

ESTIMATIVA DOS EFEITOS DOS TECIDOS DE PROTEÇÃO DOS GRÃOS DE CEVADA NO PROCESSO DIFUSIVO

MARCOS P. FELIZARDO^{1*}, GUSTAVO D. MAIA², FABIO B. FREIRE², JOSÉ T. FREIRE²

¹Instituto Federal de Minas Gerais, Departamento de Mecânica, Campus Congonhas

²Universidade Federal de São Carlos, Departamento de Engenharia Química, Campus São Carlos

*e-mail: marcos.felizardo@ifmg.edu.br

RESUMO - O processo de malteação envolve a absorção de água até o início das atividades fisiológicas dos grãos de cevada. Esse processo de transferência de umidade tem efeito de diversos fatores, como a morfologia dos grãos e a atividades metabólicas. Assim, o objetivo deste trabalho foi a modelagem dos efeitos das diferentes camadas dos grãos de cevada no processo de hidratação. Para isso foram realizados diferentes níveis de polimentos de grãos, que foram hidratados por imersão em água a temperatura de 25°C, as cinéticas de absorção de água foram modeladas pela solução analítica da analogia da Lei de Fick e então foram estimadas resistências para as diferentes camadas utilizando a analogia da Lei de Ohm. Verificou-se que o pericarpo e a testa são tecidos com alta resistência a transferência de massa quando comparado aos demais tecidos, com valor de cerca de 4.30×10^9 s/m.

INTRODUÇÃO

O processo de hidratação dos grãos de cevada inicia atividades fisiológicas, que são importantes para processos como malteação e germinação (Carvalho et al.; 2018; Cu et al.; 2015; MacLeod, 1967).

Segundo Brookes et al. (1976), este processo de absorção de água dos grãos de cevada apresenta três fases, a primeira fase trata-se de um período com mecanismos físicos, o qual a concentração de água nos grãos aumenta, na segunda fase inicia-se a conversão do amido em açúcar, nesta etapa a absorção de água diminui e volta a aumentar na terceira fase, etapa em que se inicia a formação de tecidos. De acordo Miano & Augusto (2018) estas três fases ocorrem apenas para sementes com atividade fisiológica ativa, sendo que a segunda e a terceira fase trata-se de mecanismos metabólicos para a germinação das sementes.

Desta forma, a absorção de água é influenciada pelas atividades fisiológicas das sementes, estas que são compostas por tecidos

com diferentes composições químicas e características fisiológicas e morfológicas. Assim, a absorção não é homogênea no volume das sementes, isto foi constatado por Reynolds & MacWilliam (1966), que avaliaram a absorção de cada parte das sementes separadamente, e observaram que há uma alta taxa de absorção de água no início da umidificação pelo embrião e casca, seguidas pelo escutelo e então endosperma. Durante a umidificação há uma resistência à transferência de umidade dos tecidos de proteção (pericarpo, testa e aleurona) para o núcleo (endosperma e embrião).

Assim Kirsop et al. (1966) mostrou que inicialmente a água entra pelos espaços vazios e então nas próximas duas horas a água é transferida dos espaços vazios para o embrião. Após isto, inicia-se a transferência da umidade presente no endosperma para o embrião.

Davies (1991) utilizou a técnica de raio-x para a análise dos padrões de hidratação das sementes de cevada, constatando que a absorção de água ocorre principalmente pela região ventral próxima ao embrião. Com base nestes resultados, Davies (1992) propôs um

novo índice de qualidade de malte a partir da verificação por raio-x de altos valores de conteúdo de umidade na região ventral próxima ao embrião. Neste mesmo segmento, Alvarez et al.. (2020) utilizaram azul de metileno como traçador de água nas sementes de cevada, apresentando observações experimentais sobre as distribuições de umidade em diferentes níveis de processo de hidratação.

