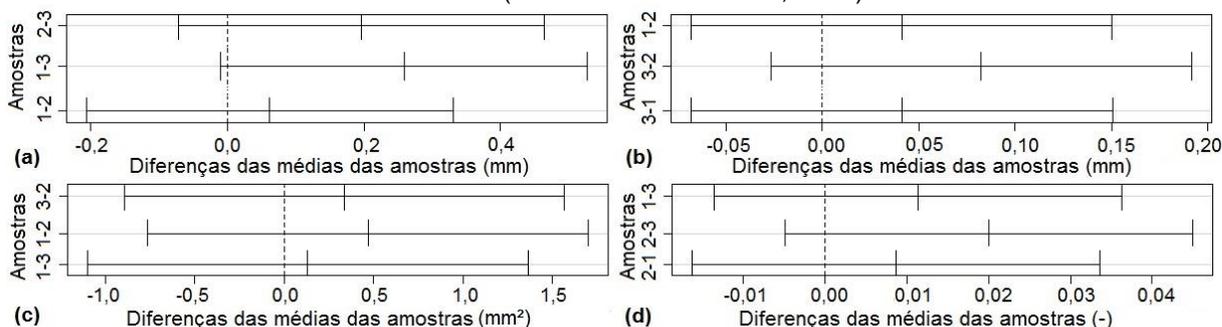
Na Figura 27 estão ilustrados os intervalos de confiança das diferenças das médias das amostras para o diâmetro máximo e mínimo, área projetada e esfericidade (Equação 5) para as 3 amostras de 45 sementes.

Figura 26 - Resultados do teste de Tukey HSD para as diferenças entre as médias das amostras com 15 grãos para as medidas do (a) diâmetro máximo, (b) diâmetro mínimo, (c) área projetada e (d) esfericidade (Fonte: Acervo Pessoal, 2018).



Pode-se ver na Figura 26 e Figura 27 que no eixo vertical estão detalhadas as amostras comparadas e no eixo horizontal estão os intervalos de confiança da diferença das médias das amostras. Quando o intervalo de confiança inclui o zero, pode-se constatar que as diferenças entre as amostras não foram significativas entre si.

Figura 27 - Resultados do teste de Tukey HSD para as diferenças entre as médias das amostras com 45 grãos para as medidas do (a) diâmetro máximo, (b) diâmetro mínimo, (c) área projetada e (d) esfericidade (Fonte: Acervo Pessoal, 2018).



Com base nesses resultados, pode-se constatar que, para a caracterização das dimensões e esfericidade dos grãos de cevada podem ser utilizados 15 elementos em cada amostra. Isto se deve à constatação de que as diferenças das médias das medidas dos grãos de cevada com 15 grãos foram poucas significativas pelo teste de hipótese do teste estatístico de Tukey HSD, o mesmo pode ser verificado para amostras com 45 grãos de cevada.

As medidas das dimensões das sementes inteiras armazenadas estão dispostas na Tabela 3.

Tabela 3 - Medidas das dimensões das sementes de cevada inteiras separadas.

Diâmetro (mm)			Área projetada (mm ²)	Largura (mm)	Espessura (mm)	Comprimento (mm)
Máximo	Médio	Mínimo				
8,43±0,13	4,99±0,08	3,46±0,05	22,74±1,01	3,71±0,06	2,72±0,04	8,67±0,24

Para esses grãos o fator de forma, esfericidade, foi calculado por meio das Equações 5 e 6, obtendo os valores de $0,54 \pm 0,02$ e $0,51 \pm 0,01$, respectivamente. Estes valores de dimensões e formas correspondem aos grãos inteiros com $(11,53 \pm 0,11)\%$ de umidade em base úmida.

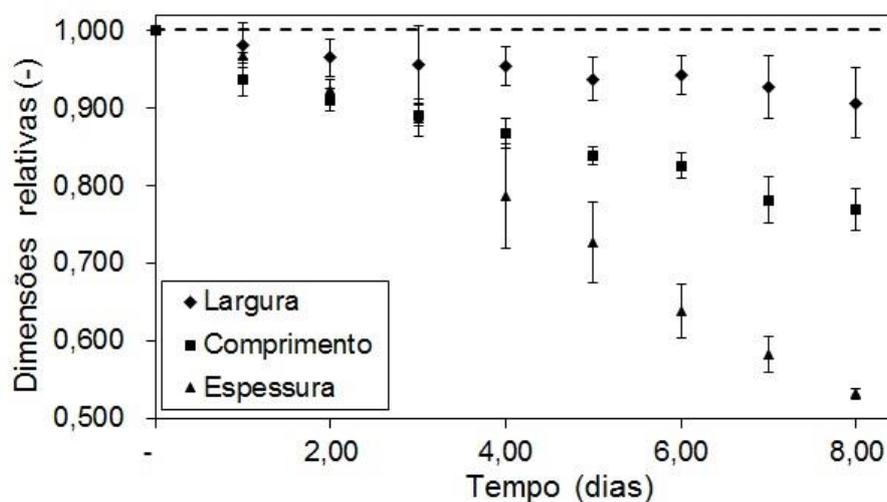
Estes resultados, de esfericidade e dimensões, foram as médias e desvios para as 3 amostras com 45 grãos, totalizando 135 grãos medidos.

4.2.2. Dimensões e forma durante o polimento

Na Figura 28 estão dispostos os valores de dimensões relativas, que consiste na dimensão no tempo t dividido pela inicial (ou seja, grãos inteiros), em função do tempo de polimento.

Pode-se verificar que a espessura tem uma maior variação quando comparada com a largura e o comprimento, isto se deve a posição do centro de massa desses grãos. Para haver uma maior estabilidade, os grãos de cevada permaneceram em posição que há uma maior redução da espessura durante o polimento.

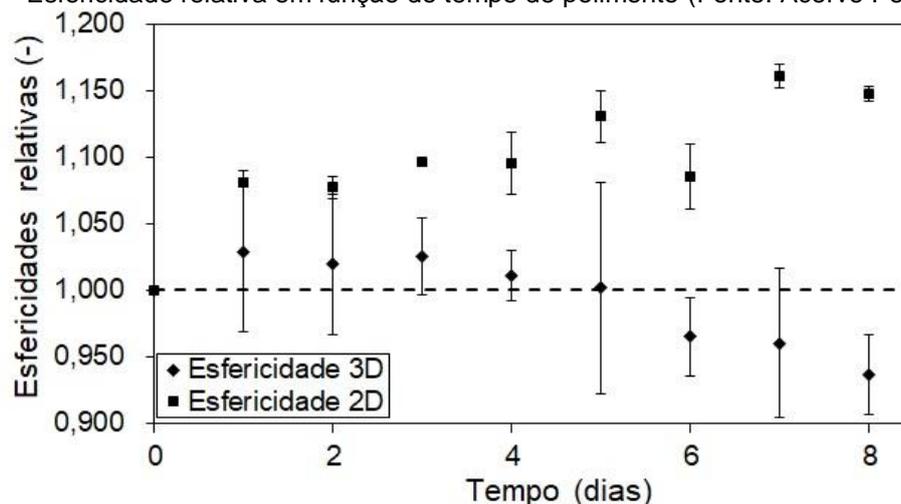
Figura 28 - Dimensões relativas em função do tempo de polimento (Fonte: Acervo Pessoal, 2018).



Também se pode observar que o comprimento tem uma maior variação quando comparado com a largura, isto se deve à casca formar uma estrutura alongada em torno do endosperma. Conforme ocorrem as atrições e os impactos observa-se a quebra destas extremidades da casca, provocando uma maior redução do comprimento em função do tempo de polimento quando comparada a largura. Isto também pode ser observada pelas fotos dos grãos em função do tempo de polimento na Figura 23.

Estas variações das dimensões provocam uma variação na forma dos grãos de cevada. Na Figura 29 estão as esfericidades relativas em função do tempo de polimento.

Figura 29 - Esfericidade relativa em função do tempo de polimento (Fonte: Acervo Pessoal, 2018).



As esfericidades tridimensionais foram estimadas por meio da Equação 6 e as bidimensionais por meio da Equação 5. Observa-se que para os desvios das medidas tridimensionais, a esfericidade até cinco dias, incluem a linha para esfericidade relativa igual a unidade, indicando que nenhuma variação na forma foi observada até o quinto dia de polimento, um pequeno desvio negativo é observado após o quinto dia, mas ainda não ultrapassando 7%.

Quando se compara os resultados de esfericidade tridimensional com a Figura 28 estas variações estão claramente representadas. Observa-se que até o quarto dia as variações de espessura e comprimento são semelhantes, logo após este tempo de polimento a espessura começa a ter uma redução maior em relação a largura, a partir deste momento a esfericidade é reduzida pois a partícula sai de uma forma mais elipsoidal tendo um aplanamento da espessura.

Por meio da Figura 28 pode-se observar que o crescimento do valor da esfericidade bidimensional foi devido à maior variação do comprimento em relação à largura, fazendo com que as imagens projetadas dos grãos formassem imagens mais circulares que as iniciais, o que fica claro por meio da Figura 23.

O aumento da variação da espessura comparada à largura (Figura 28), a partir do quinto dia mostrou-se importante, sendo que foi observado na Figura 22 que por meio da cinética de redução de massa dos grãos de cevada pode-se inferir que os tecidos externos não têm influência a partir deste tempo de polimento.

Se as resistências mecânicas dos tecidos externos foram maiores do que no endosperma e observando que as variações de largura e espessura foram semelhantes nos tempos iniciais de polimento, pode-se inferir que a resistência da casca a força de cisalhamento sobre a superfície dos grãos retirava uma pequena quantidade de massa e rotacionava as partículas, tendo uma remoção de material mais uniforme na seção tangencial do grão.

Após a lenta e progressiva retirada da resistência mecânica da casca, a partir do quinto dia, a força de cisalhamento da lixa sobre a superfície dos grãos removia uma maior massa e, além disso, reduzia o movimento de rotação dos grãos de cevada, fazendo com que as partículas permanecessem na posição de maior estabilidade do centro de massa, provocando uma maior redução da espessura em relação à largura.

Todavia estas variações não provocaram valores muito menores ou maiores que a unidade para a esfericidade relativa tridimensional, tendo um valor mínimo relativo de 0,93 para o oitavo dia de polimento.

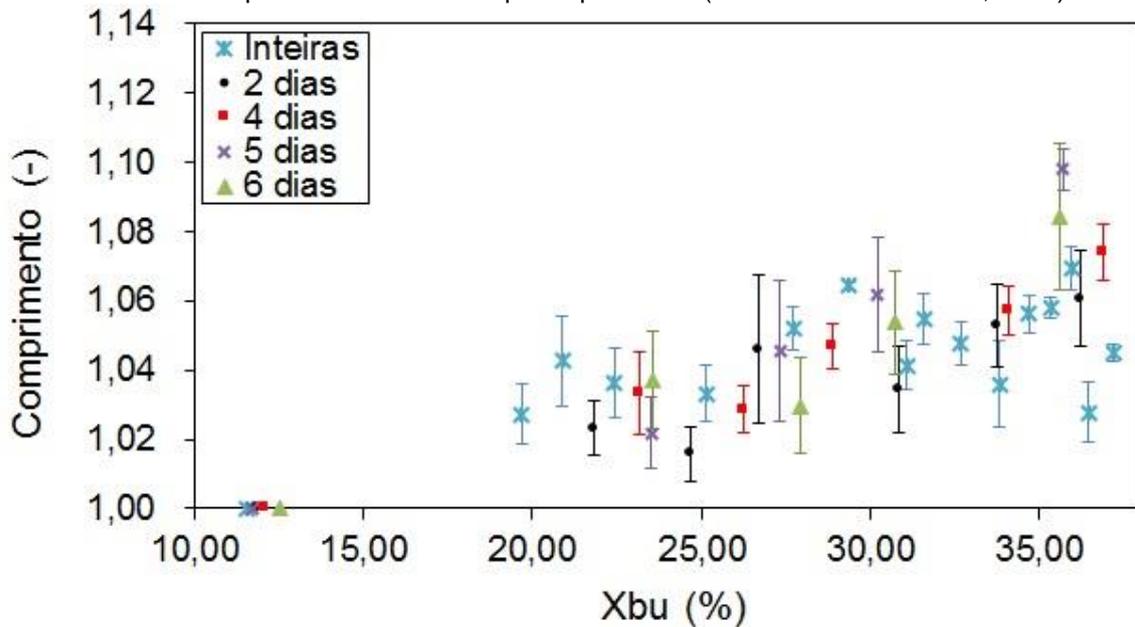
4.2.3. Dimensões durante a reumidificação dinâmica

Na Figura 30 foram apresentados os resultados de comprimento relativo dos grãos de cevada em função da umidade em base úmida durante o processo de reumidificação dinâmica para grão inteiros (sem polimento) e para 2, 4, 5 e 6 dias de polimento. Para oito dias de polimento, os resultados das dimensões em função da umidade em base úmida não foram apresentados, devido à alta fração de amido lixiviada com a imersão dos grãos em água, a análise destes resultados não foi confiável.

Foi observado que, comparando os grãos polidos com os grãos inteiros, não houve variação do comprimento, mostrando que os tecidos externos ao endosperma não tiveram efeito na retratibilidade dessa dimensão dos grãos de cevada.

Além disso, pode-se constatar que a dilatação máxima dos grãos de cevada com a umidade foi de aproximadamente 7% em relação ao valor inicial.

Figura 30 - Comprimento relativo em função da umidade em base úmida durante reumidificação dinâmica parametrizado no tempo de polimento (Fonte: Acervo Pessoal, 2018).

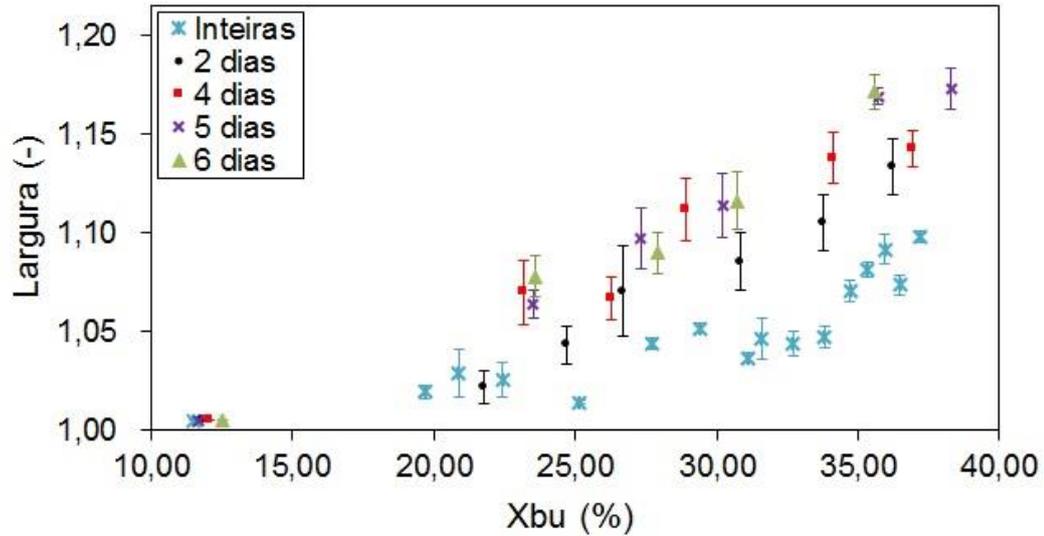


Os resultados de largura relativa em função da umidade em base úmida, durante a reumidificação dinâmica parametrizada no tempo de polimento, foram dispostos na Figura 31.

Observando a Figura 31, pode-se constatar que a variação da largura aumentou conforme se aumentou o tempo de polimento, verifica-se que entre os grãos inteiros e com dois dias de polimento houve um aumento da largura relativa. Todavia as diferenças das médias das larguras relativas foram menores que os desvios padrões entre quatro, cinco e seis dias de polimento.

Assim, pode-se afirmar que há uma resistência dos tecidos externos com efeito sobre a expansão da largura dos grãos de cevada. Porém ainda não foi possível, por meio desse resultado, identificar se a resistência foi mecânica, restringindo a expansão do núcleo ou foi devido à barreira à transferência de massa dificultando a homogeneização da água no interior dos grãos e assim reduzindo a retratibilidade do grão de cevada.

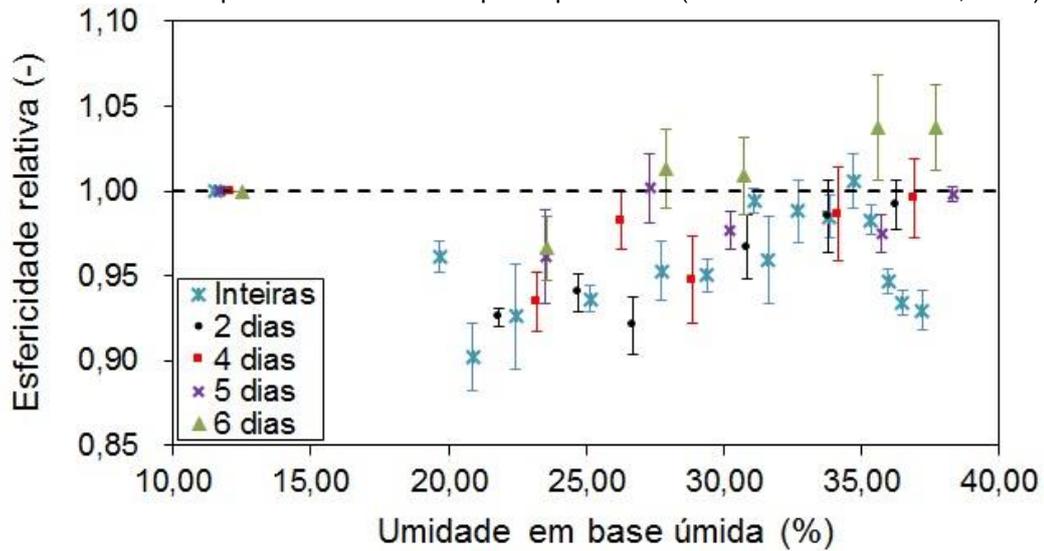
Figura 31 - Largura relativa em função da umidade em base úmida durante reumidificação dinâmica parametrizada no tempo de polimento (Fonte: Acervo Pessoal, 2018).



Na Figura 32 podem ser vistos os resultados experimentais da esfericidade relativa bidimensional (Equação 5). Comparando-se os diferentes tempos de polimento, quanto maior a remoção de material da superfície do grão, menor foi a variação da esfericidade relativa em relação à unidade. Constatou-se que para cinco e seis dias de polimento a variação da esfericidade relativa em relação à unidade foi menor quando comparado com os grãos inteiros.

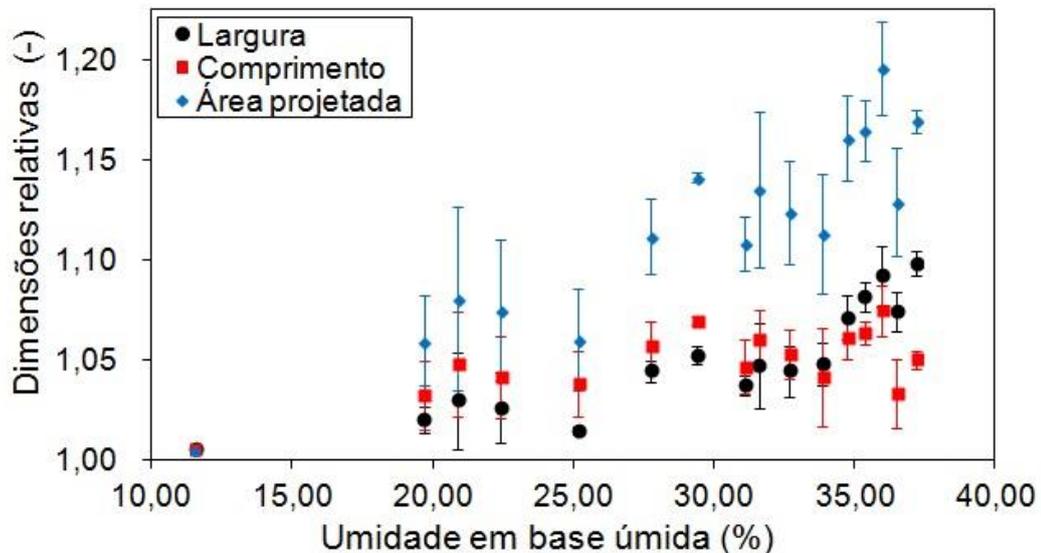
Para a discussão destes efeitos observados, entre a Figura 30 e Figura 32, foram analisados e comparados os resultados de largura, comprimento e área projetada para grãos inteiros em função do tempo de reumidificação dinâmica (Figura 33).

Figura 32 - Esfericidade relativa em função da umidade em base úmida durante reumidificação dinâmica parametrizada no tempo de polimento (Fonte: Acervo Pessoal, 2018).



Constata-se que a largura e comprimento relativos têm variações aproximadas, porém estas variações semelhantes não são características de materiais biológicos. A maior variação da área superficial se deve ao fator quadrado do aumento da área.

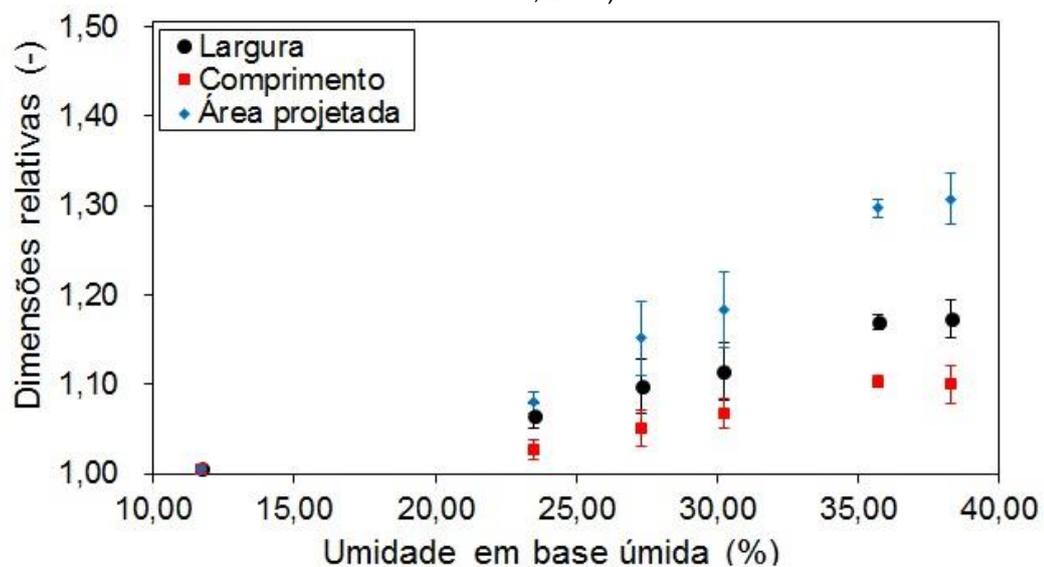
Figura 33 - Largura, comprimento e área projetada relativos em função da umidade em base úmida durante processo de reumidificação dinâmica para grãos inteiros (Fonte: Acervo Pessoal, 2018).



Para avaliar estes resultados vistos e discutidos, foram analisados e comparados os principais resultados de dimensões dos grãos de cevada polidos por cinco dias na Figura 34.

Por meio desta Figura pode-se observar que, para os grãos polidos por cinco dias, a largura relativa teve um maior crescimento do que para o comprimento relativo. Esta constatação permitiu afirmar que a retratibilidade foi anisotrópica para esse grão, característica comum a materiais biológicos.

Figura 34 - Largura, comprimento e área projetada relativos em função da umidade em base úmida durante processo de reumidificação dinâmica para grãos polidos por cinco dias (Fonte: Acervo Pessoal, 2018).



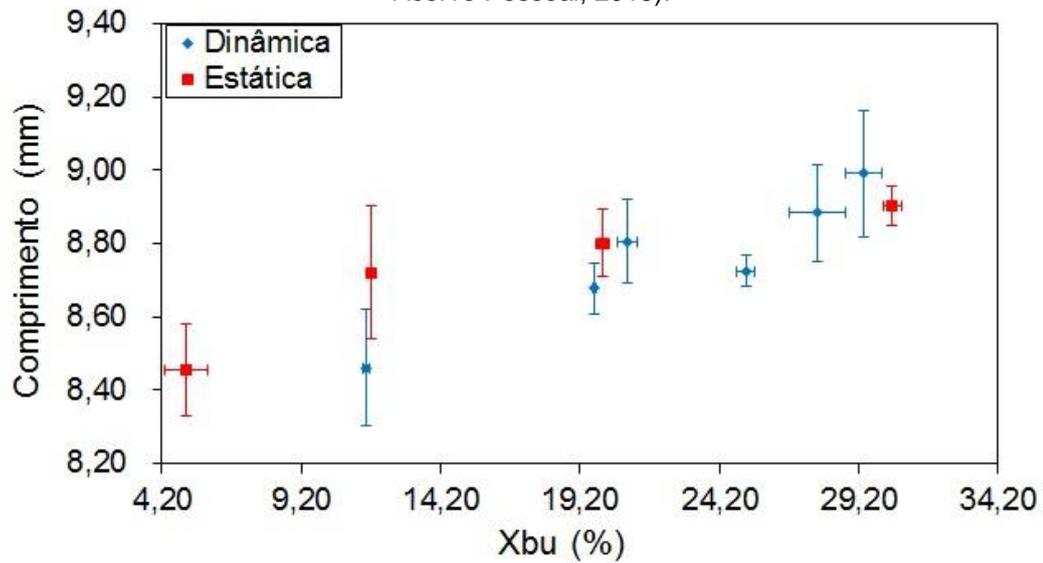
Para avaliar o efeito da homogeneização da água, no interior dos grãos de cevada, sobre as dimensões, foi realizada reumidificação estática.

4.2.4. Dimensões com reumidificação estática

Os dados de comprimento em função da umidade em base úmida para os grãos inteiros e polidos por cinco dias foram comparados na Figura 35.

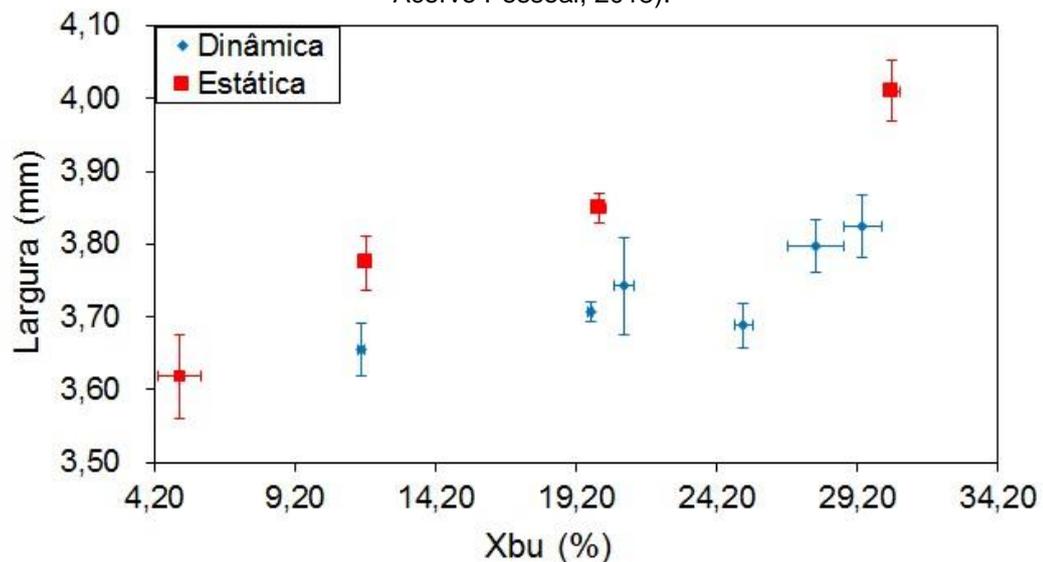
Constata-se que as diferenças das médias dos comprimentos foram menores que os desvios, ou seja, as variações entre os processos de reumidificação estática e dinâmica foram poucos significativas sobre a retratibilidade do comprimento dos grãos inteiros.

Figura 35 - Comprimento dos grãos inteiros de cevada com reumidificação estática e dinâmica (Fonte: Acervo Pessoal, 2018).



Na Figura 36 podem ser analisados os resultados de largura dos grãos inteiros em função da umidade para reumidificação estática e dinâmica.

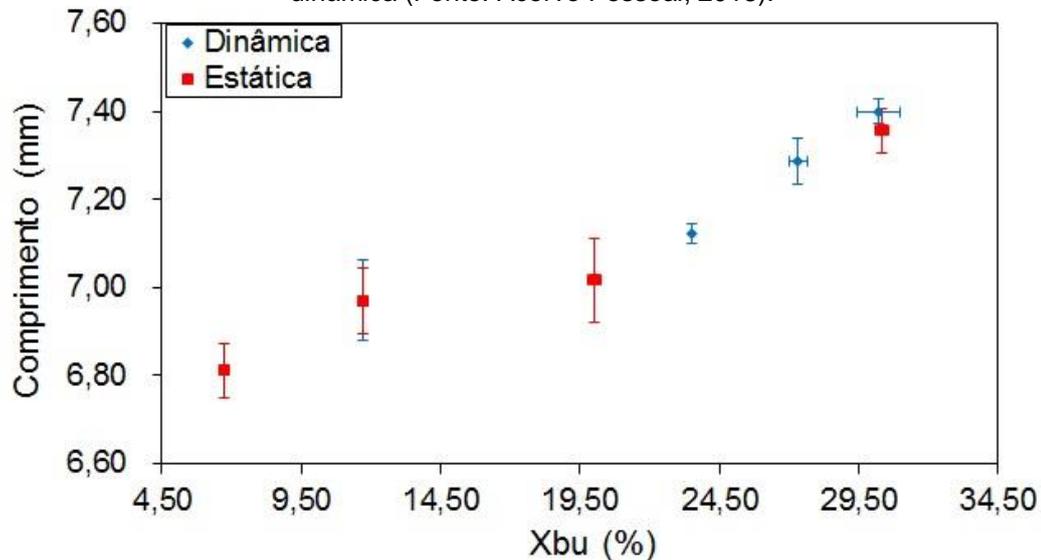
Figura 36 - Largura dos grãos inteiros de cevada com reumidificação estática e dinâmica (Fonte: Acervo Pessoal, 2018).



Pela Figura 36 pode se observar que quanto maior a umidade, maior foi a diferença da largura entre as metodologias. Isto nos mostra que a largura de grãos inteiros depende do grau de homogeneidade em que a umidade se encontra no interior do grão.

Na Figura 37 podem-se ver os resultados de comprimento em função da umidade para metodologia de reumidificação estática e dinâmica para grãos polidos por cinco dias.

Figura 37 - Comprimento dos grãos polidos (5 dias) de cevada com reumidificação estática e dinâmica (Fonte: Acervo Pessoal, 2018).

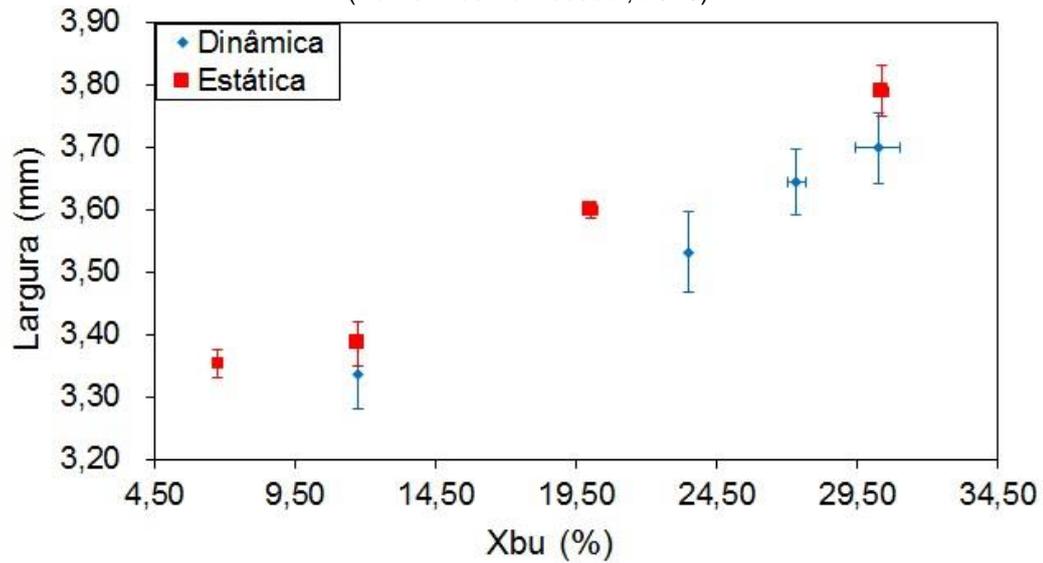


Para grãos polidos por cinco dias (Figura 37) pode ser observado que o comprimento não teve influência das metodologias de reumidificação.

Na Figura 38 foram mostrados os resultados de largura em função da umidade para grãos polidos por cinco dias pelas duas metodologias de reumidificação.

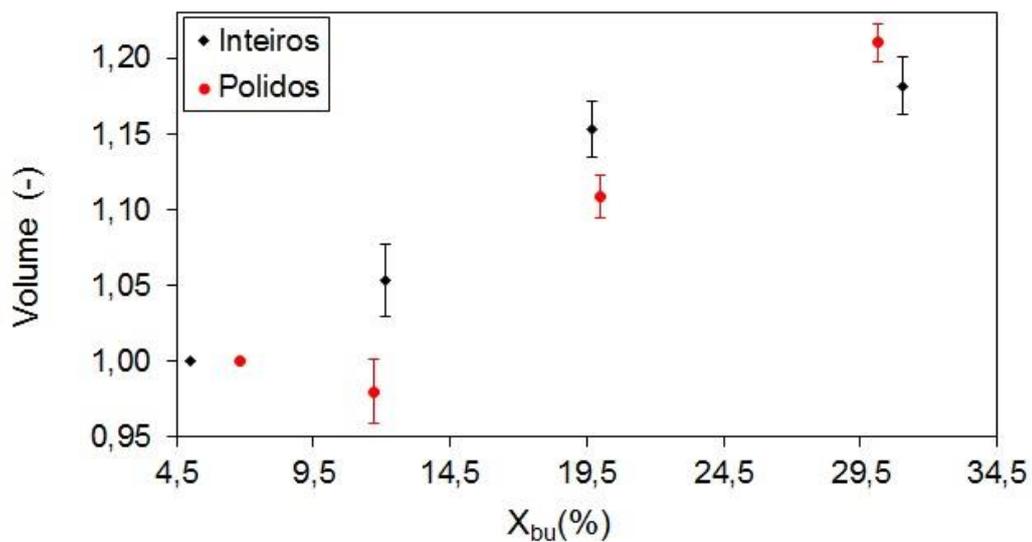
Pode-se constatar, pela Figura 38, que o aumento da umidade teve aproximadamente o mesmo efeito sobre a largura dos grãos polidos. Quando se compara as variações observadas na Figura 36 para grãos inteiros, e as comparações realizadas na Figura 31 com a Figura 38, pode-se inferir que a retratibilidade da largura tem forte influência dos tecidos externos. Quando os tecidos externos estão recobrindo o endosperma, a umidade demora em chegar ao centro do grão, pois estes tecidos são uma barreira à transferência de massa. Desta forma, o endosperma sem os tecidos externos difunde mais rapidamente a água no seu interior expandindo mais as cadeias de amido, com isso tendo uma maior retratibilidade na metodologia dinâmica em relação aos grãos inteiros.

Figura 38 - Largura dos grãos polidos (5 dias) de cevada com reumidificação estática e dinâmica (Fonte: Acervo Pessoal, 2018).



Na Figura 39 pode ser visto o volume médio relativo de um grão de cevada em função da umidade em base úmida para grãos de cevada inteiros e polidos.

Figura 39 - Volume médio relativo de um grão em função da umidade em base úmida para grão de cevada inteiro e polido (Fonte: Acervo Pessoal, 2018).

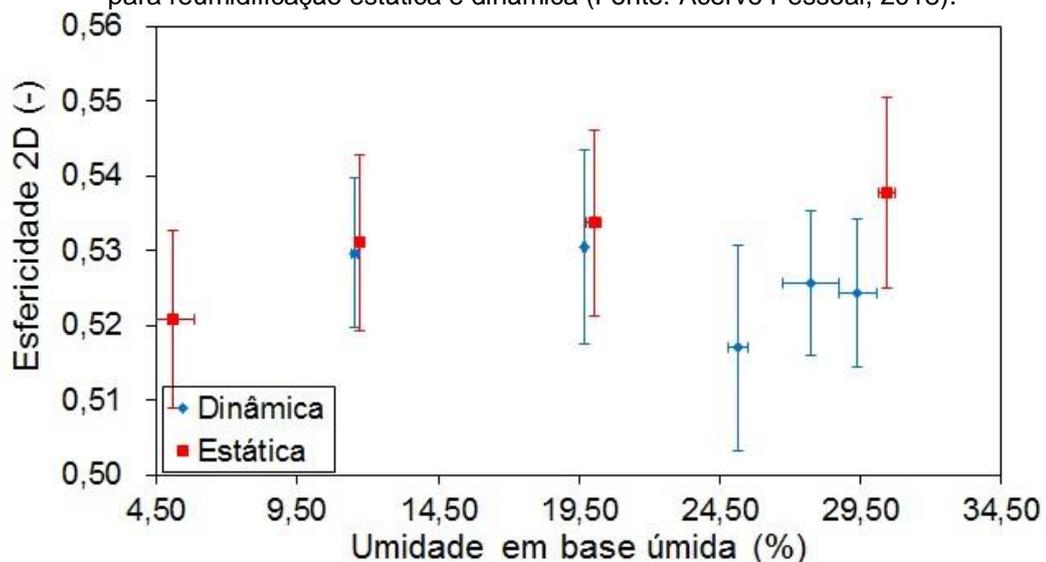


Pode-se observar que a variação volumétrica dos grãos de cevada apresenta um crescimento com a umidade, desta forma mostrando a retratibilidade destes grãos.

Tanto para grãos inteiros como polidos a tendência de aumento de volume foi a mesma, isso pois estes resultados foram obtidos por metodologia estática. Desta forma, como são os mesmos materiais, eles se acomodam e homogeneízam a água tendo o máximo aumento de volume possível para este material.

Na Figura 40 podem ser vistos os resultados de esfericidade bidimensional (Equação 5) para os grãos inteiros comparando-se a reumidificação estática com a dinâmica.

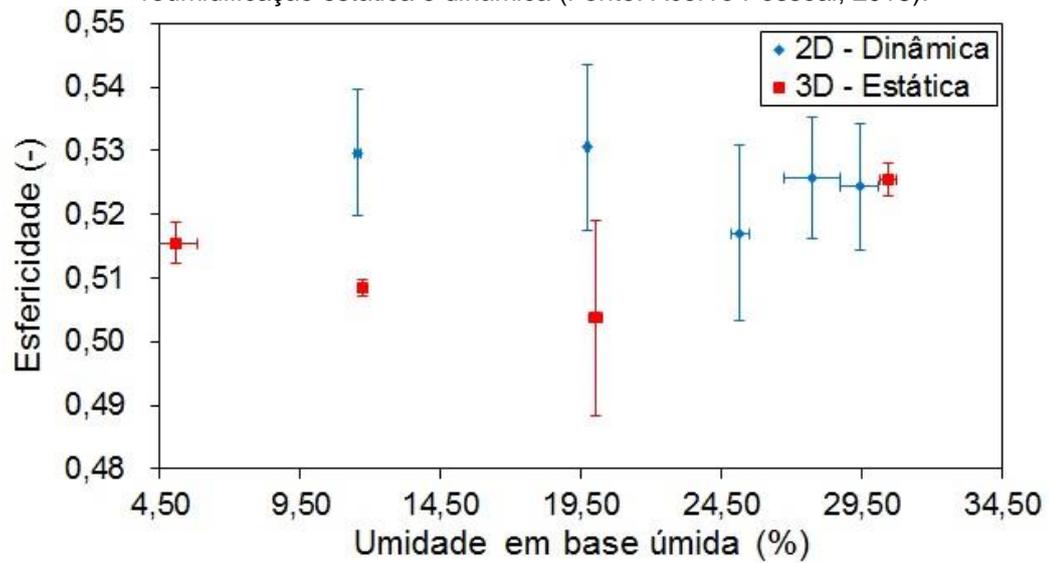
Figura 40 - Esfericidade bidimensional em função da umidade em base úmida para grãos inteiros para reumidificação estática e dinâmica (Fonte: Acervo Pessoal, 2018).



Pode-se observar que as variações de esfericidade entre os processos de reumidificação estática e dinâmica foram poucos significativos, pois os desvios padrões foram maiores que as diferenças das médias.

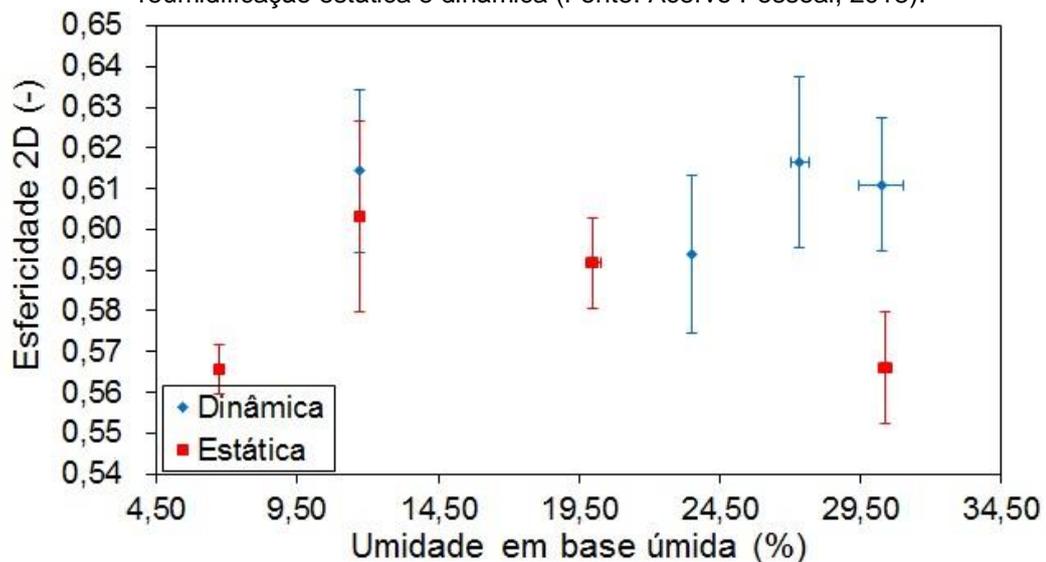
Para o processo de reumidificação estática, devido ao tempo suficiente para a medida da espessura dos grãos, foram calculadas as esfericidades tridimensionais com base na Equação 6. A comparação destes resultados da esfericidade tridimensional com os resultados de esfericidade bidimensional para a reumidificação dinâmica pode ser vista na Figura 41.

Figura 41 - Esfericidades em função da umidade em base úmida de grãos inteiros para reumidificação estática e dinâmica (Fonte: Acervo Pessoal, 2018).



Na Figura 42 se podem ver os resultados de esfericidade bidimensional obtidos pelas reumidificações estática e dinâmica.

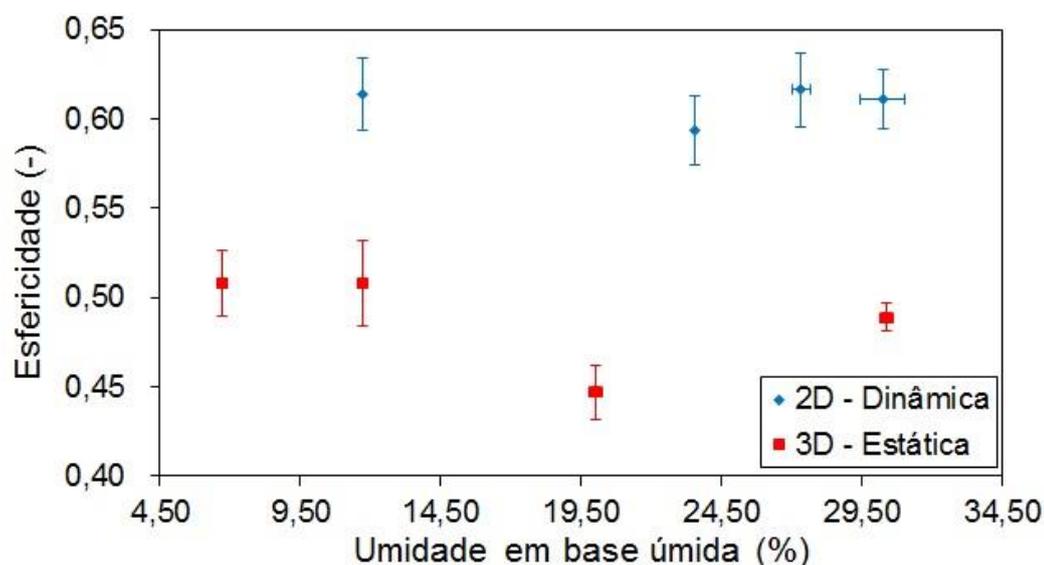
Figura 42 - Esfericidade bidimensional em função da umidade em base úmida de grãos polidos para reumidificação estática e dinâmica (Fonte: Acervo Pessoal, 2018).



Pode se constatar pela Figura 42 que os valores de esfericidade bidimensional foram semelhantes entre as metodologias estáticas e dinâmicas.

Desta maneira, pode-se comparar a esfericidade bidimensional pela metodologia dinâmica com a esfericidade tridimensional da metodologia estática na Figura 43.

Figura 43 - Esfericidades em função da umidade em base úmida de grãos polidos para reumidificação estática e dinâmica (Fonte: Acervo Pessoal, 2018).



Ao comparar as esfericidades bidimensionais e tridimensionais pela Figura 43 pode-se constatar que a esfericidade bidimensional é maior que a tridimensional. Porém isso se deve a influência do polimento sobre forma do grão, da mesma maneira, houve a diferença na Figura 29 para grãos polidos por 5 dias.

Portanto, constata-se por meio das medidas dos grãos inteiros em diferentes umidades que a estimativa da forma pelo índice de esfericidade bidimensional (Equação 5) é representativa, mesmo não considerando a espessura na estimativa deste índice. Todavia para grãos polidos há uma diferença entre as esfericidades bidimensionais e tridimensionais, isto se deve a alteração da forma dos grãos durante o polimento, o que se confirma quando observamos que com o polimento a esfericidade bidimensional fica maior que a tridimensional (Figura 29).

Isto se deve, pois no plano bidimensional o grão de cevada fica mais elíptico, ou seja, com uma geometria mais arredondada conforme Figura 23. Todavia a espessura tem uma maior redução durante o polimento, quando comparada à largura e ao comprimento (Figura 28), isso tornando a partícula mais plana no

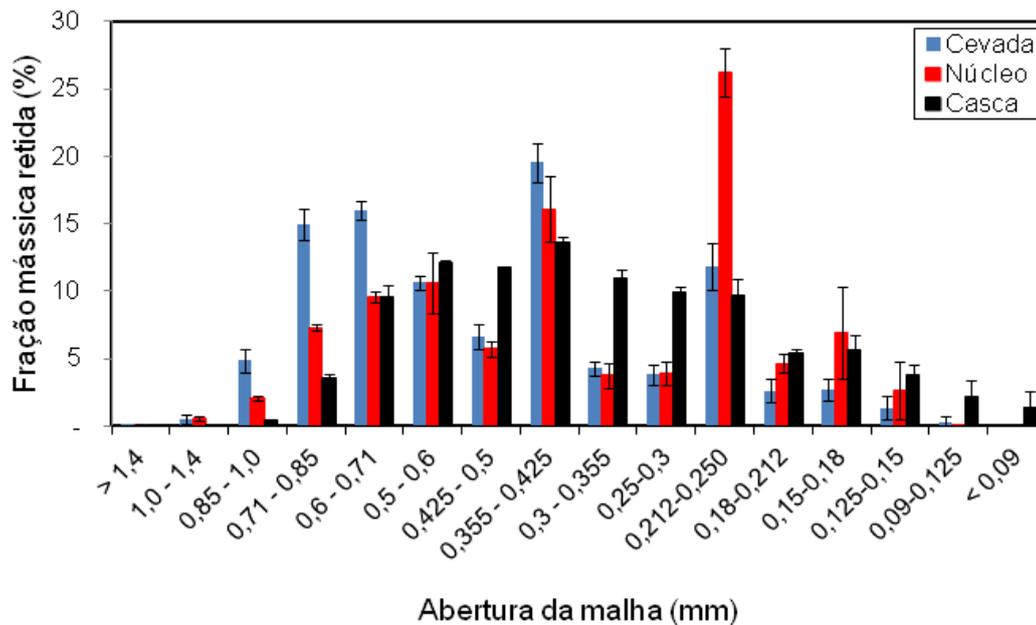
tridimensional. Assim, se verificarmos a Figura 29, estes efeitos combinados mantêm a partícula numa mesma esfericidade tridimensional até 25% de fração mássica removida, e então inicia um processo de queda da esfericidade tridimensional quando a espessura começa a reduzir mais significativamente.

Desta forma, justificando a superestimativa da esfericidade bidimensional sobre a tridimensional.

4.2.5. Distribuição granulométrica do material moído

As medidas de distribuição granulométrica de materiais moídos estão dispostas na Figura 44. Na legenda pode ser separada distribuição da cevada em toda sua constituição, material da casca e material do núcleo, todos estes materiais eram moídos.

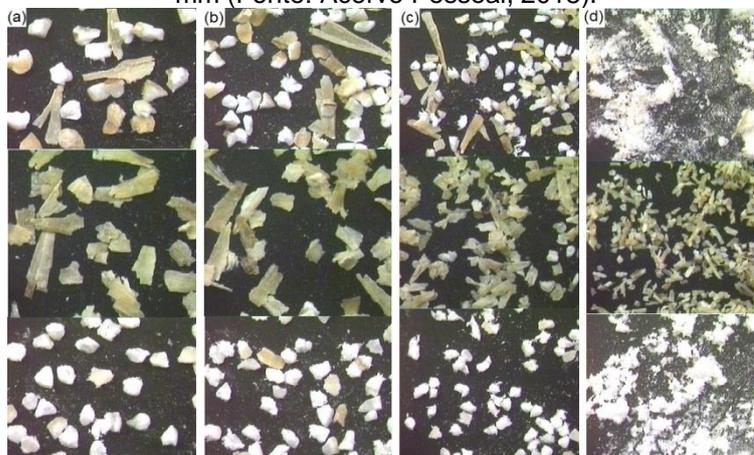
Figura 44 - Fração mássica retida em peneiras de diferentes aberturas de malha para as sementes de cevada, núcleo e casca moídos (Fonte: Acervo Pessoal, 2018).



Por meio da Figura 44 pode ser observado que a distribuição granulométrica das partículas obtidas por meio da moagem das sementes de cevada apresentou picos de fração de massa retida nas peneiras com abertura de malha de 0,71 até 0,85 mm, 0,6 até 0,71 mm, 0,355 até 0,425 e 0,212 até 0,250 mm.

Estes materiais foram analisados por microscopia óptica com cerca de 6 vezes de aumento, desta forma pode-se observar as características das partículas retidas nestas peneiras (Figura 45).

Figura 45 - Imagens de microscopia óptica das partículas retidas nas peneiras de abertura de malha nas faixas de (a) 0,71 até 0,85 mm, (b) 0,6 até 0,71 mm, (c) 0,355 até 0,425 mm e (d) 0,212 até 0,250 mm (Fonte: Acervo Pessoal, 2018).