Mayolle et al.. (2012) utilizaram cinéticas de umidificação e observando a umidade em base úmida em função do tempo para a semente inteira e para o endosperma isolado, verificaram que a umidificação do endosperma ocorreu em um período menor 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. Com diferentes níveis de polimento, Mok et al.. (1983) mostraram que a energia de ativação, associada a transferência de massa no processo de hidratação dos grãos de cevada e calculada pela analogia da Lei de Arrhenius, aumentou para o grão inteiro quando comparado ao grão polido. Shimoda et al.. (1998) realizaram a hidratação de grãos de cevada polidos, com uma fração de massa removida de 70%, e observaram que estes grãos tiveram uma cinética de absorção de água muito rápida, aumentando o conteúdo de umidade em base úmida de 10% para 60% em um intervalo de 300 min.

Cozzolino et al.. (2013) complementaram estes estudos, afirmando que as características relacionadas à composição química das paredes das células, como o grau de polimerização, também influenciam neste processo de transferência de massa. Isto indica que as estruturas morfológicas têm efeito na umidificação, mas também a composição das paredes das células vegetais. Complementar a isso, Cozzolino et al.. (2014) afirma que as características dos grãos de proteínas e do amido presente no endosperma podem ter influência sobre a absorção de água pelos grãos de cevada. Continuando essa linha de estudo, Cozzolino et al.. (2014b) mostraram que os ácidos graxos também podem influenciar o controle de absorção de água no endosperma.

Cu et al.. (2015) constatou que a absorção de água pode ser controlada geneticamente, sendo possível implementar variações genéticas que possibilitem uma adequação deste material para indústria.

Junto a esta evolução dos estudos das características químicas, fisiológicas e anatômicas dos grãos de cevadas em relação a absorção de água, também se evoluíram os processos de hidratação e sua modelagem matemática.

Diversos autores fizeram avaliações dos efeitos da intermitência e do ultrassom no processo de malteação, obtendo que estas técnicas são promissoras, pois aumentam a velocidade de hidratação e não afetam a qualidade do malte (Alvarez et al.; 2020; Borsato et al.; 2019b; Carvalho et al.; 2018; A. C. Miano et al.; 2015).

Para a modelagem da hidratação de grãos foram utilizados tanto Equações semiempíricas e empíricas quanto equações diferenciais de transferência de massa e modelos difusionais e termodinâmicos (Basunia, 2013; Basunia & Abe, 2005; Borsato et al.; 2019a; Montanuci, 2013; Montanuci et al.; 2014, 2015).

Porém, ao longo desse desenvolvimento de conhecimento, não foi apresentado uma modelagem que unisse a modelagem matemática e as heterogeneidades morfológicas dos grãos de cevada. Assim, o objetivo deste trabalho foi a modelagem e avaliação dos efeitos das diferentes camadas dos grãos de cevada no processo hidratação.

MATERIAIS E MÉTODOS

Obtenção e Armazenamento dos Grãos

Os grãos de cevada (BR ELIS) foram cultivados na região Sul do Brasil, e foram doados pela Agromalte.

Descascamento e caracterização dos grãos

O processo de descascamento dos grãos de cevada foi realizado conforme descrito em Felizardo & Freire (2018), assim se estabeleceu frações mássicas removidas que possibilitaram verificar o efeito das diferentes camadas.

Segundo Felizardo & Freire (2018) com 25% de fração removida (Y) foram retirados os tecidos de proteção dos grãos de cevada, ou seja, o endosperma foi isolado. Então, foram

analisados grãos com 6 estágios de polimento e grãos inteiros ($Y=0\%$), sendo que dois estágios de polimento com $Y > 25\%$ para avaliar as camadas do endosperma. Para avaliar os diferentes tecidos de proteção, foram avaliados grãos inteiros e grãos em quatro estágios de polimento ($Y < 25\%$).

As larguras dos grãos foram determinadas por análise de imagem no software Image-Pro Plus® e as espessuras foram medidas por paquímetro (precisão de 0.01 mm). Tendo em vista que o grão foi aproximado para uma geometria cilíndrica, o raio do cilindro equivalente (R_{eq}) foi obtido pela média aritmética entre largura e espessura.