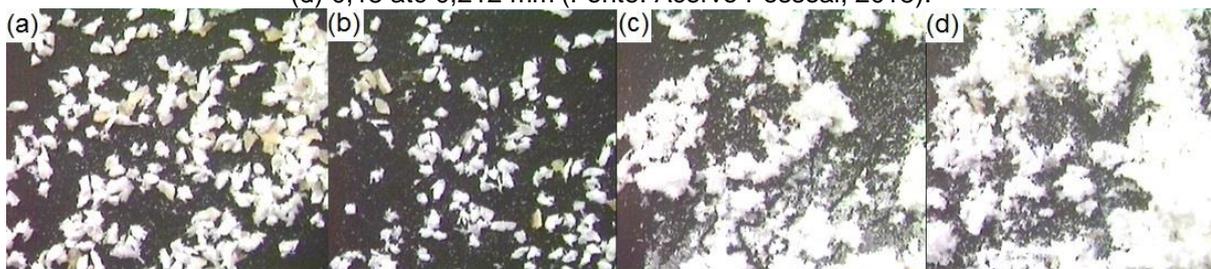


A Figura 45 foi separada em colunas com índices descritos na legenda, a primeira linha destas colunas corresponde as partículas grãos de cevada moídos, segunda linha corresponde as partículas da casca moída e a terceira linha corresponde as partículas do núcleo moído.

Quando observamos em conjunto a Figura 44 e a Figura 45 observamos que o núcleo, durante o processo de moagem, produziu dois conjuntos de partículas, enquanto que as partículas da casca formam uma distribuição que mostra um máximo de massa retida na peneira de abertura de malha de 0,355 até 0,425 mm. Isto pode ser atribuído à heterogeneidade do material do núcleo, sendo que o endosperma apresenta variações de composição ao longo da sua seção transversal e longitudinal de acordo com Dornez et al. (2011) e Jääskeläinen et al. (2013).

Durante o experimento, foi observado que as partículas do núcleo retidas nas peneiras de abertura de malha entre 0,25 e 0,3 mm e entre 0,212 e 0,25 mm apresentam uma diferença significativa na coesão intrapartículas, as imagens microscópicas destas partículas demonstram isto na Figura 46.

Figura 46 - Imagens de microscopia óptica das partículas do núcleo moído retidas nas peneiras de abertura de malha nas faixas de (a) 0,3 até 0,355 mm, (b) 0,25 até 0,3 mm, (c) 0,212 até 0,25 mm e (d) 0,18 até 0,212 mm (Fonte: Acervo Pessoal, 2018).



Pela Figura 46 fica evidente a transição comentada no parágrafo anterior. Verifica-se que para (a) e (b) pode-se visualizar o contorno das partículas e para (c) e (d) as partículas formam aglomerados não sendo possível distinguir contornos.

Pode-se inferir que, as maiores granulometrias foram de partículas obtidas pela ruptura de materiais frágeis, onde o impacto promoveu a ruptura formando grãos maiores e de arestas bem definidas.

Para as granulometrias menores, as partículas foram obtidas da ruptura de materiais elásticos (ou dúcteis) em que a abrasão e o cisalhamento promoveram a ruptura, formando partículas menores e mais lascadas, desta forma foram partículas com contornos irregulares.

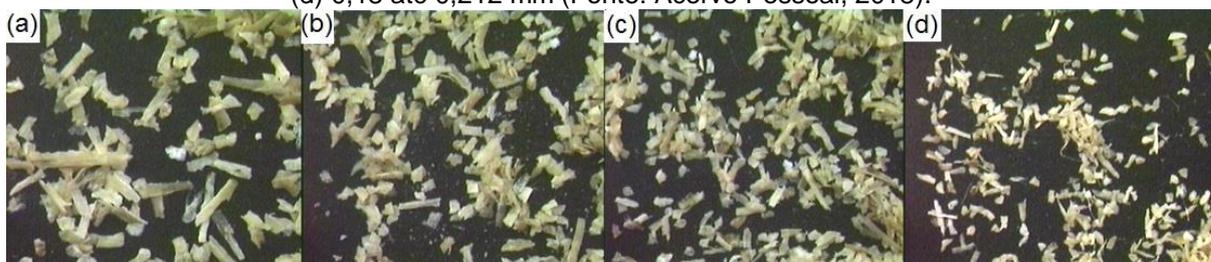
As mesmas características das partículas do núcleo moído retidas nas peneiras (Figura 46) foram observadas para as sementes de cevada moídas na Figura 47.

Figura 47 - Imagens de microscopia óptica das partículas das sementes de cevada moídas retidas nas peneiras de abertura de malha nas faixas de (a) 0,3 até 0,355 mm, (b) 0,25 até 0,3 mm, (c) 0,212 até 0,25 mm e (d) 0,18 até 0,212 mm (Fonte: Acervo Pessoal, 2018).



Como meio de comparação, na Figura 48 estão as imagens das partículas da casca moída retidas nas peneiras de mesmas faixas granulométricas analisadas nas Figura 46 e Figura 47.

Figura 48 - Imagens de microscopia óptica das partículas da casca moída retidas nas peneiras de abertura de malha nas faixas de (a) 0,3 até 0,355 mm, (b) 0,25 até 0,3 mm, (c) 0,212 até 0,25 mm e (d) 0,18 até 0,212 mm (Fonte: Acervo Pessoal, 2018).



Com base na Figura 47 (c) e (d) não se observa visualmente a presença da casca, isto possivelmente se deve ao recobrimento das partículas da casca pelas partículas do núcleo altamente coesivas.

Após as análises e discussões sobre as dimensões e forma das partículas que foram utilizadas neste trabalho, foram discutidas as propriedades intensivas das partículas e dos leitos formados por estas partículas.

4.2.6. Massa específica real dos materiais

Na Figura 49 foram apresentados os dados de massa específica real em função dos ciclos de injeção de hélio. Estas medidas foram realizadas para as sementes inteiras (*in natura*), polidas por 8 dias, o núcleo moído (endosperma), a casca moída e a o grão de cevada moída em toda a sua constituição.

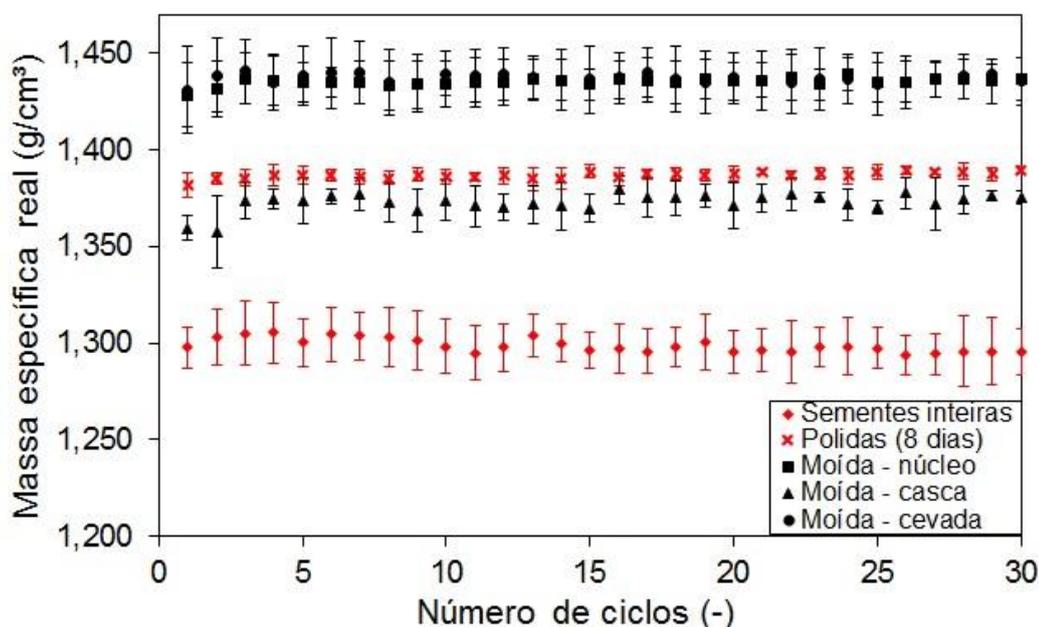
De acordo com o que pode ser observado na Figura 49 pode ser observado que para todos os materiais em que foi medida a massa específica real, com 30 ciclos teve-se um valor constante de massa específica real. Com base neste resultado, a média da massa específica real foi estimada por meio das cinco últimas massas específicas medidas.

A análise da massa específica real (Figura 49) pode ser realizada em duas etapas, primeiramente para os grãos de sementes inteiros e polidos e então para os grãos de sementes moídos e suas partes.

As diferenças de massa específica real das sementes inteiras e polidas podem ser justificadas por meio de duas hipóteses iniciais. As sementes inteiras têm uma estrutura de poros tortuosos e com diâmetros que não favorecem a absorção

da molécula de hélio até o núcleo, desta forma reduzindo a massa específica real medida para as sementes inteiras. A segunda hipótese é que a parede da célula vegetal do núcleo (endosperma e embrião) tem uma massa específica maior do que a da casca (pericarpo, testa, aleurona e casca).

Figura 49 - Massa específica real em função dos ciclos de injeção de hélio no picnômetro (Fonte: Acervo Pessoal, 2018).



Com foco nestas duas hipóteses pode-se analisar as diferenças entre as massas específicas real das partículas obtidas da moagem do núcleo, da casca e do grão em toda sua composição (Figura 49).

Os efeitos da geometria e dimensão dos poros do grão de cevada sobre a absorção de hélio podem ser observados quando se compara o grão moído e inteiro, pois com a moagem os efeitos das estruturas macroscópicas foram reduzidos e uma maior superfície de troca permite uma maior absorção das moléculas de hélio nos interstícios intrapartículas, aumentando a massa específica das sementes de cevada moída.

Para o núcleo moído, a massa específica foi aproximada ao das sementes moídas. O núcleo moído é o endosperma moído, que corresponde ao órgão que em fração mássica representa a maior parte do grão, aproximadamente 75% para cevada (ARENDRT e ZANNINI, 2013). Com base nisto, as massas específicas reais

dos grãos de cevada moídos foi aproximada ao do endosperma moído, devido ao endosperma ser predominante na composição morfológica do grão de cevada.

Para a casca moída, observou-se que há uma redução da massa específica real quando comparada ao núcleo e grão moídos. Isto comprova que a célula vegetal que compõe a casca tem uma massa específica real menor do que o núcleo, justificando e confirmando a segunda hipótese comentada na comparação da massa específica real entre as sementes inteiras e polidas.

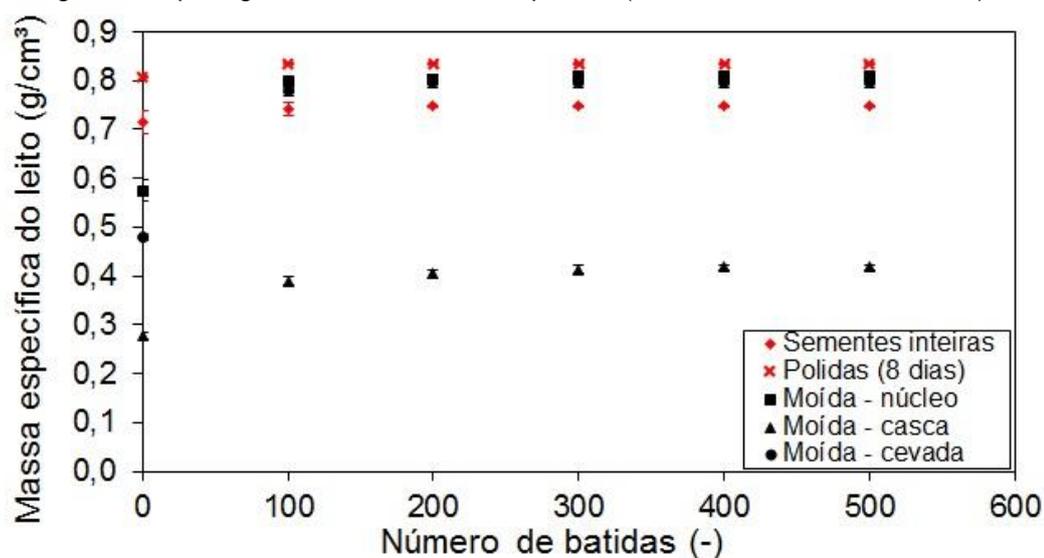
4.2.7. Massa específica do leito e o empacotamento

Na Figura 50 estão dispostos os dados de massa específica do leito em função do número de batidas longitudinais da proveta graduada. Os leitos em que foram medidas as massas específicas eram constituídos de grãos inteiros (in natura), polidos por 8 dias, grãos em sua total constituição moídos, núcleo (endosperma) moído e a casca moída.

A análise destes resultados foi separada em duas etapas, para os grãos inteiros a massa específica do leito foi menor do que para os grãos polidos, tanto para o leito aerado (0 batidas) quanto para leito empacotado (500 batidas). Isto se deve as mudanças das dimensões e forma, que ocorrem durante o processo de polimento, além disto, a superfície dos grãos polidos tem uma redução das arestas e irregularidades superficiais, aumentando a capacidade de acomodação das partículas. Desta forma, a massa específica do leito dos grãos polidos foi menor do que para os inteiros.

A massa específica do leito aerado composto por grãos moídos foi menor do que para o núcleo moído, porém durante o empacotamento com os impactos longitudinais teve-se uma redução desta diferença, sendo aproximadamente nula para 500 batidas, pois a diferença da massa específica do leito média dos grãos moídos e do núcleo moído foi menor que os seus desvios padrões.

Figura 50 - Massa específica do leito em função do número de batidas longitudinais da proveta graduada para grãos moídos, inteiros e polidos (Fonte: Acervo Pessoal, 2018).



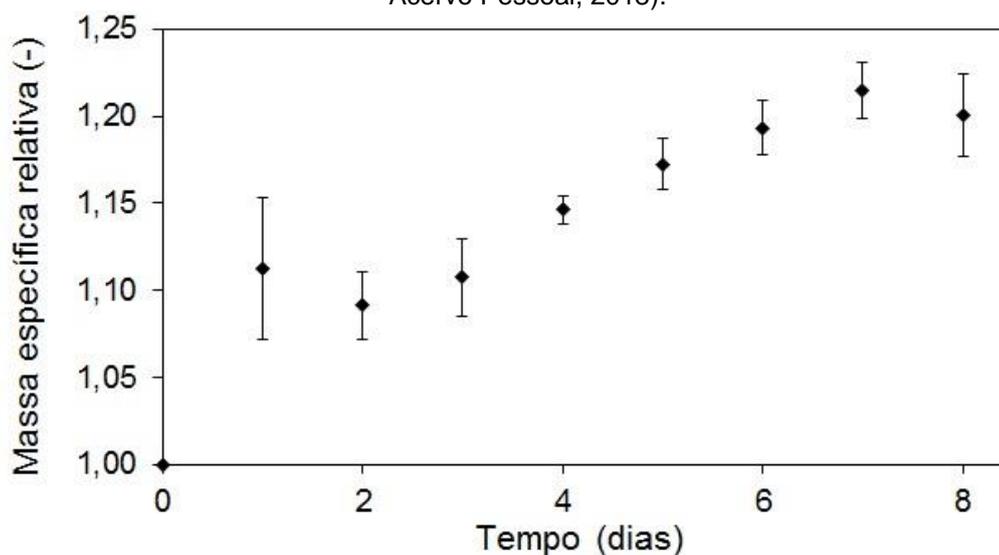
A massa específica do leito formado pela casca moída foi menor tanto para o leito aerado ou empacotado, se observarmos a Figura 50, as partículas da casca são mais alongadas, podendo se inferir que são partículas mais planas e de baixa esfericidade, sendo estas características importantes na redução da capacidade de acomodação e empacotamento destas partículas segundo Lima (2009).

Com base nesta linha de raciocínio, pode-se inferir que as partículas da casca reduzem a acomodação durante a deposição das partículas dos grãos moídos, fazendo com o que o leito aerado para as partículas dos grãos moídos seja menor do que para o núcleo moído. Conforme foi realizado o empacotamento, as partículas da casca se acomodaram entre os interstícios das partículas do núcleo, aproximando os valores de massa específica do leito das sementes de cevada moída com a massa específica do leito formado pelas partículas de núcleo moído.

4.2.8. Massa específica do leito durante o polimento

Na Figura 51 podem-se visualizar os resultados de massa específica relativa do leito empacotado em função do tempo de polimento.

Figura 51 - Massa específica relativa do leito empacotado em função do tempo de polimento (Fonte: Acervo Pessoal, 2018).



Pela Figura 51 pode-se constatar que para os três primeiros dias de polimento existe uma variação da média menor que os seus desvios, portanto nestas condições as variações da massa específica do leito foram pouco significativas. Todavia os três dias de polimento diferem significativamente dos grãos inteiros, por meio desta avaliação, pode-se inferir que o polimento reduziu as arestas e irregularidades superficiais dos grãos de cevada nos primeiros momentos de polimento, com isso aumentando em aproximadamente 10% a massa específica do leito. Isto se deve as irregularidades superficiais que formam pontos de resistências a acomodação das partículas no leito.

Após o terceiro dia de polimento há um aumento da massa específica do leito, isto se deve a retirada das extremidades dos grãos, tornando os cada vez mais elípticos (Figura 23). Esta mudança na forma das partículas pode justificar a melhor acomodação dos grãos de cevada no leito, assim aumentando a massa específica do leito empacotado (MATA e DUARTE, 2002).

Além disto, as variações da massa específica após o terceiro dia, podem estar relacionadas as maiores variações nas dimensões (Figura 28) e esfericidade (Figura 29) dos grãos ao longo do polimento.

Para o oitavo dia observa-se que existe uma leve redução da massa específica média, verifica-se que há uma redução da esfericidade tridimensional mais significativa para este tempo de polimento na Figura 29. Isto se deve a redução

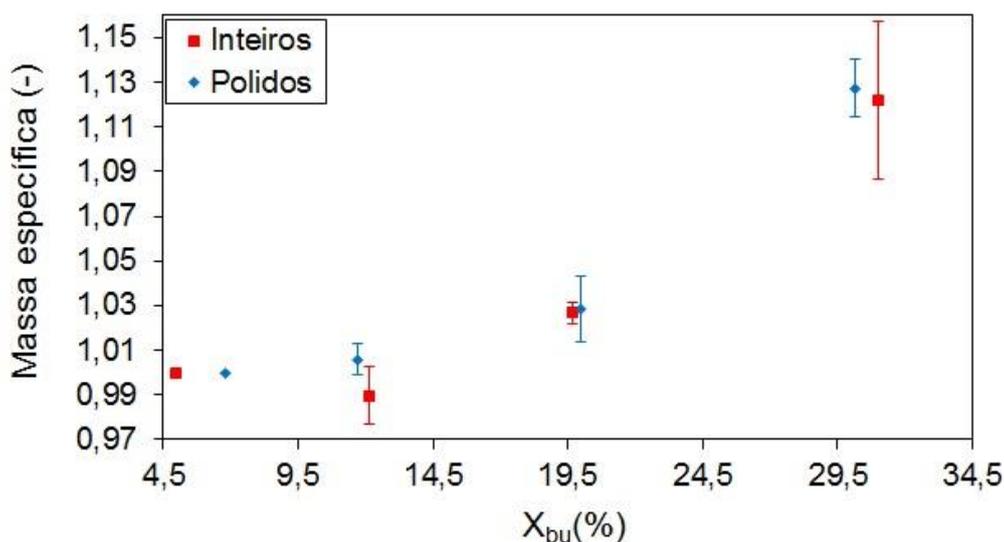
da espessura dos grãos de cevada ser mais rápida do que a redução na largura e comprimento, implicando na redução da esfericidade da partícula e nos problemas de acomodação e empacotamento identificados por Lima (2009).

4.2.9. Massa específica aparente e a umidade dos grãos

Na Figura 52 estão os resultados de massa específica dos grãos de cevada inteiros e polidos em função da umidade em base úmida.

Se verificarmos as tendências na Figura 52, averiguou-se que para valores menores que 15% a variação da massa específica aparente foi pouco significativa, o que pode ser justificado fisicamente. Para baixos valores de umidades, a água foi difundida entre as estruturas das fibrilas de amido e ocupou um volume proporcional a sua massa. Com isto houve uma variação do volume do grão de cevada, semelhante à massa de água.

Figura 52 - Massa específica aparente dos grãos em função da umidade em base úmida para cevada inteira (Fonte: Acervo Pessoal, 2018).

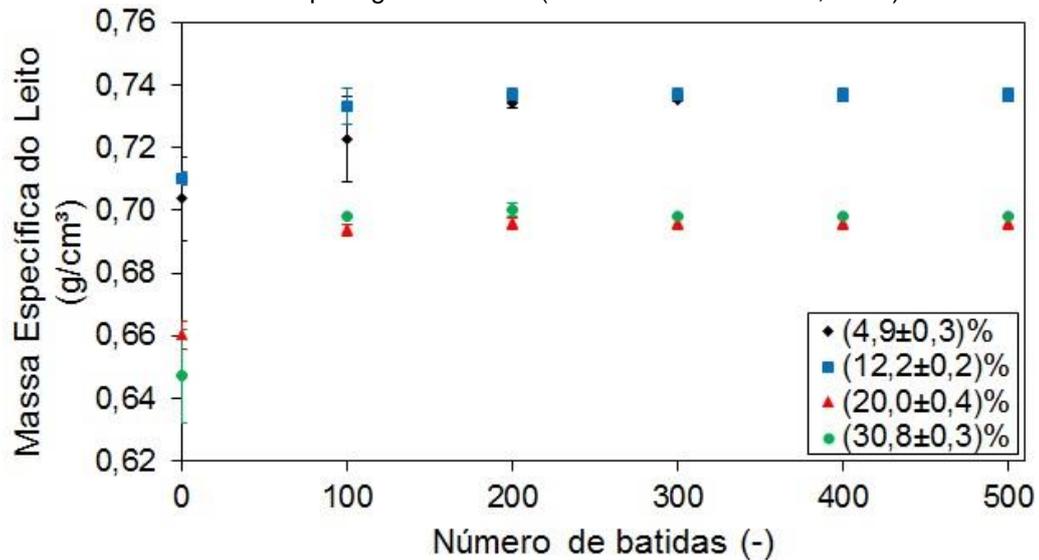


Para valores maiores de umidade, a parede da fibra do grão de cevada estava saturada, portanto a água foi difundida para os interstícios vazios do grão. A variação no volume do grão devido à difusão da água nestes espaços vazios não tem o efeito da mesma ordem de grandeza da massa, provocando um aumento na massa específica aparente dos grãos.

4.2.10. Massa específica do leito e a umidade dos grãos

Na Figura 53 pode ser visualizada a massa específica do leito em função do número de batidas para grãos de cevada inteiros em diferentes umidades.

Figura 53 - Massa específica do leito em função do número de batidas parametrizado na umidade em base úmida para grãos inteiros (Fonte: Acervo Pessoal, 2018).



Pela Figura 53 pode-se constatar que para as duas menores umidades em base úmida, a variação da média foi menor que os desvios padrões e o mesmo foram observados entre as duas maiores umidades.

Observando que a variação da esfericidade (Figura 41) e do comprimento (Figura 35) com a umidade foi aproximadamente desprezível, estas propriedades não podem ter causado efeitos sobre a massa específica do leito.

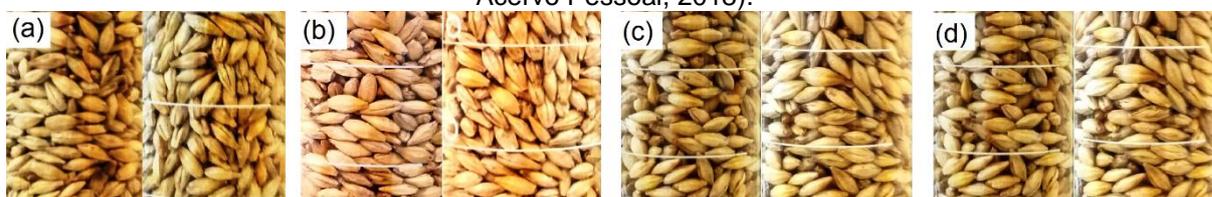
Sido isto visto, se verifica pela Figura 36 que a largura dos grãos de cevada inteiros teve uma menor variação entre as duas umidades menores quando comparadas com as duas maiores umidades. Se observarmos os desvios padrões das medidas de largura para as menores umidades, verifica-se que a distribuição destes valores ainda se intercepta, o que não é verificado para as umidades acima de 15%. Desta forma, pode se inferir que para as massas específicas do leito para

as umidades menores foram aproximadas, devido às pequenas variações nas dimensões dos grãos em relação a estas variações de umidade.

Todavia para valores maiores que 15% de umidade observou-se a redução da massa específica do leito, isto pode estar associado ao aumento do filme líquido na superfície dos grãos aumentando a resistência a acomodação. Desta forma, reduzindo a massa específica do leito. Devido à predominância deste efeito entre os grãos, os efeitos das dimensões sobre o meio poroso reduziram, não tendo variação da massa específica do leito para valores de umidades maiores que 20%.

Estas afirmações podem ser avaliadas qualitativamente por meio da Figura 54.

Figura 54 - Imagens das superfícies da proveta contendo leitos formados por grãos inteiros com (a) $(4,9 \pm 0,3)\%$, (b) $(12,2 \pm 0,2)\%$, (c) $(20,0 \pm 0,4)\%$ e (d) $(30,8 \pm 0,3)\%$ de umidade em base úmida (Fonte: Acervo Pessoal, 2018).

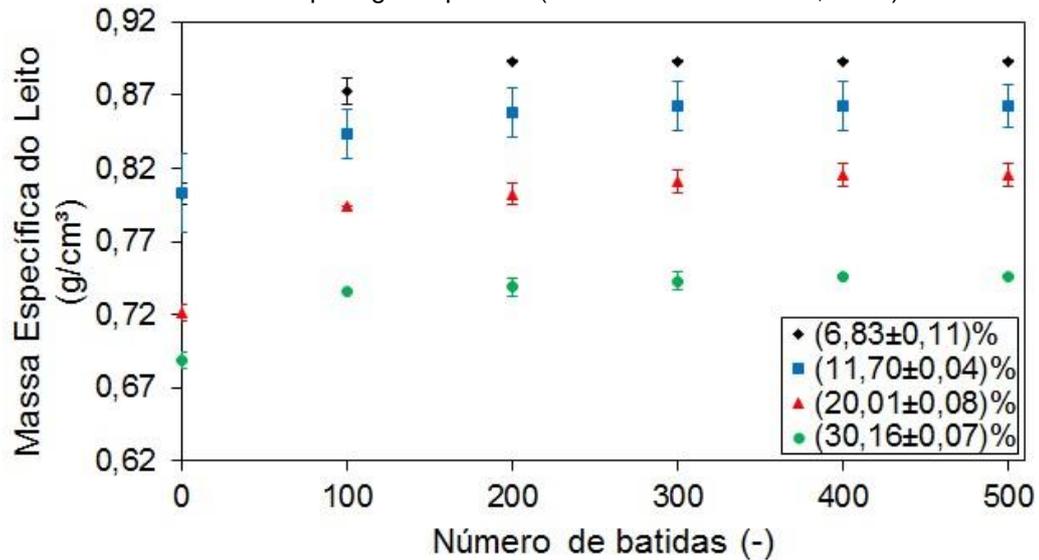


Na Figura 54 foram separadas as imagens da proveta com o leito aerado (a esquerda) e empacotado (a direita). Pode-se verificar na Figura 54 que, para as umidades menores que 15%, os grãos próximos das paredes apresentaram uma tendência de organização e direção após o empacotamento. O mesmo não pôde ser verificado para as imagens dos leitos formados por grãos com umidades acima de 15%.

Na Figura 55 pode-se ver a massa específica do leito em função do número de batidas longitudinais para diferentes teores de umidades para grãos polidos por 5 dias.

Verifica-se pela Figura 55 que quanto maior a umidade dos grãos polidos menor foi a massa específica do leito empacotado. Isto pode estar relacionado às mudanças de tamanhos e forma dos grãos, além dos efeitos de filme líquido discutidos anteriormente.

Figura 55 - Massa específica do leito em função do número de batidas parametrizado na unidade em base úmida para grãos polidos (Fonte: Acervo Pessoal, 2018).



Na Figura 56 pode-se ver os arranjos próximos da parede das provetas para o leito aerado (0 batidas) que estão a esquerda e o leito empacotado (500 batidas) que estão a direita. Os itens a, b, c e d da Figura 56 corresponde as diferentes umidades $(6,83\pm0,11)\%$, $(11,70\pm0,04)\%$, $(20,01\pm0,08)\%$ e $(30,16\pm0,07)\%$, respectivamente.

Figura 56 - Imagens das superfícies da proveta contendo leitos formados por grãos polidos com (a) $(6,83\pm0,11)\%$, (b) $(11,70\pm0,04)\%$, (c) $(20,01\pm0,08)\%$ e (d) $(30,16\pm0,07)\%$ de umidade em base úmida (Fonte: Acervo Pessoal, 2018).



Observa-se que para as umidades abaixo de 20%, os leitos aerados já tiveram uma orientação, e com o empacotamento, melhorou-se ainda mais esta organização dos grãos. Porém para 20% observa-se ainda a orientação dos grãos para o leito empacotado, embora o leito aerado não tenha tido os efeitos das umidades menores.

Para umidade de aproximadamente 30%, o mesmo se reproduziu para o leito aerado, mas para o leito empacotado não houve orientação tão predominante como nas demais umidades.

Quando se compara os grãos polidos aos grãos inteiros, observa-se que em 20% não há orientação (Figura 54). Entretanto para os grãos polidos esta orientação está visível (Figura 56). Isto permite inferir que as superfícies mais irregulares dos grãos inteiros podem ter contribuído para a dificuldade de orientação destes leitos, além do filme líquido.

Portanto, pode-se verificar que os efeitos sobre a formação do meio poroso são inúmeros e um efeito predominante se torna complexo demais para ser definido. Desta maneira, podemos ver os diversos fatores influenciando nas tendências dos resultados experimentais, porém sem uma conclusão definitiva. Assim, somente com estudos mais aprofundados em estruturação de meios porosos seriam possíveis conclusões definitivas.

Mas pode-se comprovar que o polimento e o conteúdo de umidade influenciam sobre os meios porosos formados pelos grãos de cevada. Sendo possível identificar regiões em que alguns efeitos tinham uma influência mais evidente.

4.2.11. Porosidade total dos grãos polidos e moídos

Na Tabela 4 estão os resultados experimentais para massa específica do leite aerado (ρ_{aerado}) e empacotado ($\rho_{\text{empacotado}}$), porosidade do leite empacotado ($\epsilon_{\text{empacotado}}$) e o número mínimo de batidas longitudinais (n) para o qual não foi observada a variação do volume na proveta graduada.

Tabela 4 - Resultados experimentais de massa específica e porosidade total do leite para grãos inteiros e polidos (Fonte: Acervo Pessoal, 2018).

	Grãos inteiros	Grãos polidos (8 dias)
ρ_{aerado} (g/cm ³)	0,715 ± 0,02	0,807 ± 0,001
$\rho_{\text{empacotado}}$ (g/cm ³)	0,7493 ± 0,0005	0,8340 ± 0,0006
$\epsilon_{\text{empacotado}}$ (%)	42,175 ± 0,006	39,920 ± 0,001
n (-)	200	100

Para Brooker, Bakker-Arkema e Hall (1992), os grãos de cevada descascados têm uma porosidade de 39,5% com umidade em base úmida de 10,4%, para os grãos inteiros estes autores apresentam resultados de porosidade

para 4 espécies de cevada na faixa de 44,5% a 58,6% estas porosidades foram medidas com grãos com umidades entre 9,7% a 10,7% em base úmida.

Na Tabela 5 estão dispostos os resultados experimentais de massa específica do leito aerado (ρ_{aerado}), massa específica do leito empacotado ($\rho_{\text{empacotado}}$), porosidade total do leito empacotado ($\epsilon_{\text{empacotado}}$) e número mínimo de batidas longitudinais da proveta (n) para que não houvesse mais variações de volume.

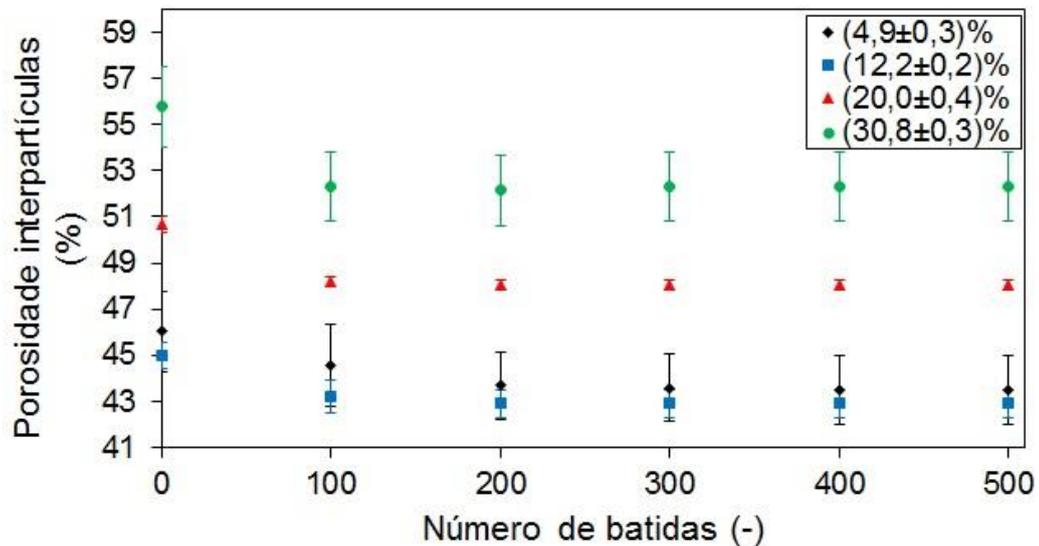
Tabela 5 - Resultados experimentais de massa específica e porosidade total do leito para grãos de cevada, núcleo e casca moídos (Fonte: Acervo Pessoal, 2018).

	Núcleo	Casca	Cevada
$\rho_{\text{aerado}} \text{ (g/cm}^3\text{)}$	$0,57 \pm 0,02$	$0,28 \pm 0,01$	$0,48 \pm 0,01$
$\rho_{\text{empacotado}} \text{ (g/cm}^3\text{)}$	$0,811 \pm 0,003$	$0,417 \pm 0,006$	$0,797 \pm 0,013$
$\epsilon_{\text{empacotado}} \text{ (%)}$	$43,560 \pm 0,004$	$69,618 \pm 0,005$	$44,517 \pm 0,010$
n (-)	300	300	200

4.2.12. Porosidade interpartículas

Na Figura 57 estão dispostos os resultados de porosidade interpartículas do leito de grãos de cevada inteiros em função do número de batidas para diferentes conteúdos de umidades em base úmida.

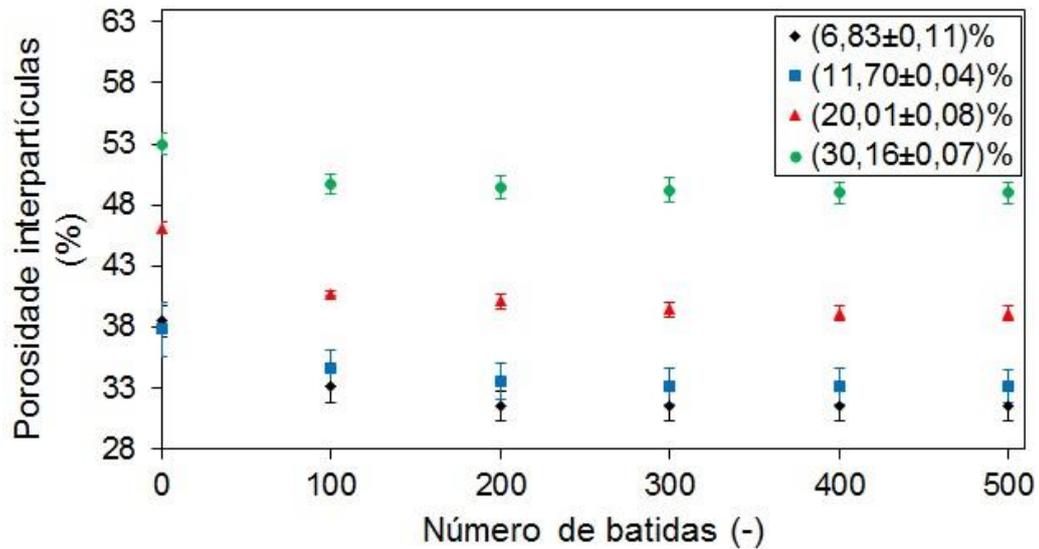
Figura 57 - Porosidade interpartículas em função do número de batidas parametrizado na umidade em base úmida para grãos inteiros (Fonte: Acervo Pessoal, 2018).



Por meio da Figura 57 foi verificado que os efeitos de resistência ao empacotamento para maiores umidades culminaram em um aumento da porosidade do meio poroso formado por grãos de cevada.

Na Figura 58 têm-se os resultados de porosidade interpartículas do leito de grãos de cevada polidos em função do número de batidas para diferentes conteúdos de umidades em base úmida.

Figura 58 - Porosidade interpartículas em função do número de batidas parametrizado na umidade em base úmida para grãos inteiros (Fonte: Acervo Pessoal, 2018).



Com o aumento da umidade houve aumento da porosidade que mostrou a presença de grandes vazios no meio poroso tanto para os leitos de grãos inteiros (Figura 57) quanto para os grãos polidos (Figura 58). Isso foi justificado pelas imagens das provetas discutidas na seção anterior.

4.2.13. Porosidade e o empacotamento

Na Tabela 6 têm-se os resultados de massa específica do leito e porosidade total para as diferentes técnicas de empacotamento.

Tabela 6 - Massas específicas do leito e porosidades para as diferentes técnicas de empacotamento (Fonte: Acervo Pessoal, 2018).

Técnica de empacotamento	Casca		Cevada	
	$\rho_{\text{leito}} \text{ (g/cm}^3\text{)}$	$\epsilon_{\text{leito}} \text{ (\%)}$	$\rho_{\text{leito}} \text{ (g/cm}^3\text{)}$	$\epsilon_{\text{leito}} \text{ (\%)}$
Primeira	0,28 ± 0,01	81,2 ± 0,2	0,48 ± 0,01	62,7 ± 0,5
Segunda	0,417 ± 0,006	69,6 ± 1,5	0,80 ± 0,01	44,5 ± 1,0
Terceira	0,687 ± 0,007	61,5 ± 0,6	0,94 ± 0,01	31,2 ± 1,0
Quarta	0,82 ± 0,02	42,8 ± 1,2	1,07 ± 0,02	22,2 ± 1,2

Pode-se verificar pelos resultados na Tabela 6 que as resistências ao empacotamento para os meios porosos formados por partículas da casca estavam presentes para todas as técnicas de empacotamento. O empacotamento por batidas longitudinais (segunda técnica) reduziu a porosidade cerca de 11,6% comparada a primeira técnica de empacotamento (leito aerado). Enquanto que para o material obtido da moagem dos grãos de cevada, a variação foi de aproximadamente 18,2% entre estas técnicas.

Isto comprova que o empacotamento para as partículas mais alongadas da casca (Figura 48) teve maior dificuldade de se rearranjar e empacotar, desta forma tendo uma menor redução do volume comparado com as partículas do grão de cevada moído que apresentavam características mais arredondadas (Figura 47).

Infere-se que as partículas mais alongadas e planas têm a necessidade um maior espaço para realizar um movimento de realocação no meio poroso, além de criar pontos de maiores resistências devido a maior superfície de contato ser maior.

Quanto a essa maior área de contatos interpartículas, este efeito também influenciou sobre as técnicas com força aplicada na superfície do leito (terceira e quarta técnica). Enquanto que entre a segunda e terceira técnica houve uma variação de 8% na porosidade para as partículas da casca, a variação foi de 13,3% para as partículas dos grãos de cevada moídos.

Comparando-se estes valores, pode-se verificar que os impactos sobre a superfície do leito (terceira técnica) tiveram menor efeito sobre as partículas da casca. Pois para que a força sobre a superfície do leito reduzisse a porosidade, ela teria que ser maior que a força de resistência entre as partículas. Com a maior área

de contato esta resistência de atrito entre as partículas aumentam significativamente para a casca.

Esta força foi maior quando aplicada pela prensa hidráulica (quarta técnica), quando foi comparada a terceira e a quarta técnica, para as partículas da casca a variação da porosidade foi de 18,7%, enquanto que para as partículas dos grãos de cevada moídos foi de 9%.

A variação entre estas técnicas foi maior para a casca, pois os meios porosos ainda estavam com uma alta porosidade de aproximadamente 69,7%, enquanto que para as partículas dos grãos era de aproximadamente 44,5%.

Ou seja, para a compressão com a prensa hidráulica, a força foi maior que a necessária para superar a resistência do meio poroso, reduzindo significativamente a porosidade para as partículas da casca. Todavia para as partículas dos grãos moídos, uma maior redução da porosidade necessitaria da deformação das partículas, sendo necessária uma força ainda maior.

4.3. Propriedades de transporte

Por meio das propriedades físicas das partículas e dos meios porosos formados pode-se discutir e analisar os resultados das propriedades de transporte.

4.3.1. Condutividade térmica efetiva

Na Figura 59 estão os resultados de condutividade térmica em relação à porosidade do leito formado por partículas obtidas da moagem dos grãos de cevada e da casca.

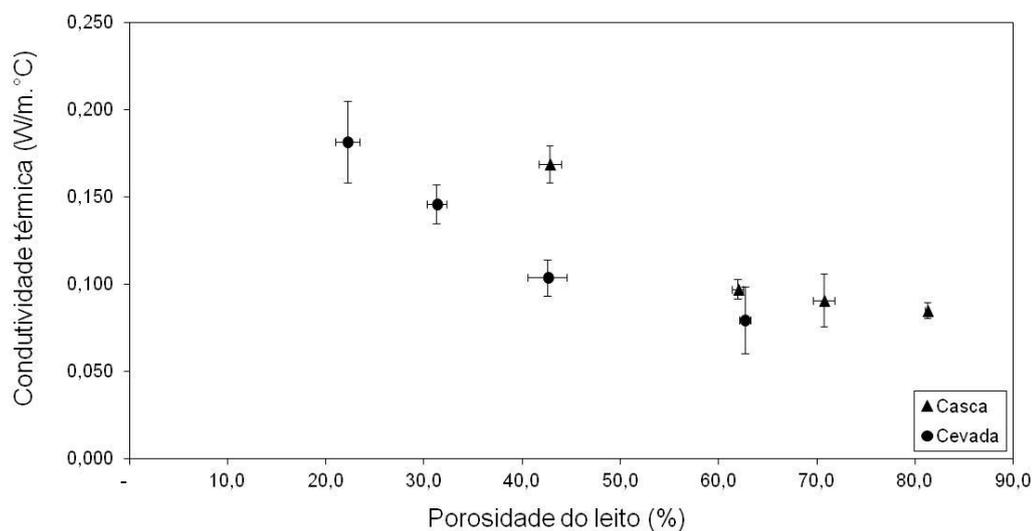
Analisando os valores de condutividade térmica efetiva para os grãos de cevada moídos, verificou-se que para porosidades abaixo de 50%, a condutividade térmica foi uma função aproximadamente linear da porosidade, aumentando conforme a redução da porosidade.

Entre a segunda e quarta técnica de empacotamento verifica-se que a força aplicada sobre a superfície deste leito aumentou o contato interpartículas, influenciando desta forma na condutividade térmica do meio poroso. Ou seja, quanto maior a força aplicada, mais as partículas se aproximavam, culminando em uma

maior a área de contato entre as partículas, desta forma aumentando a condutividade térmica do meio (GERMAN, 1989).

Porém quando observamos os resultados para as partículas da casca, entre a segunda e quarta técnica de empacotamento não foi obtido o mesmo perfil da condutividade térmica em função da porosidade. Isto se deve as resistências interpartículas, discutidas no item de porosidade e empacotamento, que são maiores para partículas planas devido a maior área de contato.

Figura 59 - Condutividade térmica efetiva do meio poroso em função da porosidade do leito para os produtos da moagem da casca e dos grãos de cevada (Fonte: Acervo Pessoal, 2018).



O que foi discutido para a Tabela 6 foi confirmado na Figura 59 por meio da avaliação da condutividade térmica efetiva das partículas da casca.

Verifica-se que para as partículas obtidas da moagem dos grãos de cevada, entre a primeira e segunda técnica, as variações foram muito pequenas, pois o empacotamento pelas batidas longitudinais permitia um rearranjo das partículas, porém não eram comprimidos estes materiais de forma a aumentar o contato entre as partículas. Entre a primeira e terceira técnica de empacotamento para as partículas da casca também foi verificada uma variação muito reduzida da condutividade térmica, ou seja, sendo possível inferir que para estas técnicas a força não era suficiente para se sobrepor as resistências do contato entre as partículas, como foi discutido para a porosidade total do leito na Tabela 6.

Conforme ocorreu a compressão com uma força de 1,5 toneladas sobre a superfície do meio poroso, essa resistência interna do foi ultrapassada e então houve uma redução na porosidade, pois o contato entre partículas aumentou. Devido à aproximação de partículas planas e alongadas, como as partículas da casca, a condutividade térmica foi maior do que para o leito com partículas da moagem dos grãos. Isto se deve, pois o contato entre superfícies planas tem uma maior área do que para superfícies de partículas com maior esfericidade.

Porém quando observados esses resultados, constata-se que nenhuma conclusão pode ser tomada quanto ao efeito da casca na condutividade térmica do grão. Isto se deve, pois as variações de empacotamento mostraram maior efeito na condutividade térmica, desta forma cobrindo os efeitos da casca sobre o grão.

Desta maneira, foi realizada a medida da condutividade térmica dos grãos de cevada e dos grãos de cevada sem casca (obtidos por impactação e polimento). Estes resultados podem ser visualizados na Tabela 7.

Tabela 7 - Condutividade térmica e porosidade do leito de sementes de cevada inteiras e polidas (Fonte: Acervo Pessoal, 2018).

Grãos	K_{eff} (W/m°C)	$\varepsilon_{\text{Total}}$ (%)
Inteiros	$0,086 \pm 0,001$	$42,2 \pm 0,6$
Polidos	$0,126 \pm 0,010$	$39,9 \pm 0,1$

Verifica-se que para os grãos polidos a condutividade térmica efetiva foi maior que para os grãos inteiros, porém a porosidade também foi menor. Pode observar que se os efeitos dos tecidos externos aos endospermas forem de isolamento térmico, os efeitos de proteção destes tecidos apresentam validade física, pois em ambientes de altas ou baixas temperaturas o endosperma e o embrião seriam protegidos termicamente.

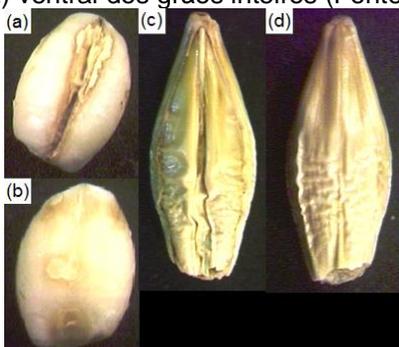
Na Figura 60 podem-se observar os grãos de cevada inteiros e polidos (sem casca). Com base nisto, pode-se constatar que os processos de retirada dos tecidos externos dos grãos de cevada para a condutividade térmica produziu partículas mais próximas de um elipsoide, reduzindo as extremidades alongadas dos grãos de cevada. Com base nisto, os resultados da Tabela 7 estão de acordo com Mata e

Duarte (2002), que verificaram que partículas mais alongadas apresentam uma maior porosidade do que partículas mais elipsoidais.

4.3.2. Propriedades fluidodinâmicas

As propriedades fluidodinâmicas foram avaliadas conforme o tempo de polimento, verificando-se os efeitos das variações das propriedades físicas sobre a permeabilidade do leito e também sobre a velocidade mínima de fluidização dos grãos.

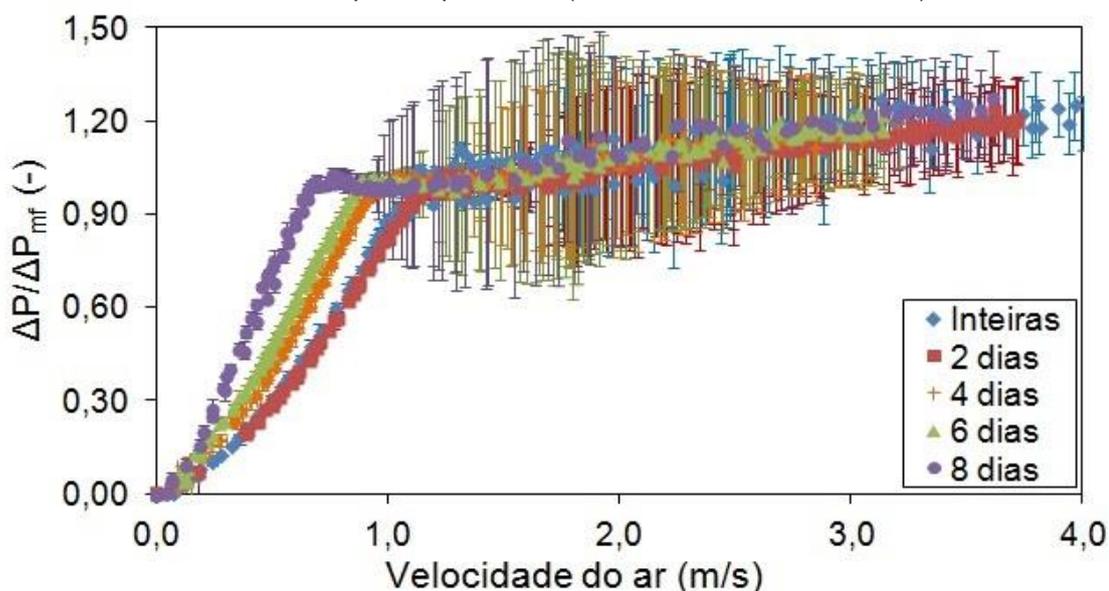
Figura 60 - Imagens de microcopia óptica das faces (a) dorsal e (b) ventral dos grãos sem casca e das faces (c) dorsal e (d) ventral dos grãos inteiros (Fonte: Acervo Pessoal, 2018).



A velocidade mínima de fluidização para esferas de vidro “ballotini” com diâmetro médio de $925 \mu\text{m}$, densidade de $2,5 \text{ g/cm}^3$ e altura estática de leito de $3,5 \text{ cm}$ foi de $(0,41 \pm 0,04) \text{ m/s}$. Para a correlação de Wen e Yu, o valor da velocidade mínima de fluidização é de $0,46 \text{ m/s}$. Portanto, este resultado experimental mostra que a unidade fluidodinâmica experimental apresenta boa concordância operacional com o que é apresentado na literatura, sendo que a variação percentual foi menor que 10%, variação razoável do ponto de vista da engenharia.

Na Figura 61 têm-se os resultados do adimensional da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar para diferentes tempos de polimento.

Figura 61 - Adimensional da queda de pressão em função da velocidade do ar, parametrizado em diferentes tempos de polimento (Fonte: Acervo Pessoal, 2018).



Verifica-se que a relação do adimensional de queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar apresenta comportamento característico para curvas fluidodinâmicas em leito fluidizado.

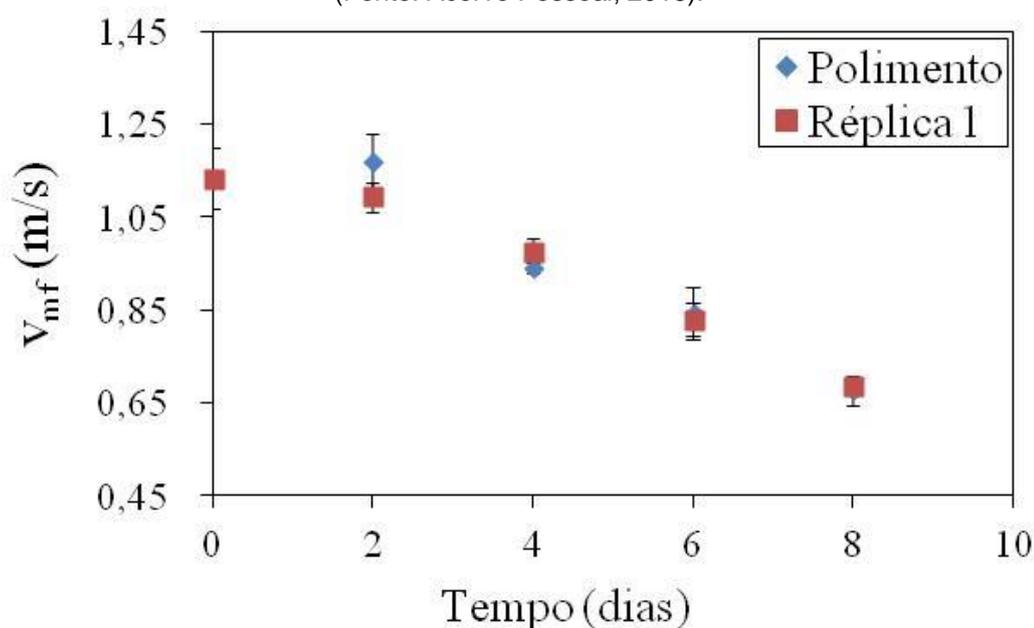
Sendo possível avaliar o período da queda de pressão aproximadamente constante com a velocidade do ar, característico do regime de fluidização. E então a redução da queda de pressão com a velocidade superficial do ar, característico do regime de leito fixo.