Absorção de água

Os experimentos de hidratação foram realizados em thermostatic orbital shaker (Tecnal, TE 420), com controle de temperatura e rotação. A temperatura foi de 25°C e rotação de 210 RPM. Aproximadamente 5 g de grãos foram imersos em 120 mL de água destilada, as medidas de massa ao longo do tempo foram realizadas em balança analítica de 0.1 mg de precisão (AND, FR200), para isso antes da pesagem, o excesso de água na superfície dos grãos foi removido com papel toalha. Todos os experimentos foram realizados com três repetições.

A rotação foi estabelecida em testes preliminares, que permitiram visualizar a mistura das partículas com a água e a temperatura foi a menor possível de ser controlada no equipamento.

Ao final deste processo, a massa seca da amostra era determinada após secagem em estufa (MARCONI, MA033/1) em temperatura de $(105 \pm 3)^{\circ}\text{C}$ por 24 hours. Assim, sendo possível estimar o conteúdo de umidade em base seca.

A absorção de água foi analisada na sua primeira fase, que corresponde ao período físico da transferência de umidade (Brookes et al.; 1976; Alberto Claudio Miano & Augusto, 2018), ou seja, o processo foi feito até que a umidade ficasse aproximadamente constante em um intervalo de 45 minutos (m_0). Segundo dados de Montanuci et al. (2014) isso ocorreu em aproximadamente 0,60 (base seca) de conteúdo de umidade para a temperatura de 25°C .

Modelagem matemática

Para a realização da modelagem da cinética de absorção de água pelos grãos de cevadas foram usadas hipóteses para as quais exigiram alguns cuidados experimentais, como descritas a seguir.

- Devido a agitação da água inferiu-se que a resistência externa era desprezível ($B_{im} \rightarrow \infty$), assim o conteúdo de umidade na superfície chega ao equilíbrio dinâmico nos primeiros instantes;
- Inicialmente, o conteúdo de umidade é uniforme em todo o volume do grão, antes do procedimento foi realizado a estabilização da amostra na temperatura de 25°C por 2 horas;
- Processo isotérmico, com temperatura controlada;
- A água no interior dos grãos está na fase líquida, favorecido pela baixa temperatura e imersão na fase líquida;
- A geometria dos grãos de cevada pode ser aproximada para um cilindro e a difusão de umidade foram predominantemente radial (unidirecional), tendo em vista que as maiores variações de tamanho foram na seção transversal quando estas são comparadas as variações na seção longitudinal durante o processo de polimento dos grãos (Felizardo & Freire, 2018);
- O grão de cevada pode ser aproximado a um meio poroso isotrópico, esta hipótese é comum para materiais biológicos, como pode ser visto em Batista et al. (2007), Faggion et al. (2016), Miano & Augusto (2018) and Montanuci, Jorge, et al. (2014).
- Difusividade efetiva de umidade constante ao longo do tempo de processo (Alvarez et al.; 2020; Alberto Claudio Miano & Augusto, 2018; Montanuci et al.; 2015)

Difusividade efetiva de umidade

A partir das hipóteses, tem-se a analogia da Lei de Fick para coordenadas cilíndricas pela Equação 1 conforme Crank (1975).

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

A Equação 1 trata do adimensional de umidade (X_r^*), que foi calculado utilizando o conteúdo de umidade em base seca no tempo t (X), umidade de equilíbrio dinâmico (X_{eq}) e umidade inicial (X_0).