Os resultados de velocidade de mínima fluidização em função do tempo de polimento podem ser visualizados na Figura 62.

Por meio da Figura 62, podem ser comparados dois experimentos de polimento, comparando-se estes dois experimentos verifica-se que as diferenças das médias entre os polimentos são menores que os seus desvios. Desta forma, comprovando-se a reprodutibilidade dos experimentos de polimento por meio dos resultados de fluidodinâmica.

Constata-se que as variações das médias entre os experimentos de dois dias de polimento e grãos inteiros foi aproximadamente desprezível. Para tempos de polimento maiores que quatro dias pode-se verificar que a velocidade de mínima fluidização reduz com o tempo de polimento.

Figura 62 - Velocidade mínima de fluidização em função do tempo de polimento para defluidização
(Fonte: Acervo Pessoal, 2018).



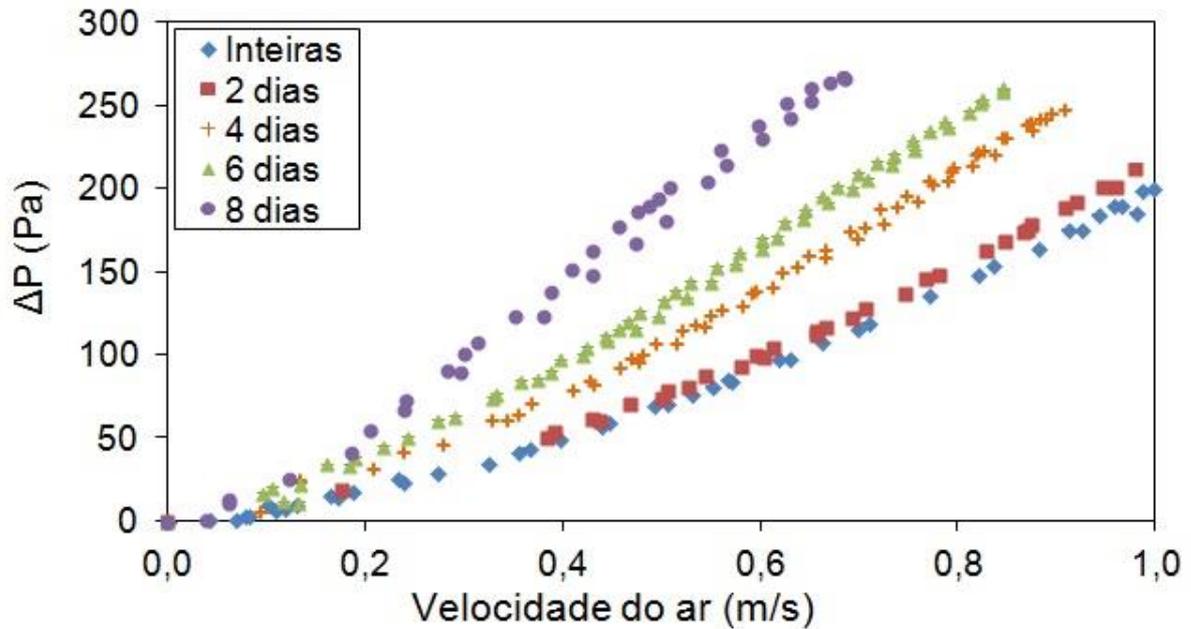
Devido a reduções da espessura (Figura 28) e a redução das irregularidades superficiais dos grãos de cevada com o polimento, as características desta partícula foram se aproximando de sólidos perfilados (aerofólios).

Ou seja, infere-se que o polimento gerou partículas, que o escoamento do ar em seu em torno tem uma maior distância entre o ponto de estagnação e de separação da camada limite. Desta forma, aumentam-se as interações entre o fluido e a partícula reduzindo o valor da velocidade necessária para a fluidização.

Na Figura 63 verifica-se a queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar para o regime de leito fixo.

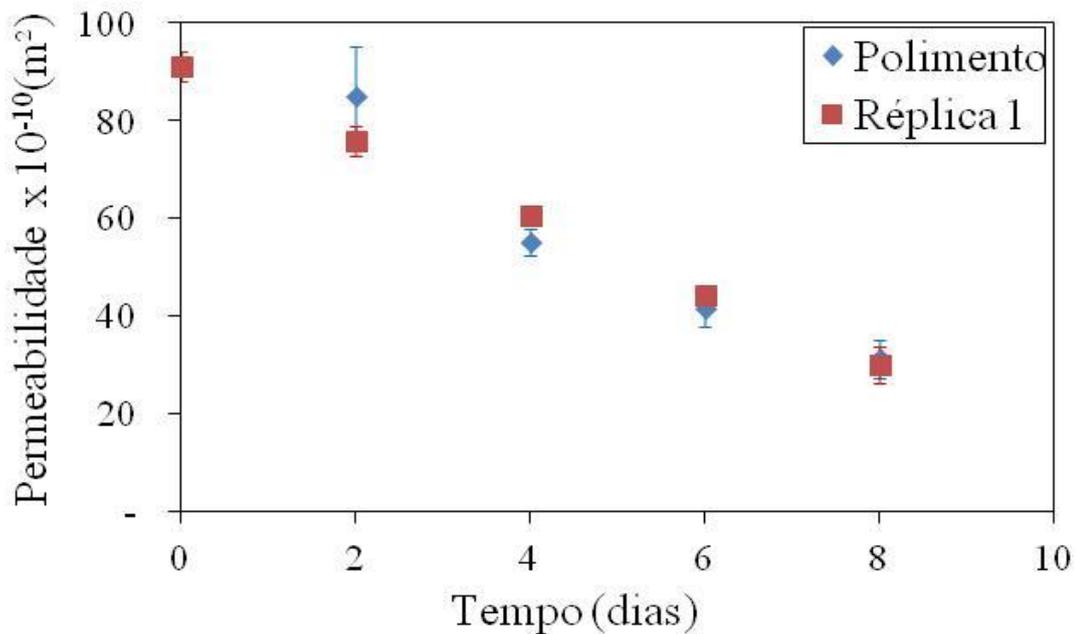
Observa-se que a queda de pressão no leito aumenta com o tempo de polimento, isto se deve, pois estes experimentos foram realizados com altura de leito fixo de 3,5 cm. Desta forma, como a massa específica do leito aumentou com o tempo de polimento (Figura 51), uma maior massa de grãos foi necessária para maiores tempos de polimento, aumentando o valor da queda de pressão.

Figura 63 - Queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar durante a fluidização (Fonte: Acervo Pessoal, 2018).



Na Figura 64 podem se vistos os resultados de permeabilidade do meio poroso de grãos de cevada em função do tempo de polimento.

Figura 64 - Permeabilidade do meio poroso em função do tempo de polimento (Fonte: Acervo Pessoal, 2018).



Conforme se aumentou o tempo de polimento, aumentou-se a massa específica do leito (Figura 51), com isso constata-se que os vazios interpartículas reduziram, aumentando a resistência ao escoamento. Assim, conforme se aumentou o tempo de polimento dos grãos, os meios porosos formados por estes grãos polidos foram menos permeáveis, devido a redução dos poros para o escoamento do ar.

4.3.3. Difusividade mássica efetiva

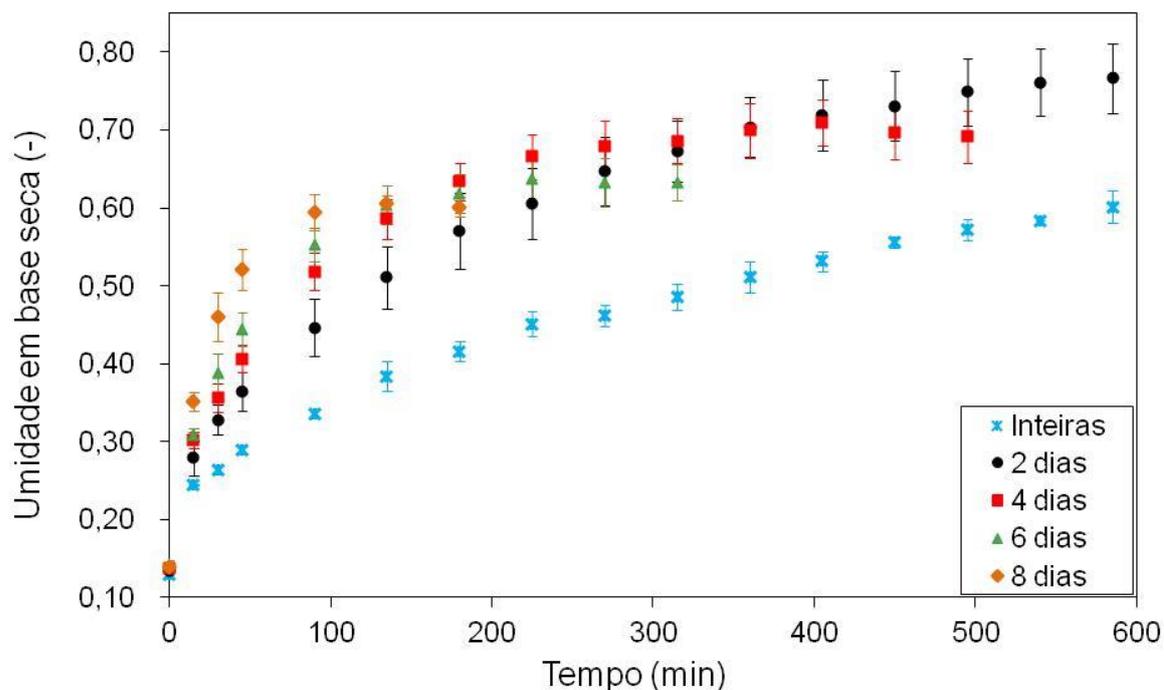
Na Figura 65 foram dispostos os dados de umidade em função do tempo de reumidificação para diferentes tempos de polimento.

Verifica-se neste resultado que o polimento dos grãos de cevada aumenta a cinética da transferência de massa durante o processo de reumidificação dinâmica, porém o maior aumento foi entre os grãos inteiros e polidos por dois dias. Desta maneira sendo possível constatar que os tecidos externos que foram retirados com o polimento formam uma barreira a transferência de massa de água.

Adimensionalizando a umidade conforme Equação 14 e convertendo o tempo para segundos, ajustou-se o modelo difusivo, aproximando a geometria dos grãos de cevada para um cilindro (Equação 18).

As difusividades efetivas da água para o interior dos grãos de cevada em função da fração mássica removida pelo processo de polimento estão mostradas na Figura 66.

Figura 65 - Umidade em base seca em função do tempo parametrizado nos tempos de polimento
(Fonte: Acervo Pessoal, 2018).

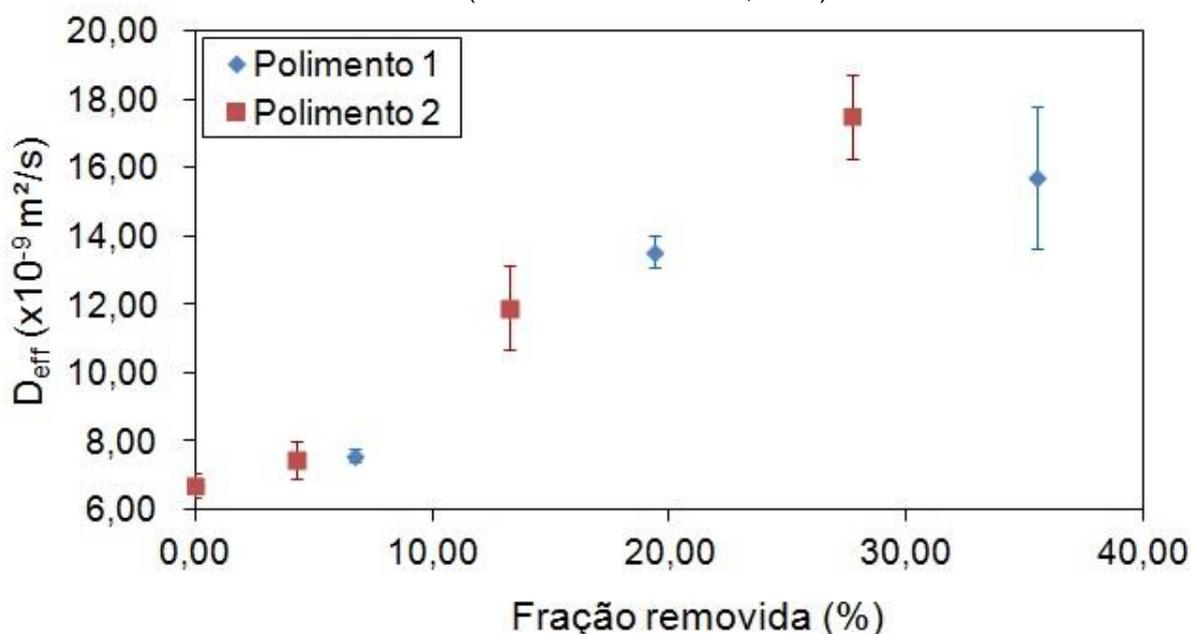


Observa-se que com o aumento da fração mássica removida, o valor de difusividade aumentou, até que para aproximadamente 28% de massa removida foi observado um valor máximo de difusividade.

Assim sendo, observou-se que para frações mássicas removidas maiores que 30% a redução observada foi devido as lixiviações dos amidos do endosperma, como pode ser constatado pela Figura 65, para a qual se observa que para os tempos de polimento de 6 e 8 dias, houve uma redução da umidade nos tempos finais do processo de reumidificação. Isto se deve a perda de massa de amido ao longo do processo de reumidificação.

Os resultados para a transferência de massa estão de acordo com os resultados apresentados para a cinética de remoção de massa (Figura 22), para as medidas de largura (Figura 28), para as medidas de massa específica do leito (Figura 52), além de outros dados discutidos. Para estes resultados observaram-se inflexões nos resultados experimentais para tempo de polimento de aproximadamente cinco dias ou com fração mássica removida em torno de 25%.

Figura 66 - Difusividade efetiva em função da fração mássica removida durante a reumidificação dinâmica (Fonte: Acervo Pessoal, 2018).



4.4. Transferência de Calor

Após as caracterizações com o polimento, pode-se observar que o grau de que não teve mais a influência dos tecidos externos sobre as propriedades físicas e de transporte foi para 5 dias. Portanto, decidiu-se comparar os efeitos dos tecidos externos na transferência de calor e massa durante a secagem com os grãos polidos com 5 dias, que serão tratados de forma generalizada, a partir deste ponto, como grãos polidos.

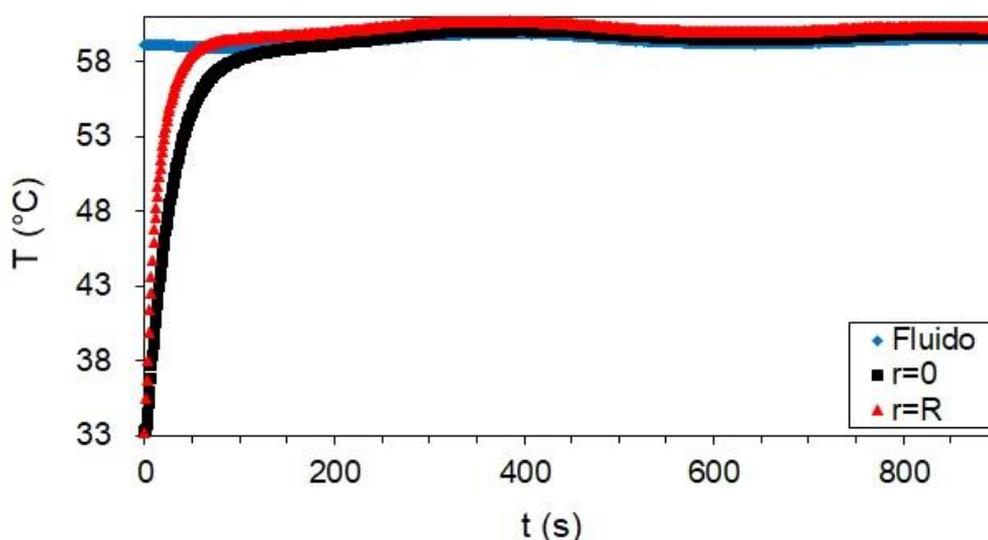
A transferência de calor, bem como a transferência de massa, será apresentada numa ordem crescente de efeitos. Inicialmente iremos tratar da partícula isolada, então será tratado o leito fluidizado que é uma aproximação para partícula isolada, porém com a movimentação da partícula. Então iremos tratar dos leitos fixos, primeiramente o leito fixo com escoamento de ar intersticial, que devido a percolação do ar pelo meio poroso deve ter uma reduzida resistência interpartículas, e por fim, o leito fixo com escoamento tangencial que deve ter tanto os efeitos das resistências intrapartículas como interpartículas.

4.4.1. Partícula isolada

Na Figura 67 tem-se a comparação das temperaturas do fluido, na superfície ($r=R$) e no centro ($r=0$) do grão de cevada inteiro seco. Ou seja, não há os efeitos de transferência de massa, pois o grão estará muito próximo às condições de equilíbrio com o ar aquecido.

Verifica-se que a temperatura do centro do grão é levemente menor que a temperatura da superfície nos instantes iniciais. Essa diferença é reduzida com o tempo, conforme há a condução de calor interna no grão, que aumenta a temperatura do centro.

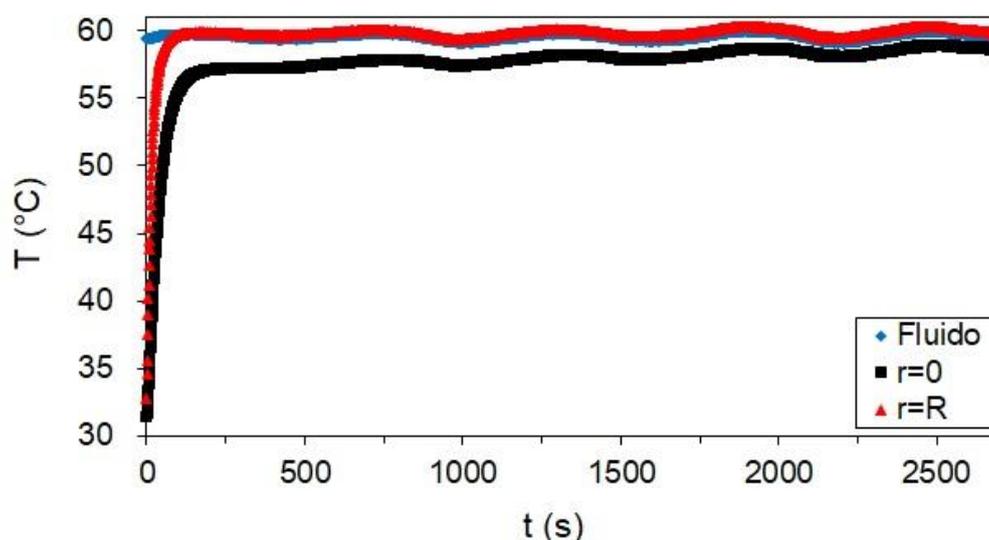
Figura 67 - Temperaturas em função do tempo de imersão em escoamento de ar para grão inteiro seco submerso (Fonte: Acervo Pessoal, 2018).



Na Figura 68 pode-se ver a temperatura do fluido, do centro do grão e da superfície durante o aquecimento (e conseqüentemente secagem) do grão de cevada inteiro úmido.

Para este resultado (Figura 68) tem-se o efeito da vaporização do filme líquido, o que prolongou a diferença da temperatura da superfície com o centro do grão. Pois, a retirada de calor da superfície devido à mudança de fase da água reduzia quantidade de calor disponível para o aquecimento do grão.

Figura 68 - Temperaturas em função do tempo de imersão em escoamento de ar para grão inteiro úmido submerso (Fonte: Acervo Pessoal, 2018).



Para os grãos polidos os mesmos mecanismos foram observados quando comparados aos grãos inteiros (Figura 67). Inicialmente, o aumento da temperatura da superfície com escoamento (mecanismo convectivo) e, a partir disto, o aumento da temperatura no centro do grão seco devido à condução de calor. E com o aumento da umidade, para o grão polido úmido, a vaporização aumentou o tempo para a elevação da temperatura do centro do grão até o valor de temperatura de bulbo seco.

Portanto, estes resultados não foram apresentados neste trabalho, para evitar repetições das discussões.

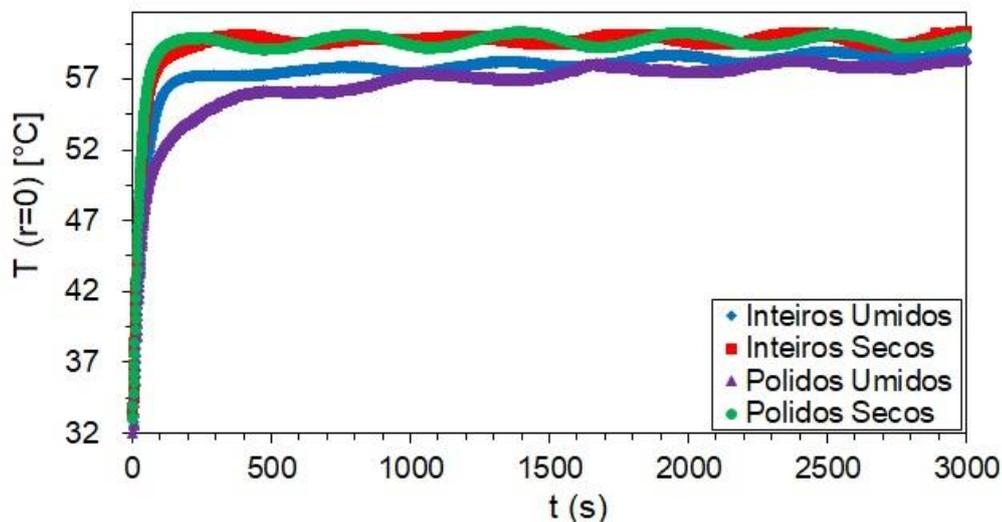
Na Figura 69 tem-se a temperatura no centro do grão em função do tempo de imersão no escoamento de ar aquecido.

Com a Figura 69 foi possível a comparação da temperatura no centro do grão para grãos polidos e inteiros e observou-se que não houve efeito do polimento sobre a temperatura do centro do grão. Porém, o processo de aquecimento com os grãos úmidos precisou de um maior tempo para a elevação da temperatura aos mesmos níveis do grão polido seco.

Como discutido anterior, isto se deve a energia consumida para mudança de fase da água contida no filme líquido mais espesso para partículas mais úmidas. Constata-se que uma maior energia era necessária para evaporação da água da superfície do grão polido quando comparado com o grão inteiro, pois necessitou de

um maior tempo de aquecimento para que as temperaturas do centro destes grãos se igualassem. Isto pode estar relacionado a força de interação de superfície do grão e o filme líquido, a presença de resíduo de amido pulverizado na superfície do grão polido e a maior velocidade da difusão mássica de água no grão polido.

Figura 69 - Temperatura no centro do grão ($r=0$) em função do tempo de imersão em escoamento de ar para diferentes condições dos grãos de cevada (Fonte: Acervo Pessoal, 2018).



A Figura 70 mostra as temperaturas na superfície do grão em função do tempo de imersão no escoamento de ar aquecido para diferentes condições dos grãos de cevada (inteiro, polido, úmido e seco).

Além das condições dos grãos foi comparado um experimento denominado “branco”, no qual a base de cobre foi imersa no escoamento com os termopares fixados, mas sem os grãos.

Foi possível observar por meio da Figura 70 que o branco foi próximo aos valores de temperatura medidos com os grãos inteiros úmidos e secos e grãos polidos.

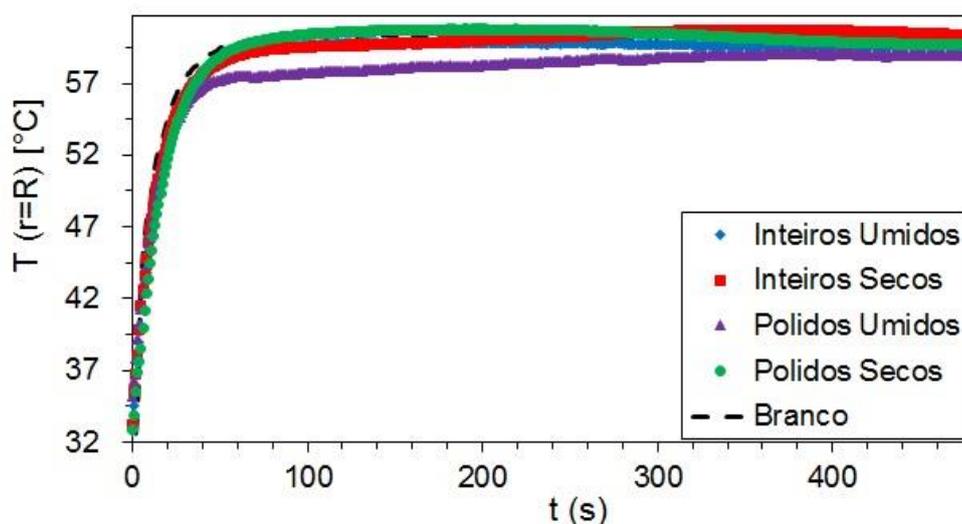
Isto é esperado, pois como a base de cobre é uma placa, o efeito longitudinal desta placa pode se sobrepor aos pequenos efeitos da superfície do grão sobre o metal. Para os grãos secos, os efeitos da temperatura na superfície foram muito pequenos, pois a superfície chega na temperatura do fluido rapidamente devido a baixa resistência convectiva. Porém para os grãos úmidos a entalpia de

vaporização necessária para mudar de fase a água da superfície do grão, retarda a entrada em regime permanente da transferência de calor.

Estes efeitos maiores vão influenciar mais na temperatura de superfície medida, como pode ser visto para o grão polido úmido (Figura 70).

Apesar de esta medida apresentar estes problemas, em sua aproximação para a medida da temperatura da superfície, ainda foi razoável. Devido à dificuldade de se obter uma medida de temperatura de superfície satisfatória para tal tamanho de amostra.

Figura 70 - Temperatura na superfície ($r=R$) em função do tempo de imersão em escoamento de ar (Fonte: Acervo Pessoal, 2018).



A Figura 71 mostra a temperatura do fluido durante o aquecimento dos grãos em diferentes condições (inteiros, polidos, úmidos e secos).

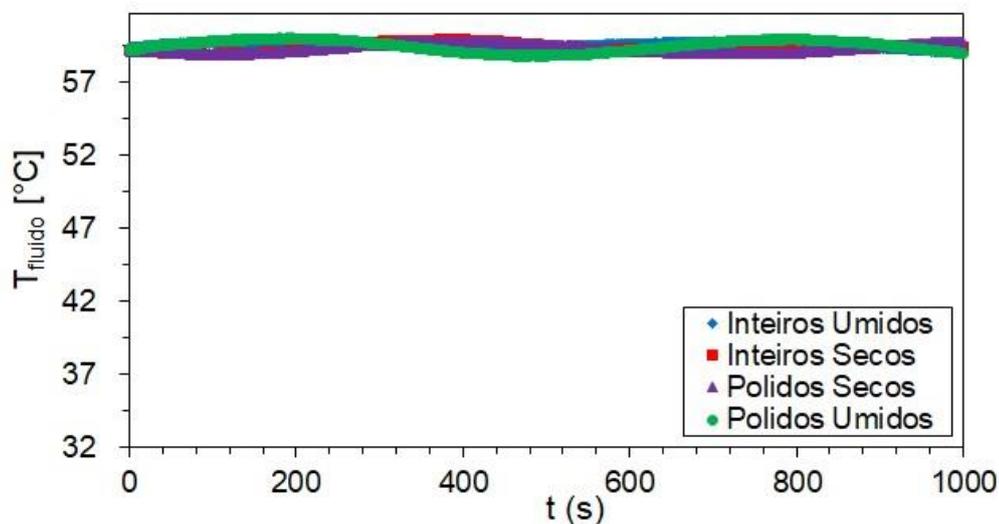
Por meio da Figura 71 pode-se confirmar que o fluido que aquecia o grão estava no mesmo valor para todas as condições dos grãos de cevada.

A Figura 72 mostra os resultados de calor diferencial de varredura (do inglês “Differential Scanning Calorimetry – DSC”) em relação ao tempo para grãos inteiros e polidos secos.

Observa-se, por meio da Figura 72, que nos primeiros instantes de aquecimento há um pico endotérmico de calor, que é independente do polimento do grão. Este pico endotérmico é efeito da mudança de fase da água do filme líquido. Devido à sensibilidade deste experimento, mesmo filmes líquidos muito finos influenciam no calor. Desta maneira, observamos que a interação de superfície do

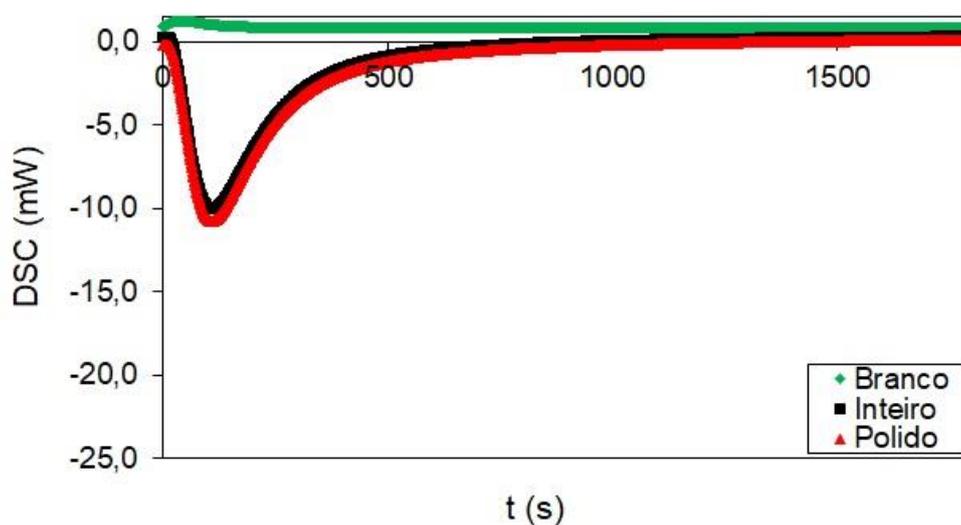
grão com a água não muda com o polimento do grão, tendo em vista que o pico endotérmico foi semelhante para grãos polidos e inteiros.

Figura 71 - Temperatura do fluido em função do tempo durante os experimentos de transferência de calor com partícula isolada submersa (Fonte: Acervo Pessoal, 2018).



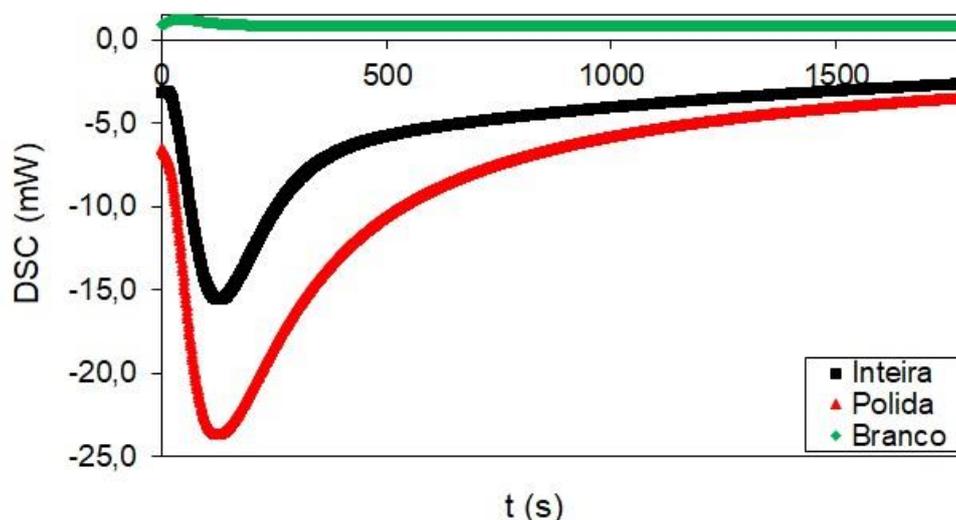
O “branco” (Figura 72) corresponde a corrida com mesma configuração operacional, porém com o cadinho de alumínio vazio. Desta maneira sendo um linha de referência para os demais experimentos com os grãos de cevada polidos e inteiros.

Figura 72 - Calor diferencial de varredura em função do tempo para grão inteiro e polido seco (Fonte: Acervo Pessoal, 2018).



Na Figura 73 tem-se o calor diferencial de varredura em função do tempo grão inteiro e polido úmido.

Figura 73 - Calor diferencial de varredura em função do tempo para grão inteiro e polido úmido (Fonte: Acervo Pessoal, 2018).



Pela Figura 73 observamos que o aumento da umidade dos grãos aumentou o ponto de mínimo do pico e reduziu sua simetria comparado a Figura 72. Isto, pois com o aumento da umidade deve-se ter aumentado a espessura do filme líquido (ou seja, a massa de água na superfície) aumentando o ponto de máximo do pico endotérmico. A simetria do pico reduziu, pois, ao alcançar o ponto máximo de energia absorvida, começou a se reduzir o filme líquido até o ponto de reduzir a absorção de energia. Porém, diferentemente dos grãos secos em que o filme líquido acabava (Figura 72), para os grãos úmidos há a difusão alimentando o filme líquido, retardando a redução da energia absorvida.

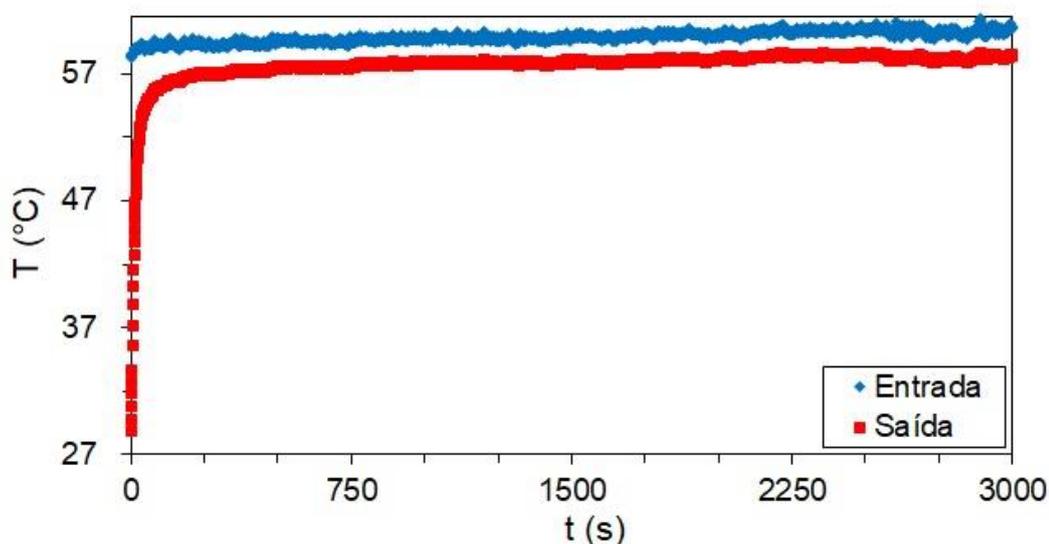
4.4.2. Leito fluidizado

A Figura 74 mostra a temperatura de entrada e saída do ar no leito fluidizado com grãos inteiros secos.

Por meio da Figura 74, pode-se constatar que a energia absorvida para aumentar a temperatura do grão, faz com que nos instantes iniciais tenha-se uma menor temperatura de saída. Assim, conforme reduz a energia necessária para o

aquecimento do grão, aumenta-se a temperatura na saída, pois o ar sai com aproximadamente a mesma temperatura de entrada.

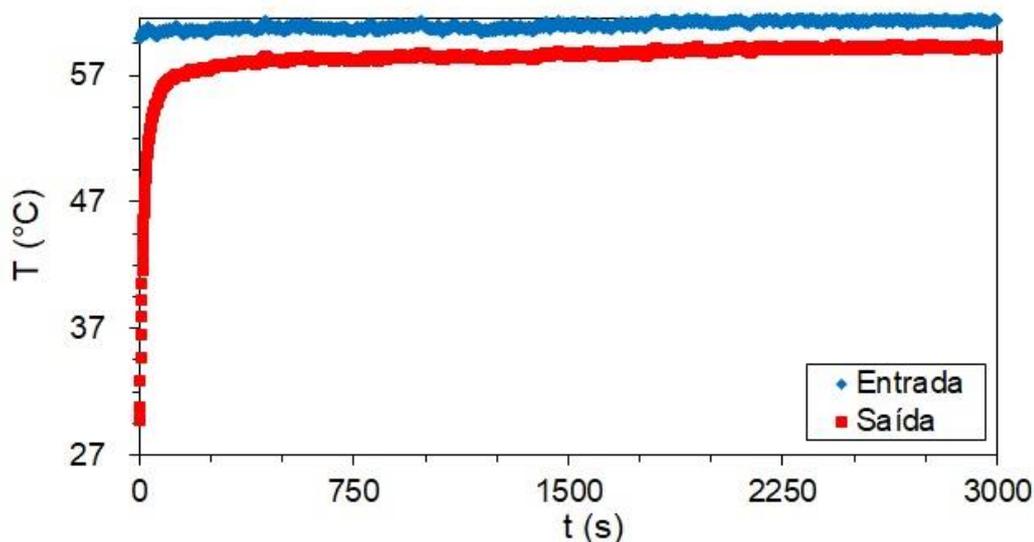
Figura 74 - Temperatura em função do tempo durante a fluidização de grãos inteiros secos (Fonte: Acervo Pessoal, 2018).



Contudo, observamos que a temperatura de saída não se iguala a temperatura de entrada, isto pois, há perda de calor pela parede do leito. Como o ambiente externo funciona como um sorvedouro de calor, o processo entra em regime permanente, porém ainda continua perdendo calor pela parede do leito.

Na Figura 75 têm-se os dados de temperatura do ar na entrada e na saída do leito fluidizado com grãos inteiros úmidos.

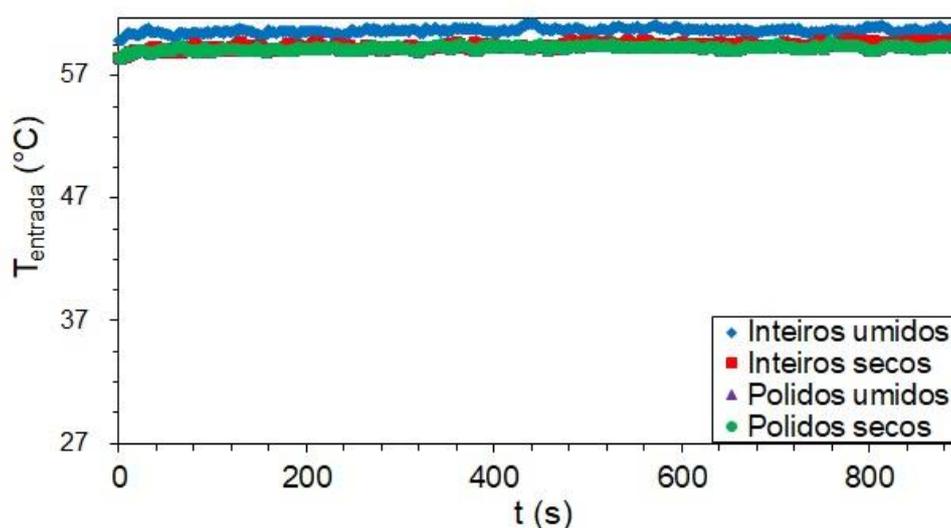
Figura 75 - Temperatura em função do tempo durante a fluidização de grãos inteiros úmidos (Fonte: Acervo Pessoal, 2018).



Por meio da Figura 75, podem-se fazer as mesmas constatações para os grãos inteiros úmidos dos que para os secos da Figura 74. E o mesmo perfil é analisado para os grãos úmidos e secos polidos, portanto não serão repetidos estes dados para os grãos polidos.

Na Figura 76 têm-se os dados de temperatura do ar de entrada para as diferentes condições dos grãos em leito fluidizado.

Figura 76 - Temperatura de entrada no leito fluidizado em relação ao tempo (Fonte: Acervo Pessoal, 2018).



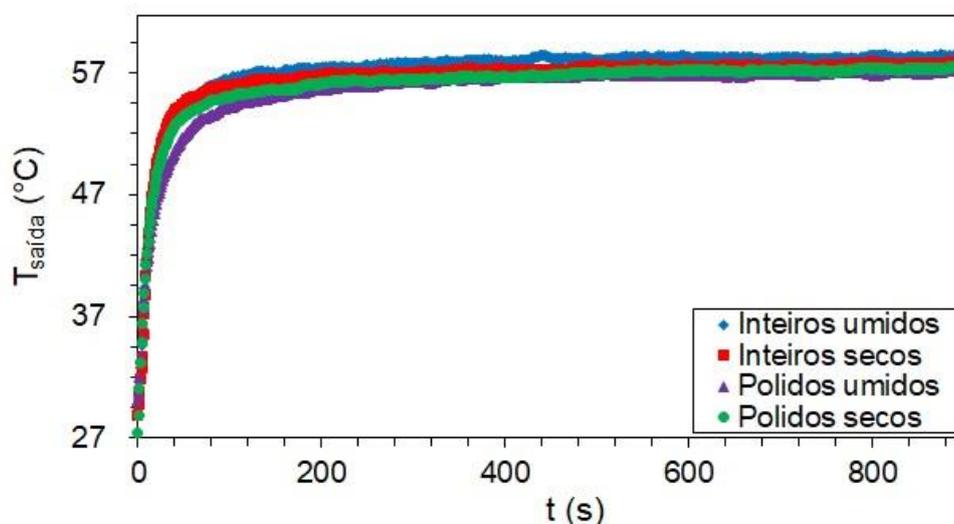
Os dados apresentados na Figura 76 nos permite afirmar que para todas as condições, os grãos estiveram em contato com o ar com a mesma temperatura de entrada.

Na Figura 77 têm-se os dados de temperatura de saída do ar do leito fluidizado em relação ao tempo para diferentes condições dos grãos de cevada.

Pela Figura 77 verificou-se que novamente os grãos polidos úmidos teve maior influência térmica, tendo em vista que para as três demais condições dos grãos teve-se um comportamento parecido da temperatura de saída com o tempo. Porém, para os grãos úmidos houve um pequeno retardo no aumento de temperatura de saída. Anteriormente, verificou-se na Figura 70 que a temperatura da superfície do grão polido úmido demorou alcançar à temperatura de bulbo seco (ou

do escoamento de ar) comparada as demais condições e que o calor absorvido por esses grãos é bem maior do que para o grão inteiro úmido (Figura 73).

Figura 77 - Temperatura de saída no leito fluidizado em relação ao tempo (Fonte: Acervo Pessoal, 2018).



Desta forma, os dados concordaram entre si quando tratamos do leito fluidizado e da partícula isolada submersa.

4.4.3. Leito fixo

Para os experimentos em leito fixo foi realizado duas maneiras de contato com o escoamento de ar. Leito fixo com escoamento intersticial, onde o ar percola pelos poros do leito fixo, onde a direção do escoamento é normal à seção de entrada do meio poroso e o leito fixo com escoamento tangencial (sem escoamento intersticial). Neste caso o escoamento ocorre em torno do leito fixo e o meio poroso se comporta como uma placa porosa.

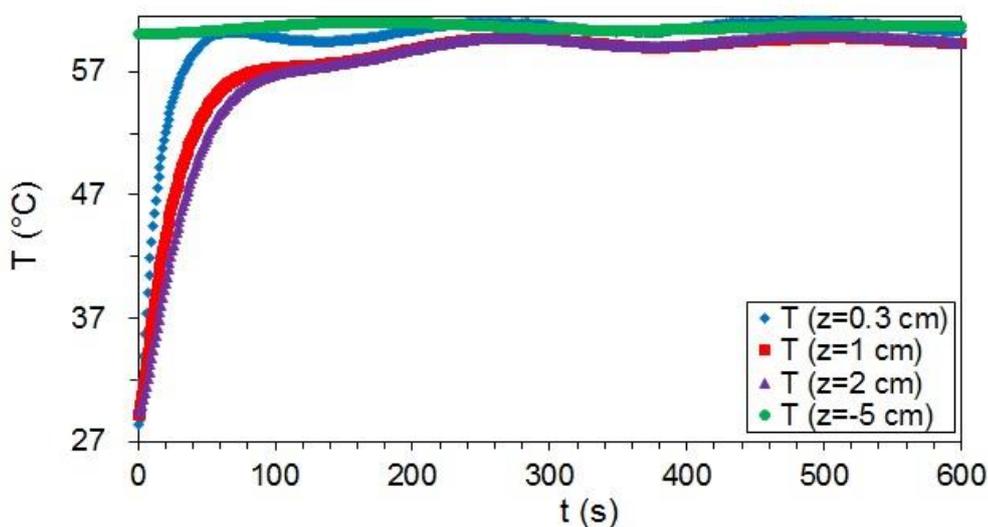
4.4.3.1. Escoamento Perpendicular

As temperaturas da mistura grãos e ar na direção axial do escoamento de ar, medidas em diferentes alturas do meio poroso formado por grãos inteiros secos pode ser visto na Figura 78.

A temperatura em 0,3 cm subiu rapidamente e para as camadas superiores não houve variações significativas nas temperaturas medidas como pode ser visto na Figura 78. O comportamento diferente de 0,3 cm pode estar relacionado variação

de porosidade longitudinal em leitos fixos, isto se deve, a maior porosidade na base devido aos efeitos da interação da tela com os grãos. Desta maneira, esta temperatura tinha maior influência da temperatura do ar de entrada do que dos grãos (ZOTIN, 1985).

Figura 78 - Temperaturas em diferentes posições axiais do leito fixo em relação ao tempo para grãos inteiros secos (Fonte: Acervo Pessoal, 2018).

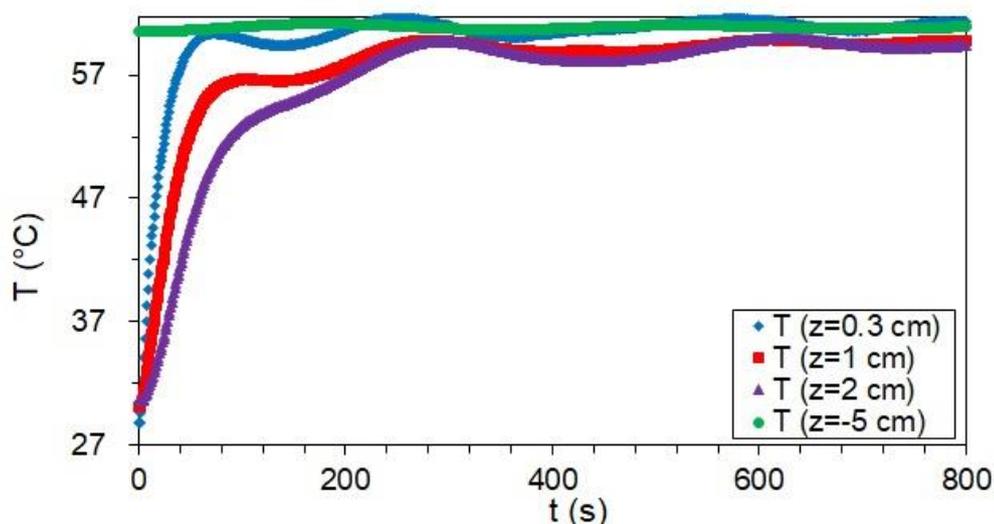


Observamos que entre 1 e 2 cm não há variação nos perfis de temperaturas para grãos inteiros secos. Mostrando que os efeitos do meio poroso foram tão pequenos que aproximadamente não houve influência da estrutura porosa, sendo esta uma das principais condições para se aplicar a hipótese de camada fina.

Na Figura 79 têm-se as temperaturas em diferentes alturas do leito fixo formado por grãos polidos secos.

Comparando a Figura 79 com a Figura 78, constata-se que os grãos polidos formam um meio poroso que tem um maior efeito sobre o escoamento intersticial, isso pode estar relacionado ao maior valor de massa específica do leito de grãos polidos (Figura 51). Pois com a maior concentração de massa, mais calor foi absorvido pelas camadas do meio poroso tendo uma maior variação de temperaturas longitudinais.

Figura 79 - Temperaturas em diferentes posições axiais do leito fixo em relação ao tempo para grãos polidos secos (Fonte: Acervo Pessoal, 2018).

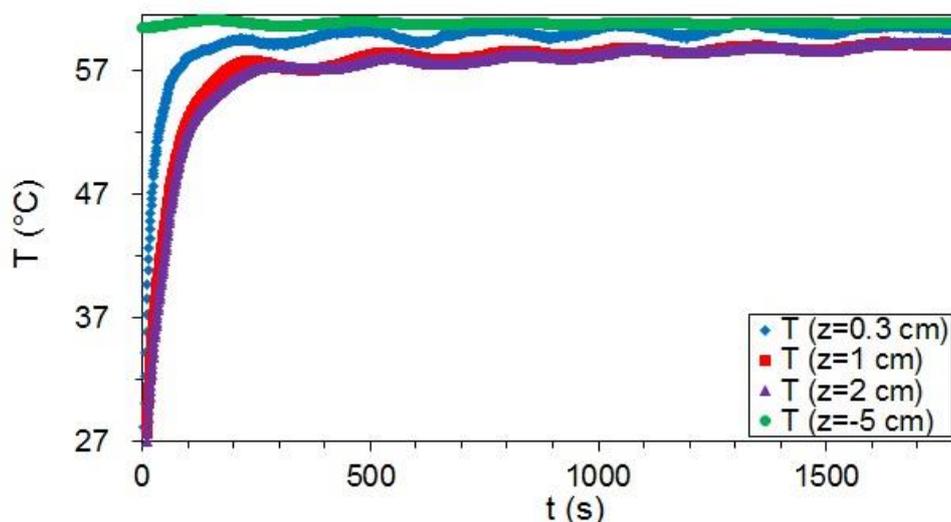


Na Figura 80 têm-se as temperaturas longitudinais do meio poroso formado por grãos de cevada inteiros úmidos. Verifica-se novamente que mesmo com a maior umidade dos grãos não houve um aumento da absorção de calor suficiente para influenciar nas temperaturas longitudinais.

Se compararmos com a Figura 70 e a Figura 75, vemos que os grãos inteiros úmidos não apresentaram variação significativa nem da sua temperatura superficial e nem da temperatura de saída do leito fluidizado quando comparado com os grãos polidos úmidos. Além de que com a maior umidade, a porosidade do leito de grãos inteiros úmidos é maior (Figura 57), oferecendo uma menor resistência ao escoamento.