Condição inicial na Equação 2:

$$X_r^* (r,t) \Big|_{t=0} = 1, (0 < r < R_{\text{eq}}) \quad (2)$$

As condições de contorno nas Equações 3 e 4.

$$\lim_{r \rightarrow 0} X_r^* (r,t) = X_{\text{eq}}, (t > 0) \quad (3)$$

$$X_r^* (R_{\text{eq}},t) = 0, (t > 0) \quad (4)$$

Crank (1975) desenvolve uma solução matemática, partindo das hipóteses, condições de contorno e inicial apresentadas. A partir disto, foi obtida uma solução, dada na Equação 5, que trata o adimensional de umidade como médio (\bar{X}^*) no volume da matriz sólida, o qual é calculado utilizando o conteúdo de umidade em base seca médio (\bar{X}), obtido experimentalmente.

$$\bar{X}^* (t) = 4 \cdot \sum_{i=1}^{\infty} \left(\frac{1}{\gamma_i} \right)^2 \cdot \exp \left[-\gamma_i^2 \cdot \frac{D_{\text{eff}} \cdot t}{R_{\text{eq}}^2} \right] \quad (5)$$

onde i são o número de termos da somatória, que também representa as i raízes da função Bessel de primeira espécie e ordem zero (γ_i) conforme Equação 6, a qual pode ser escrita segundo a outra raiz (α_i) e o raio do cilindro equivalente da partícula (R_{eq}) como pode ser visto na Equação 7.

$$J_0(\gamma_i) = 0 \quad (6)$$

$$\gamma_i = R_{\text{eq}} \cdot \alpha_i \quad (7)$$

Assim pelo ajuste da Equação 5 foi estimado a difusividade efetiva de umidade para cada estágio de polimento. A qualidade deste ajuste foi avaliada utilizando o coeficiente de determinação (R^2) e o teste do qui-quadrado (χ^2).

O objetivo foi ajustar obtendo o coeficiente de determinação mais próximo de um e o menor valor de qui-quadrado (Faggion et al.; 2016; Perazzini et al.; 2013).

Resistência a transferência de massa

Na Figura 1 tem-se a representação global da seção transversal do grão de cevada com a analogia da Lei de Ohm, onde cada camada tem uma resistência a transferência de massa. Assim, experimentalmente não tem como se medir a resistência em cada camada, porém para cada raio tem-se um grão com uma fração de polimento, sendo que podemos ter n polimentos, que geram n partículas com n diferentes raios. Sendo que o grão inteiro tem raio n (r_n) e o núcleo tem raio 0 (r_0).

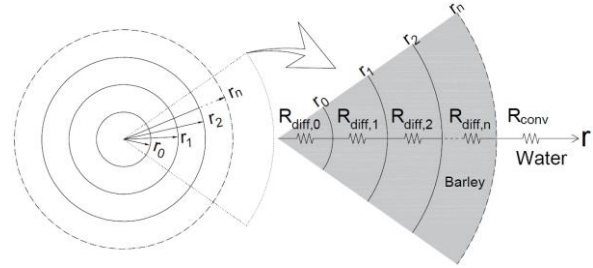


Figura 1: Representação de n camadas na seção transversal do grão de cevada.

A partir desta análise, pode-se representar a seção transversal do núcleo do grão de cevada, como na Figura 2.

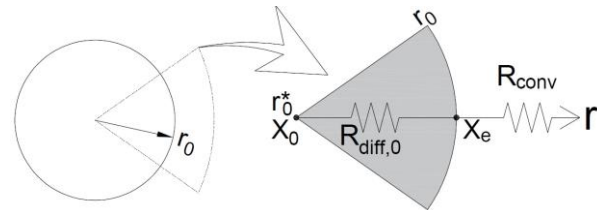


Figura 2: Representação do núcleo do grão de cevada.

A partir deste sistema de resistência em série da Figura 2, uma modelagem considerando a transferência de massa em regime permanente foi desenvolvida baseada em Martynenko (2006).

Assim, a taxa de transferência de massa que sai do núcleo ($\dot{m}_{\text{out},0}$) pode ser escrita pela Equação 8.

$$\dot{m}_{\text{out},0} = -D_{\text{eff},0} \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \cdot L \cdot \rho \cdot \frac{dX}{dr} \quad (8)$$

A taxa de transferência na saída do núcleo é produto de uma camada que está entre r_0^* e r_0 , sendo que r_0^* são tão pequeno, que a espessura desta camada, é aproximadamente r_0 , como representado na Figura 2.