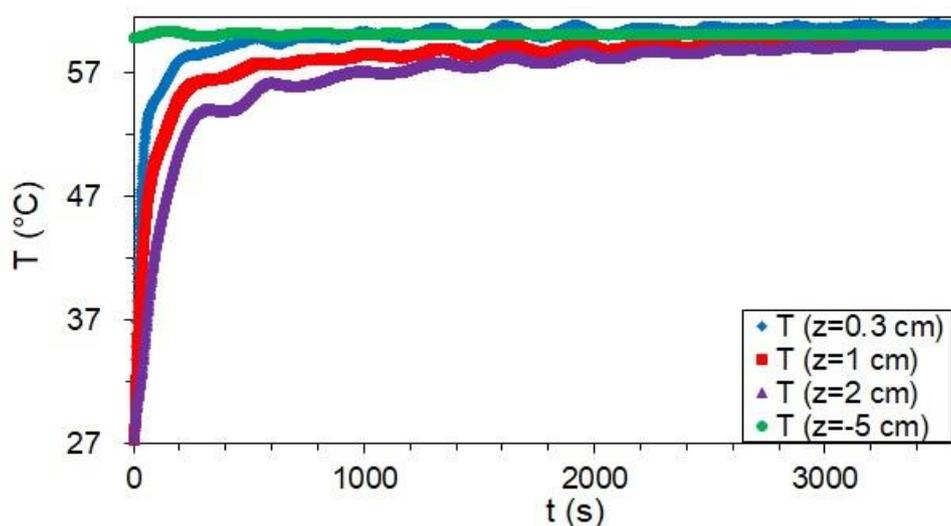
Tratando-se da resistência ao escoamento do ar vemos que os grãos polidos têm uma maior resistência ao escoamento do que os grãos inteiros (Figura 64).

Figura 80 - Temperaturas em diferentes posições axiais do leito fixo em relação ao tempo para grãos inteiros úmidos (Fonte: Acervo Pessoal, 2018).



A Figura 81 mostra os dados de temperatura ao longo do leito fixo formado por grãos polidos úmidos.

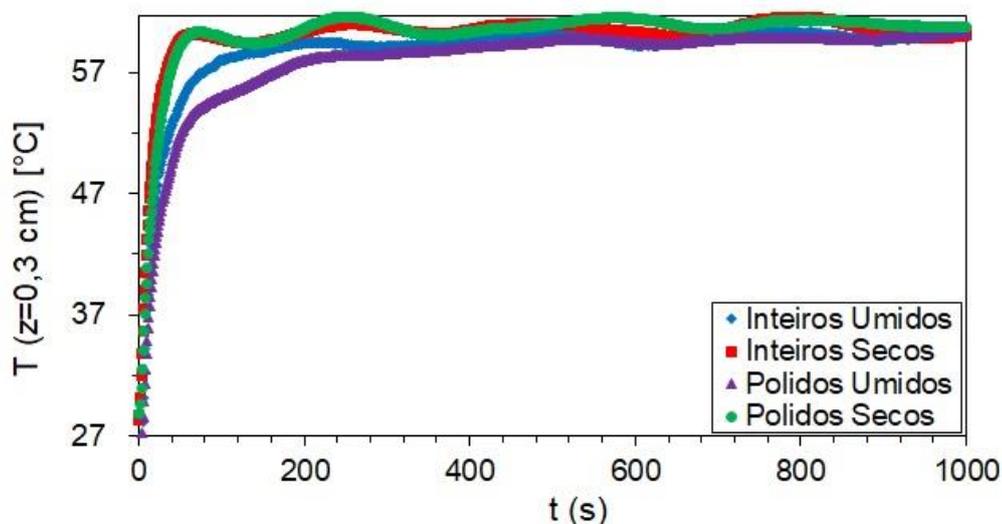
Figura 81 - Temperaturas em diferentes posições axiais do leito fixo em relação ao tempo para grãos polidos úmidos (Fonte: Acervo Pessoal, 2018).



Pela Figura 81 verifica-se, como discutimos anteriormente, que a maior resistência ao escoamento (Figura 64), maior concentração mássica (Figura 51) e maior quantidade de calor absorvida (Figura 73) pelos grãos polidos úmidos causaram uma maior influência nas temperaturas das camadas do leito fixo.

Na Figura 82 estão os resultados de temperaturas em 0,3 cm para as diferentes condições dos grãos de cevada.

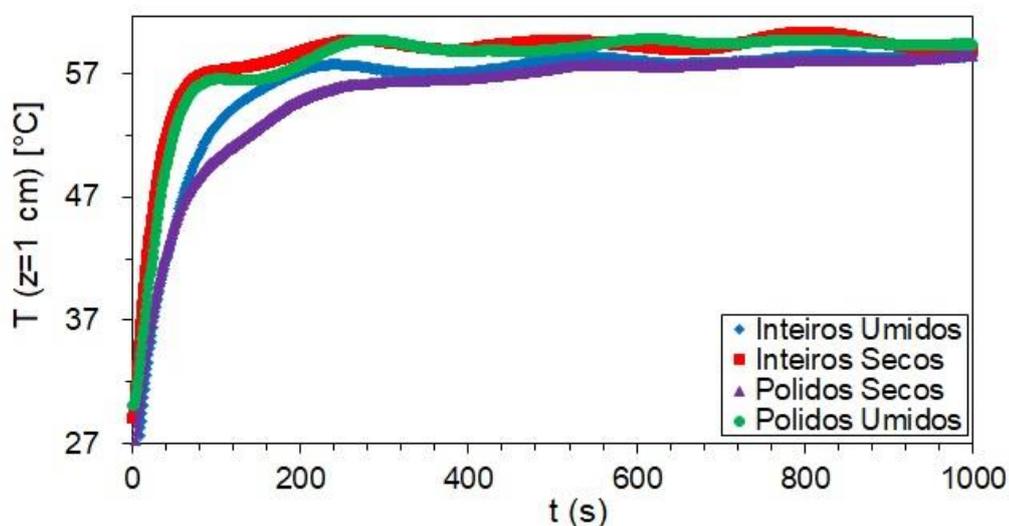
Figura 82 - Temperaturas em $z=0,3$ cm em relação ao tempo para diferentes condições dos grãos de cevada (Fonte: Acervo Pessoal, 2018).



A partir da Figura 82 pode-se constatar que para grãos inteiros e polidos secos não houve variações significativas, tendo em vista que as linhas se sobrepõem. Tendo uma leve redução da temperatura para os grãos inteiros e outra redução para grãos polidos, ambos os úmidos. Os demais resultados de transferência de calor, anteriormente discutidos, estão coerentes e justificam este comportamento.

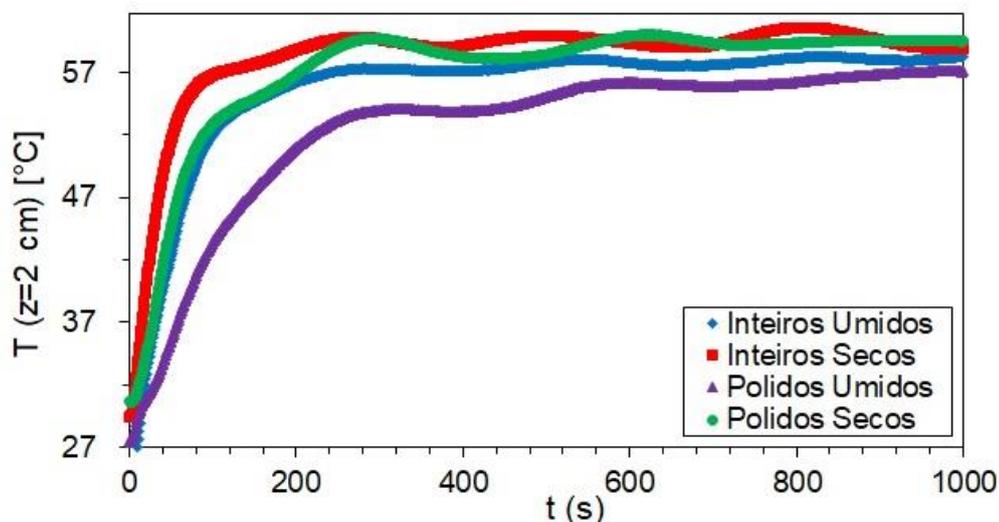
Da mesma maneira podem ser discutidos os resultados das temperaturas para 1 cm de leito fixo nas diferentes condições dos grãos na Figura 83.

Figura 83 - Temperaturas em $z=1$ cm em relação ao tempo para diferentes condições dos grãos de cevada (Fonte: Acervo Pessoal, 2018).



Na Figura 84 têm-se as temperaturas em $z=2$ cm para diferentes condições dos grãos de cevada.

Figura 84 - Temperaturas em $z=2$ cm em relação ao tempo para diferentes condições dos grãos de cevada (Fonte: Acervo Pessoal, 2018).



Entre a Figura 81 e Figura 84 observamos os mesmos comportamentos das temperaturas para as diferentes condições dos grãos, porém observamos que as variações entre as condições foram aumentando conforme se aumentou a altura. Isto era esperado, pois os efeitos das camadas foram acumulativos e quanto maior a altura, maior os efeitos nas temperaturas.

4.4.3.2. Escoamento tangencial

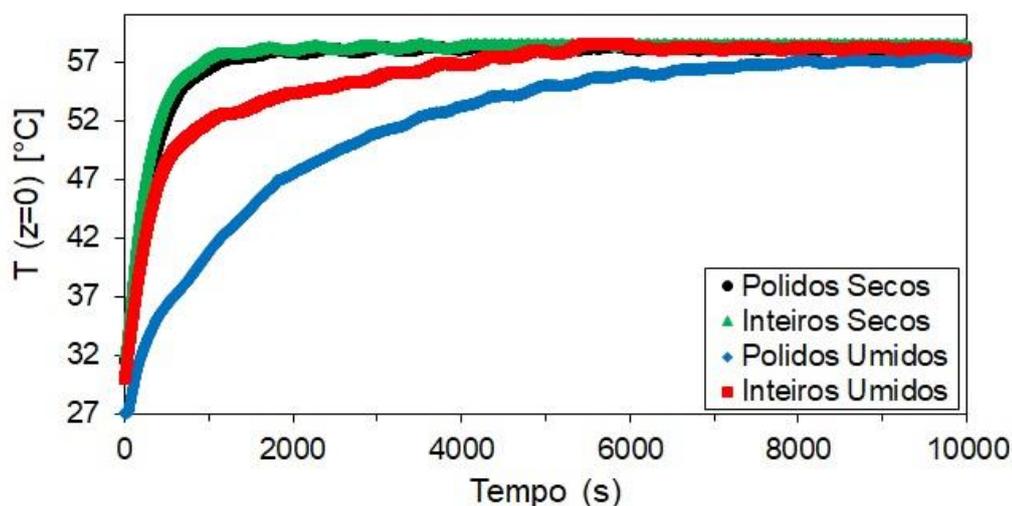
Para o leito fixo com escoamento tangencial foi medida a temperatura do centro do leito fixo (Figura 85). As temperaturas dos fluidos também foram medidas, mas estas reproduziram conforme já foi apresentado na Figura 71.

Por meio da Figura 85 pode-se constatar que as temperaturas nos centros do leito tiveram efeitos mais evidentes dos que os observados para os demais meios de transferência de calor. Isto porque, como o escoamento foi tangencial, o leito fixo se comportou como uma placa porosa e então todas as alterações nas propriedades das partículas e dos meios porosos, vistas anteriormente, influenciaram na transferência de calor.

Além disso, vimos que mesmo com as variações dos meios porosos para os grãos secos não houve variação na transferência de calor, sendo novamente os

efeitos dos filmes líquidos e difusão os principais efeitos a alterar o comportamento da temperatura dos grãos úmidos.

Figura 85 - Temperatura no centro ($z=0$) em função do tempo de imersão de leite em escoamento de ar (Fonte: Acervo Pessoal, 2018).



4.5. Transferência de massa

A transferência de massa foi analisada para os grãos inteiros e polidos por meio do adimensional de umidade (Equação 14) em função do tempo e da taxa de secagem (Equação 19) em função do adimensional de umidade médio.

$$\left(\frac{\partial X^*}{\partial t}\right)_i \cong \frac{\Delta X^*}{\Delta t} = \frac{X_{i+1} - X_i}{t_{i+1} - t_i} \quad 19$$

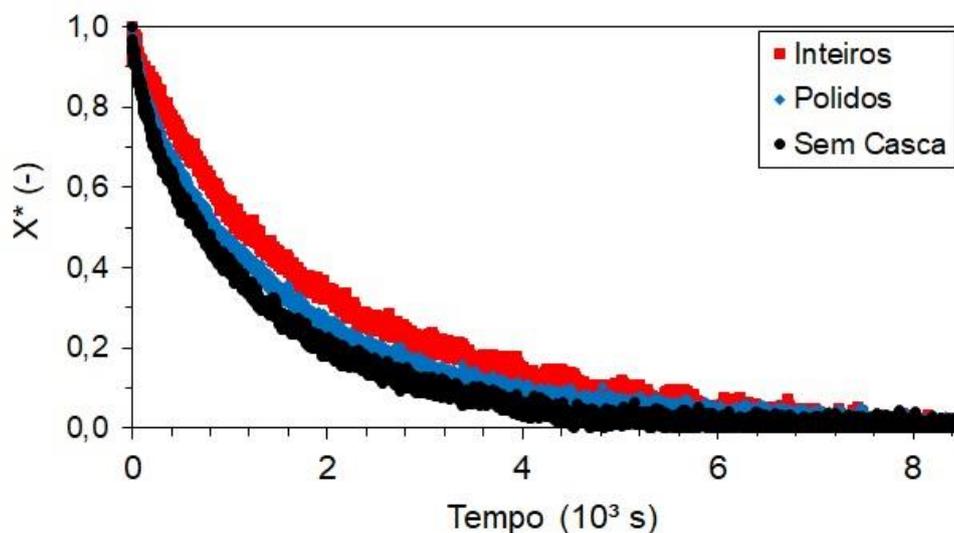
Todos os experimentos de secagem foram realizados com temperatura de ar de secagem de aproximadamente 60°C e velocidade de ar de secagem de aproximadamente 1 m/s. A velocidade do ar de secagem somente foi alterada para leite fluidizado que foi de aproximadamente 1,5 m/s, estando 50% acima da mínima fluidização tanto para grãos polidos quanto para inteiros.

4.5.1. Partícula isolada

Na Figura 86 tem-se o adimensional de umidade em função do tempo de secagem para grãos isolados submersos em escoamentos de ar.

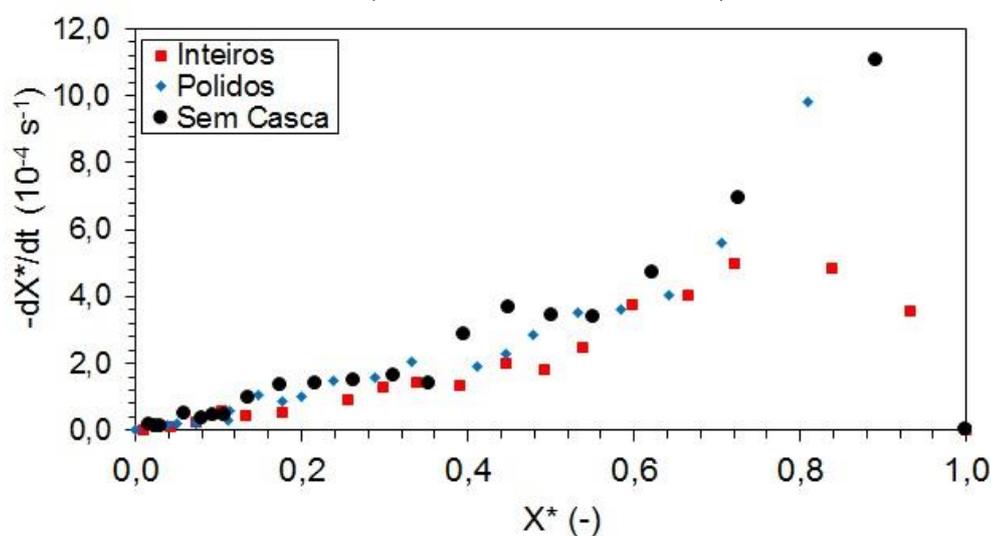
Por meio da Figura 86 observamos que há uma tendência em que os grãos polidos são mais rápidos que os grãos inteiros. E os grãos polidos representam aproximadamente a cinética de um grão descascado manualmente.

Figura 86 - Adimensional de umidade em função do tempo de imersão de grãos de cevada isolados submersos em escoamento de ar (Fonte: Acervo Pessoal, 2018).



Na Figura 87 tem-se dos dados de taxa de secagem em função da umidade para grãos de cevada isolados submersos em escoamento de ar.

Figura 87 - Taxa de secagem em função da umidade para grãos de cevada isolados em escoamento de ar (Fonte: Acervo Pessoal, 2018).



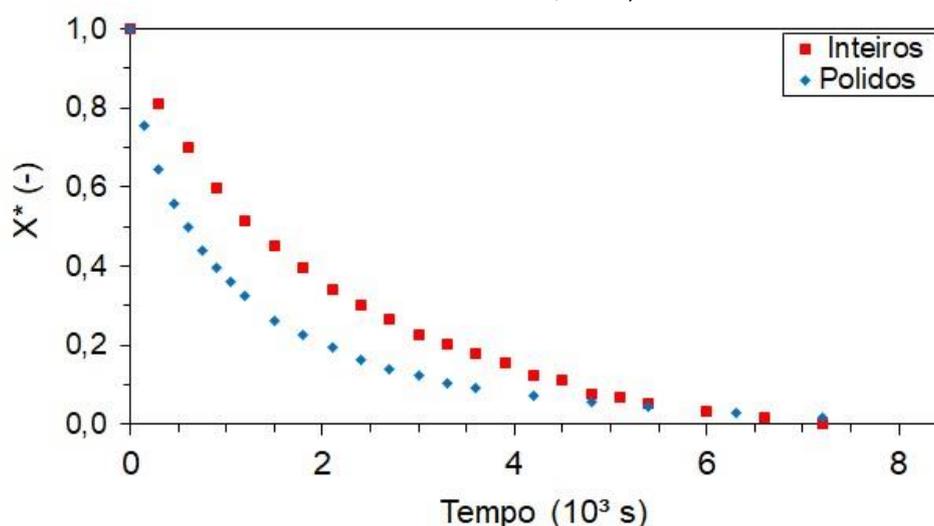
Pode-se observar, pela Figura 87, que para as maiores umidades as taxa de secagem dos grãos polidos e sem casca são maiores que a taxa de secagem dos grãos inteiros. E que as taxas de secagens de grãos polidos e sem casca são

semelhantes confirmando que os grãos polidos podem representar os efeitos da barreira à transferência de massa que os tecidos externos oferecem no grão de cevada inteiro.

4.5.2. Leito fluidizado

Na Figura 88 tem-se o adimensional de umidade em função do tempo de secagem em leito fluidizado para grãos inteiros e polido.

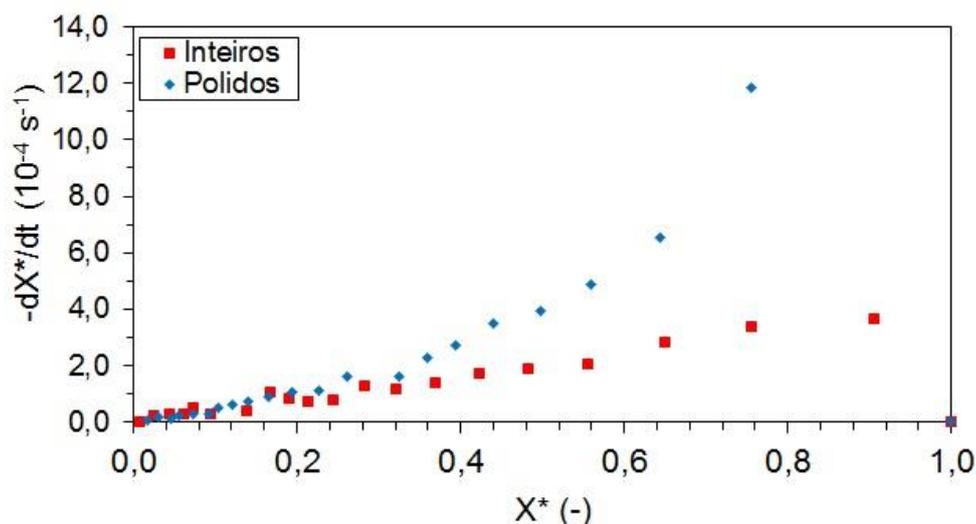
Figura 88 - Adimensional de umidade em função do tempo de secagem em leito fluidizado (Fonte: Acervo Pessoal, 2018).



Por meio da Figura 88, podemos confirmar que a cinética de secagem é mais rápida para grãos polidos. Confirmando que os tecidos externos são uma barreira à transferência de massa, o que já foi constatado por meio das cinéticas de reumidificação dinâmica (Figura 65).

Na Figura 89 estão dispostos os resultados de taxa de secagem em função do adimensional de umidade para grãos de cevada fluidizados.

Figura 89 - Taxa de secagem em função da umidade para grãos de cevada fluidizados (Fonte: Acervo Pessoal, 2018).



Se compararmos a Figura 89 com a Figura 87 podemos verificar que os valores máximos das taxas de secagens para grãos inteiros e polidos são da mesma ordem de grandeza em ambas as Figuras.

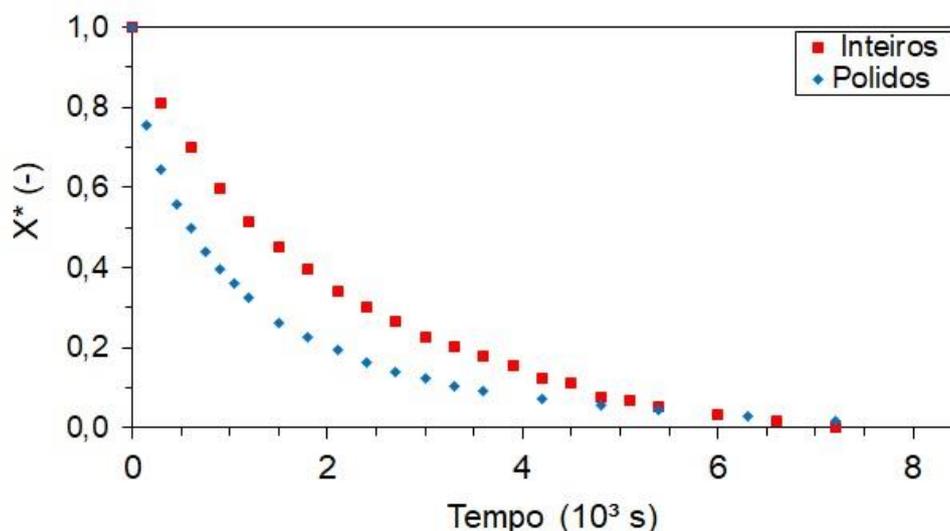
4.5.3. Leito fixo

Nos resultados anteriores foram tratados de dois meios de secagens dispersos, onde os grãos (ou partículas) tem um bom contato com o fluido. Porém, o leito fixo forma uma estrutura porosa complexa, que o ar pode percolar por seus interstícios (perpendicular) ou não percolar (tangencial).

4.5.3.1. Escoamento perpendicular

Na Figura 90 têm-se os dados do adimensional de umidade em função do tempo de secagem para leito fixo com escoamento de ar intersticial.

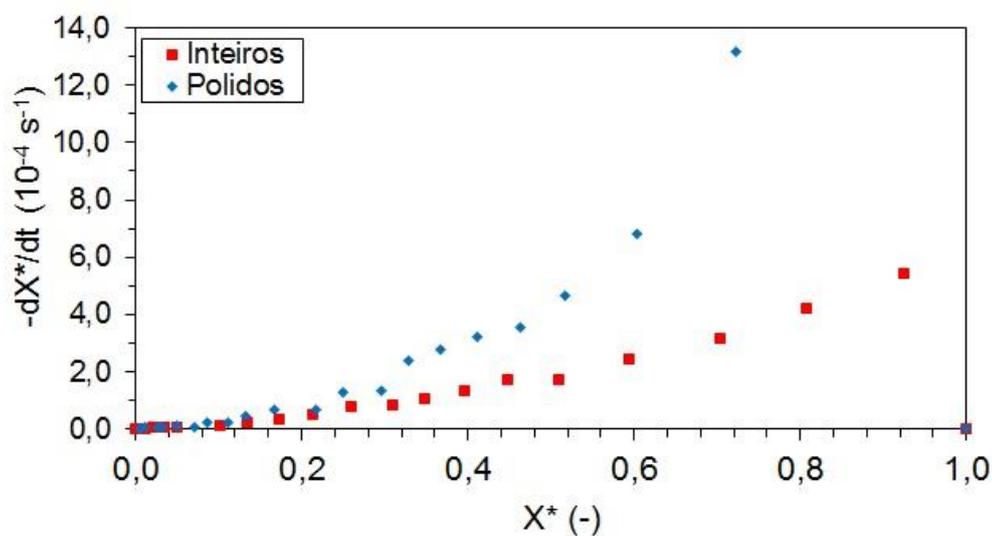
Figura 90 - Adimensional de umidade em função do tempo de secagem de grãos de cevada em leito fixo com escoamento de ar intersticial (perpendicular) (Fonte: Acervo Pessoal, 2018).



Tratando-se do efeito do polimento (ou dos tecidos externos) sobre a cinética de secagem, a Figura 90 confirma a resistência à difusão devido à presença dos tecidos externos. Porém, ainda não é possível afirmar que esse meio de secagem não tem influência da estrutura da matriz porosa formada pelos grãos.

A Figura 91 mostra a taxa de secagem em leito fixo com escoamento intersticial em função do adimensional de umidade.

Figura 91 - Taxa de secagem em função da umidade para grãos de cevada em leito fixo com escoamento de ar intersticial (perpendicular) (Fonte: Acervo Pessoal, 2018).

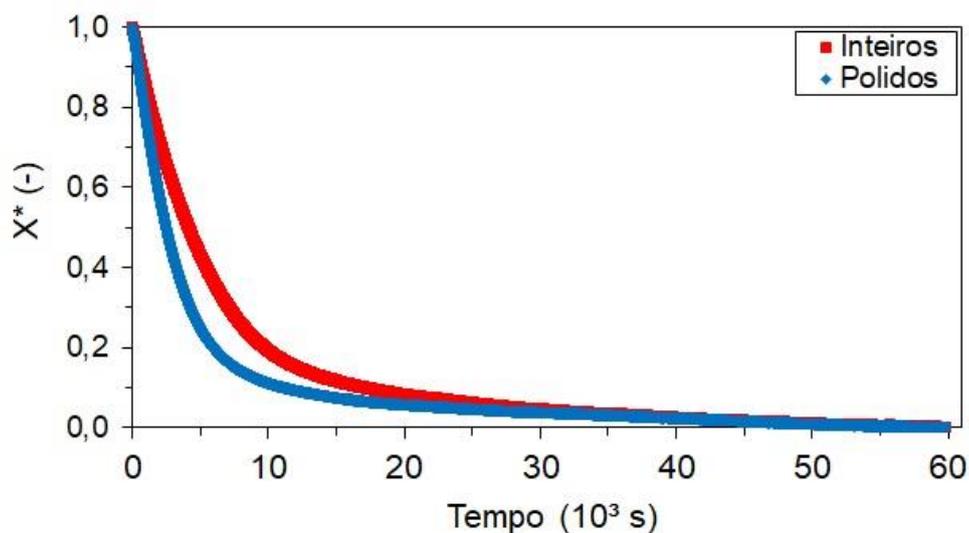


Comparando-se as magnitudes das taxas de secagens apresentadas na Figura 91 com as apresentadas na Figura 87 e Figura 89 verifica-se que estão similares.

4.5.3.2. Escoamento tangencial

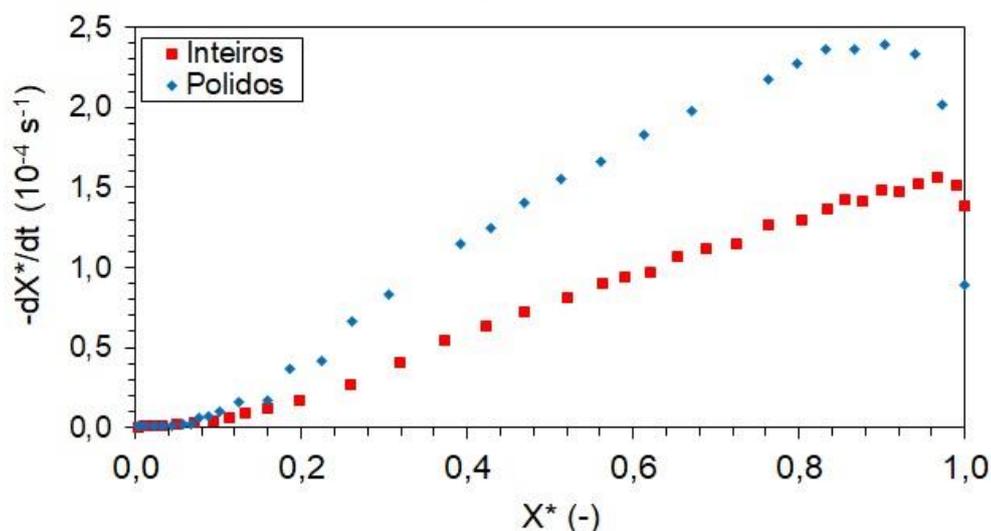
Na Figura 92 tem-se a cinética de secagem em leito fixo com escoamento tangencial, ou seja, o adimensional de umidade em função do tempo de secagem. Novamente é claro o maior decaimento da umidade dos grãos polidos em relação aos inteiros.

Figura 92 - Adimensional de umidade em função do tempo de secagem de grãos de cevada em leito fixo sem escoamento de ar intersticial (tangencial) (Fonte: Acervo Pessoal, 2018).



Na Figura 93 tem-se a taxa de secagem em função da umidade para grãos de cevada em leito fixo com escoamento tangencial.

Figura 93 - Taxa de secagem em função da umidade para grãos de cevada em leito fixo sem escoamento de ar intersticial (tangencial) (Fonte: Acervo Pessoal, 2018).



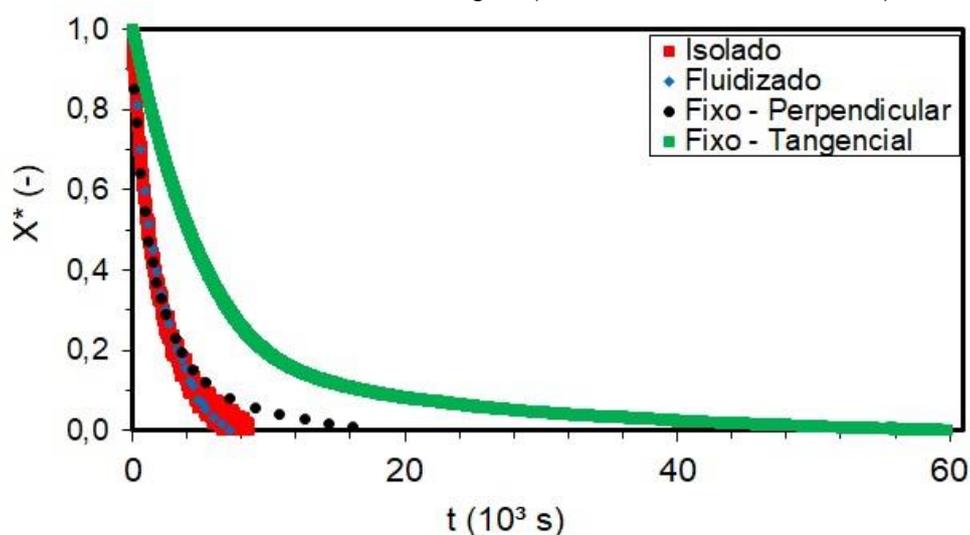
Ao comparar a magnitude das taxas de secagem para grãos inteiros e polidos na Figura 93 com as anteriormente apresentadas (Figura 87 e Figura 89). Verifica-se que a taxa de secagem para este meio de secagem é menor, onde para meios como leito fluidizado e partícula isolada submersa obtiveram taxas cerca de 6 vezes maiores.

Para avaliar os meios de secagem os dados de cinética serão comparados entre os quatro meios utilizados neste trabalho.

4.5.4. Meios de secagem

Na Figura 94 têm-se os dados do adimensional de umidade em função do tempo de secagem para grãos inteiros de cevada em diferentes meios de secagem.

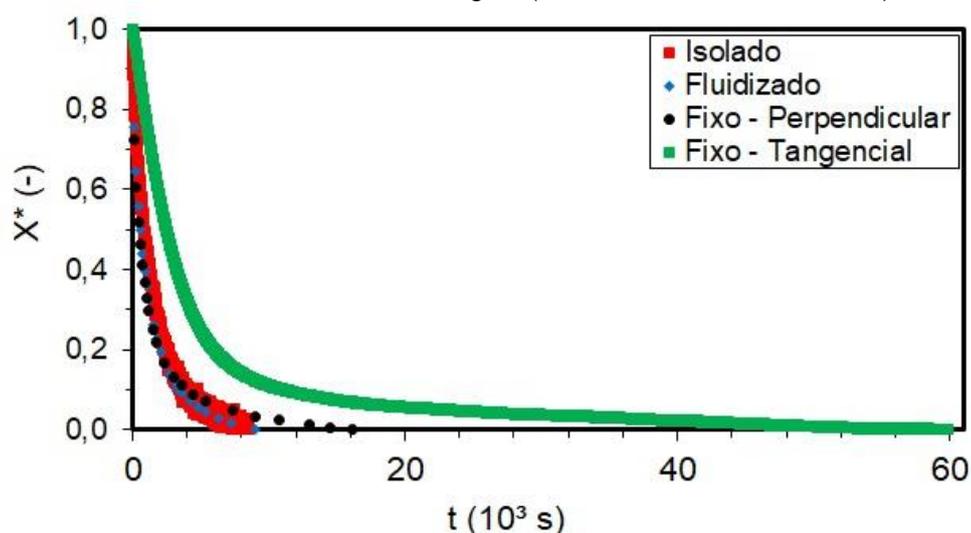
Figura 94 - Adimensional de umidade em função do tempo de secagem de grãos inteiros de cevada em diferentes meios de secagem (Fonte: Acervo Pessoal, 2018).



Na Figura 95 têm-se os dados do adimensional de umidade em função do tempo de secagem para grãos polidos comparando quatro meios de secagem com grãos isolados submersos, grãos fluidizados, em leito fixo com escoamento perpendicular e com escoamento tangencial.

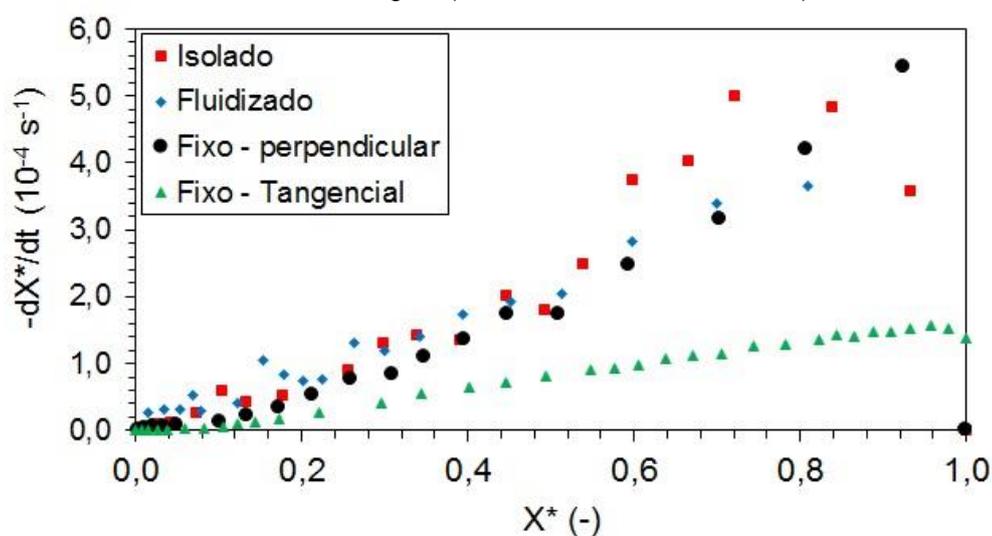
Quando se verifica a Figura 94 para grãos inteiros e a Figura 95 para grãos polidos observa-se que as variações entre os meios são muito semelhantes. Além disto, fica claro que o leito fixo com escoamento tangencial tem uma forte influência do meio poroso formado. Isto se deve, pois o ar não percola seus interstícios, tendo pouca interação entre fluido e partícula no centro do meio poroso. Tendo uma resistência a transferência de massa pela estrutura da matriz porosa formada pelos grãos de cevada.

Figura 95 - Adimensional de umidade em função do tempo de secagem de grãos polidos de cevada em diferentes meios de secagem (Fonte: Acervo Pessoal, 2018).



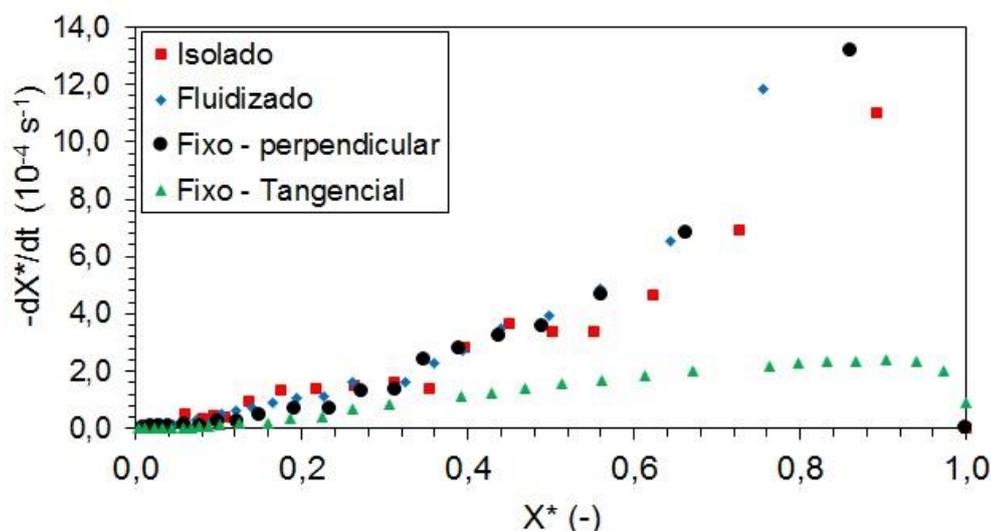
Na Figura 96 pode se ver a comparação das taxas de secagem em função do adimensional de umidade para os diferentes meios de secagem para grãos inteiros.

Figura 96 - Taxa de secagem em função da umidade para grãos inteiros de cevada em diferentes meios de secagem (Fonte: Acervo Pessoal, 2018).



A Figura 97 mostra a comparação dos resultados de taxas de secagem em função do adimensional de umidade para grãos polidos de cevada em diferentes meios de secagem.

Figura 97 - Taxa de secagem em função da umidade para grãos polidos de cevada em diferentes meios de secagem (Fonte: Acervo Pessoal, 2018).



Verificando-se as taxas de secagem para grãos polidos (Figura 97) e inteiros (Figura 96), constata-se que para partícula isolada submersa, leito fluidizado e leito fixo perpendicular houve uma boa reprodução. Desta maneira, concluindo-se que há evidências de que estas três metodologias serem suficientes para representar a cinética para grãos polidos ou inteiros de cevada. Sendo assim, podendo se dimensionar ou modelar meios de secagem mais complexos, como leito fixo espesso, com base nestas três metodologias.

Porém, era esperado que o leito fixo com escoamento tangencial tivesse a menor cinética de secagem, tendo em vista a resistência oferecida pela matriz porosa formada pelos grãos, devido ao centro do leito fixo não ter contato entre o fluido e a partícula.

Também podemos constatar que as taxas de secagem tanto para grãos polidos quanto para grãos inteiros tiveram características decrescentes, o que indica a predominância de mecanismos difusivos de transferência de massa.

5. CONCLUSÕES

Por meio destes resultados, nas condições operacionais utilizadas, pode-se concluir que:

- As adaptações do tambor rotativo para o polimento possibilitaram a retirada dos tecidos externos (pericarpo, testa, aleurona e casca);
- A fração mássica removida para a qual não há mais influência dos tecidos externos foi condizente aos relatados na literatura;
- As propriedades físicas e de transporte dos grãos ao longo do polimento podem demonstrar a resistência mecânica oferecida pelos tecidos externos;
- As variações nas propriedades físicas dos grãos influenciam no meio poroso formado e na capacidade de rearranjo das partículas no empacotamento;
- As partículas da casca são planas e muito coesivas, seu leito empacotado tem uma baixa condutividade térmica, devido a dificuldade de se aumentar o contato destas partículas;
- Os tecidos externos apresentam função de proteção, sendo uma resistência mecânica a abrasões na superfície do grão;
- Os grãos de cevada possuem poros muito grandes que absorvem o hexano, sendo necessária a obstrução destes poros, para a determinação da massa específica aparente;
- O polimento pode aumentar cerca de 10% da massa específica do leito de grãos de cevada com uma remoção de fração mássica menor que 5%;
- As propriedades físicas e de transporte dos grãos de cevada são complexas e são influenciadas pela umidade e polimento;
- A homogeneidade da umidade no grão influencia sobre a retratibilidade e os tecidos externos influenciam sobre a homogeneidade da umidade;
- Os tecidos externos ao endosperma são uma barreira à transferência de massa durante secagem e durante a reumidificação;
- A transferência de calor não é influenciada pelos tecidos externos ao endosperma para grãos secos;

- Como a difusão interna do grão polido é maior do que para inteiro, há uma maior manutenção do filme líquido superficial, que influencia na transferência de calor;
- Nas condições operacionais estudadas, os meios de secagem de partícula isolada submersa, leito fluidizado e leito fixo com escoamento intersticial tiveram cinéticas de secagem semelhantes tanto para grãos polidos como inteiros;
- As caracterizações realizadas neste trabalho fornecem parâmetros para projetos de equipamentos e processos nas indústrias alimentícias, e
- Além de ser possível a compreensão dos mecanismos dos fenômenos de transferências internas dos grãos de cevada.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com base nos resultados obtidos e nas análises realizadas neste trabalho, ficam como sugestões para trabalhos futuros:

Comparação das caracterizações das propriedades físicas e de transportes dos grãos polidos pelo tambor rotativo com os de proveniência comercial;

Avaliação da qualidade fisiológica ao longo do polimento e quantificação de componentes químicos importantes para indústria alimentícia;

Avaliação dos mecanismos de polimentos em tambor rotativo, verificando condições operacionais otimizadas e materiais com diferentes propriedades de fluxo (escoabilidade de sólidos);

Modelar os dados experimentais e verificar as influências dos meios de secagem e da anatomia nos adimensionais de transporte;

Simulação computacional das interações entre partículas e entre partículas e fluido para os diferentes grãos de cevada obtidos por polimento;

Avaliação da estrutura dos grãos por meio de microscopia de lâminas das seções dos grãos polidos, e

Medidas de superfície e de interação de superfície com o polimento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLEN, Terence. **Particle Size Measurement**. 5. ed. London: Chapman & Hall, 1997. Não paginado (Powder technology series).

ARENDRT, E. K.; ZANNINI, E. **Cereal Grains for the Food and Beverage Industries**. Philadelphia: Woodhead Publishing, 2013. 485 p.

ARINZE, E. A. et al. Control strategies for low temperature In-bin drying of barley for feed and malt. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 58, p. 73–88, 1994.

ASTM standard C914-95., 2004, Standard Test Method for Bulk Density and Volume of Solid Refractories by Wax Immersion, ASTM International, West Conshohocken. <https://doi.org/10.1520/C0914-95R04>.

BAIK, B. K.; ULLRICH, S. E. Barley for food: Characteristics, improvement, and renewed interest. **Journal of Cereal Science**, v. 48, p. 233–242, 2008.

BOYCE, D. S. Grain moisture and temperature changes with position and time during through drying. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 10, p. 333–341, 1965.

BROOKER, D.B.; BAKKER-ARKEMA, F. W.; HALL, C.W. **Drying and storage of grains and oilseeds**. New York: An Avi, c1992, p. 450.

BROOKES, P. A.; LOVETT, D. A.; MACWILLIAM, I. C. The steeping of barley. A review of the metabolic consequences of water uptake, and their practical implications. **Journal of the Institute of Brewing**, v. 82, p. 14–26, 1976.

BRUCE, D. M. Exposed-layer barley drying: Three models fitted to new data up to 150°C. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 32, n. April 1984, p. 337–348, 1985.

CASSANDRE, J. E.; MOREIRA, M. F. P.; SARTORI, D. J. M. (2001) **Desenvolvimento de um secador de convecção forçada com reciclo de ar**, 2001, Belo Horizonte. Anais do III COBEQ-IC. UFMG, 1999. v. 1. p. 1-4.

CARSLAW, H. S.; JAEGER, J. C. **Conduction of heat in solids**. 5. ed. Londres: Clarendon Press, 1959. p. 517.

CARVALHO, N. M.; NAKAGAWA, J. **Sementes: ciência, tecnologia e produção**. Campinas: Fundação Cargil, 1980. p. 326

COZZOLINO, D.; ROUMELIOTIS, S.; EGLINTON, J. Monitoring water uptake in whole barley (*Hordeum vulgare* L.) grain during steeping using near infrared

reflectance spectroscopy. **Journal of Food Engineering**, v. 114, n. 4, p. 545–549, 2013.

DAVIES, N. L. Use of X-ray microanalysis to study hydration patterns in barley. **Journal of Cereal Science**, v. 14, n. 1, p. 85–94, 1991.

DAVIES, N. L. A new malting index: prediction of malting quality by endosperm hydration. **Journal of the Institute Brewing**, v. 98, p. 43–46, 1992.

DORNEZ, E. et al. Study of grain cell wall structures by microscopic analysis with four different staining techniques. **Journal of Cereal Science**, v. 54, p. 363–373, 2011.

FARKAS, I.; REMÉNYI, P.; BIRÓ, A. A neural network topology for modelling grain drying. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 26, p. 147–158, 2000a.

FARKAS, I.; REMÉNYI, P.; BIRÓ, A. Modelling aspects of grain drying with a neural network. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 29, p. 99–113, 2000b.

FELIZARDO, M. P. **Caracterização física e de secagem de sementes de Embaúba (Cecropia glaziovii Snethlage)**. 2014. 88p. (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2014.

GAMEL, T. H.; ABDEL-AAL, E. M. Phenolic acids and antioxidant properties of barley wholegrain and pearling fractions. **Agricultural and food science**, v. 21, p. 118-131, 2012.

GERMAN, R. M. **Particle packing characteristics**. Princeton: Metal Powder Industries Federation, 1989. 443 p.

GHOSH, P. K.; JAYAS, D. S.; GRUWEL, M. L. H. Measurement of Water Diffusivities in Barley Components Using Diffusion Weighted Imaging and Validation with a Drying Model. **Drying Technology**, v. 27, p. 382–392, 2009.

GRAY, D. et al. Differences in viscosity and textural properties of selected barley cultivars as influenced by pearling and cooking. **Food Chemistry**, v. 120, p. 402-409, 2010.

HAZARIKA, M. K.; DATTA, A. K. Estimation of drying rate constant from static bed moisture profile by neural network inversion. v. 16, n. 1, p. 253–264, 2014.

HENRY, R. J. The Carbohydrates of Barley Grains - A Review. **Journal of The Institute of Brewing**, v. 94, p. 71–78, 1988.

INCROPERA, F. P.; DeWITT, D. P. **Fundamentos de transferência de calor e de massa**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2003. 698 p

JÄÄSKELÄINEN, A. S. et al. Endosperm and aleurone cell structure in barley and wheat as studied by optical and Raman microscopy. **Journal of Cereal Science**, v. 57, p. 543–550, 2013.

JAYAS, D. S.; SOKHANSANJ, S. Thin-layer drying of barley at low temperatures. n. September 1988, p. 21–23, 1989.

JÍLEK, J. Critical temperature for barley drying. **Drying Technology**, v. 11, n. 1, p. 1993, 1993.

KIRSOP, B. H.; REYNOLDS, T.; GRIFFITHS, C. . M. The distribution of water in germinating barley. **Journal of the Institute of Brewing**, v. 73, p. 182–186, 1967.

LIMA, R. de A. B. **Fluidodinâmica de leitos fluidizados e vibrofluidizados operando com partículas planas**. 2009. 150p. Dissertação (Mestrado Engenharia Química) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2009.

MANDAS, N.; HABTE, M. Numerical Simulation Static-Bed Drying of Barely. **Biosystems Engineering**, v. 82, p. 313–319, 2002.

MARKOWSKI, M. et al. Drying Characteristics of Barley Grain Dried in a Spouted-Bed and Combined IR-Convection Dryers. **Drying Technology**, v. 25, p. 1621–1632, 2007.

MARKOWSKI, M.; BIAŁOBRZEWSKI, I.; MODRZEWSKA, A. Kinetics of spouted-bed drying of barley: Diffusivities for sphere and ellipsoid. **Journal of Food Engineering**, v. 96, n. 3, p. 380–387, 2010.

MASSARANI, G. **Aspectos da fluidodinâmica em meios porosos**. Rio de Janeiro: Revista Brasileira de Engenharia, 1989. 96 p.

MASSARANI, G.; PEÇANHA, R. P. Dimensão característica e forma de partículas. In: ENCONTRO SOBRE ESCOAMENTO EM MEIOS POROSOS , 14., 1988, **Anais...** Campinas: Universidade Estadual de Campinas, 1988. p. 302 - 312.

MATA, M. E. R. M. C.; DUARTE, M. E. M. Porosidade intergranular de produtos agrícolas. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, PB, v. 4, n. 1, p. 79-93, 2002.

MAYOLLE, J. E. et al. Water diffusion and enzyme activities during malting of barley grains: A relationship assesment. **Journal of Food Engineering**, v. 109, p. 358–365, 2012.

MONTANUCI, F. D. et al. Experimental analysis and finite element simulation of the hydration process of barley grains. **Journal of Food Engineering**, v. 131, p. 44–49, 2014.

MOHSENIN, N. N. **Physical Properties of plant and animal materials: structure, physical characteristics and mechanical properties**. New York: Gordon and Breach Scientific Publishers, 1970, p. 734.

O'CALLAGHAN, J. R.; MENZIES, D. J.; BAILEY, P. H. Digital simulation of agricultural drier performance. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 16, p. 223–244, 1971.

PERAZZINI, H. **Secagem de sólidos porosos granulares**. 2014. 190p. (Doutorado em Engenharia Química) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2014.

REYNOLDS, T.; MACWILLIAM, I. C. Water Uptake and Enzymic Activity During Steeping of Barley. **Journal of the Institute of Brewing**, v. 72, p. 166–170, 1966.

SANTOS, I. J. DOS; COUTO, S. M.; ANDRADE, E. T. DE. CINÉTICA DE SECAGEM EM CAMADA FINA DO MALTE VERDE DE CEVADA. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, p. 53–59, 2001.

SHIMODA, M. et al. CHARACTERISTICS OF WATER UPTAKE OF AUSTRALIAN POLISHED BARLEY IN SHOCHU-MAKING. **Journal of the Institute of Brewing**, v. 104, p. 33–35, 1998.

SMITH, E. A. Minimum energy to dry barley without mould growth in near ambient driers. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 30, n. April, p. 289–303, 1984.

SOLOGUBIK, C. A. et al. Effect of moisture content on some physical properties of barley. **Industrial Crops and Products**, v. 43, p. 762–767, 2013.

SÝKOROVÁ, A. et al. Size distribution of barley Kernels. **Czech Journal Food Science**, v. 4, p. 249–258, 2009.

TARR, A.; DIEPEVEEN, D.; APPELS, R. Spectroscopic and chemical fingerprints in malted barley. **Journal of Cereal Science**, v. 56, p. 269–275, 2012.

TAVAKOLI, M. et al. Moisture-dependent physical properties of barley grains. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering**, v. 2, n. 4, p. 84–91, 2009.

WALKER, C. K.; PANOZZO, J. F. Measuring volume and density of a barley grain using ellipsoid approximation from a 2-D digital image. **Journal of Cereal Science**, v. 55, p. 61–68, 2012.

WALTON, W. H. Feret 's Statistical Diameter as a Measure of Particle Size. **Nature**, v. 162, n. 4113, p. 329–330, 1948.

ZOTIN, M. F. **O efeito de parede em colunas de recheio**. 1985. 85 p. (Doutorado em Engenharia Química) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 1985.