Assumiu-se que a massa específica do grão seco (ρ) não muda com o raio do grão, o

que é uma hipótese razoável, pois para Felizardo & Freire (2018) esta variação foi menor que 8%.

Assim, supondo que a resistência convectiva é muito menor do que a resistência difusiva, tem-se as condições de contorno nas Equações 9 e 10.

$$X(r=r_0^*,t)=X_0 \text{ em que } r_0^* \rightarrow 0 \quad (9)$$

$$X(r=r_0,t)=X_e \quad (10)$$

A partir destas informações, podemos integrar a Equação 8, obtendo a Equação 11(11).

$$\dot{m}_{out,0} = - \frac{D_{eff,0} \cdot 2 \cdot \pi \cdot L}{\ln\left(\frac{r_0}{r_0^*}\right)} \cdot \rho \cdot (X_e - X_0) \quad (11)$$

Desta forma, assumindo que não há acúmulo nesta camada, podemos escrever o fluxo de massa na entrada da camada na Equação 12.

$$J_{in,0} = - \frac{D_{eff,0}}{r_0 \cdot \ln\left(\frac{r_0}{r_0^*}\right)} \cdot \rho \cdot (X_e - X_0) \quad (12)$$

Assim, através da analogia da Lei de Ohm, tem-se que a resistência difusiva na camada do núcleo é dada pela Equação 13(13).

$$R_{diff,0} = \frac{r_0 \cdot \ln\left(\frac{r_0}{r_0^*}\right)}{D_{eff,0}} \quad (13)$$

A mesma análise pode ser aplicada para o grão de cevada com raio r_1 , conforme a Figura 3.

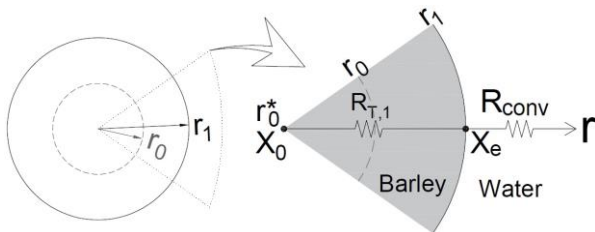


Figura 3: Representação do grão de cevada com raio r_1 .

Para esta situação, verifica-se que há uma camada entre r_0^* e r_1 , para a qual a difusividade efetiva de umidade foi tratada como total ($D_{eff,T-1}$), pois inclui efeitos da difusão da camada 1 e do núcleo, esta difusividade trata-se do parâmetro obtido do ajuste da Equação 5. Assim, o termo de resistência a transferência de

massa também é total ($R_{T,1}$). Da mesma maneira que foi realizado para o núcleo, através dos balanços da massa, integrações e da analogia a Lei de Ohm, obtém-se a Equação 14.

$$R_{T,1} = \frac{r_1 \cdot \ln\left(\frac{r_1}{r_0^*}\right)}{D_{eff,T-1}} \quad (14)$$

Que também pode ser escrita como a soma das resistências difusivas do núcleo ($R_{diff,0}$) e da camada 1 ($R_{diff,1}$), conforme Equação 15.

$$R_{T,1} = R_{diff,0} + R_{diff,1} = \frac{r_0 \cdot \ln\left(\frac{r_0}{r_0^*}\right)}{D_{eff,0}} + \frac{r_1 \cdot \ln\left(\frac{r_1}{r_0}\right)}{D_{eff,1}} \quad (15)$$

Assim, na Equação 16(16), tem-se a generalização para um sistema com n camadas, como o apresentado na Figura 1. Por essa equação verifica-se que a resistência difusiva em cada camada ($R_{diff,0}, R_{diff,1}, \dots, R_{diff,n}$) pode ser estimada conhecendo a resistência total no grão em cada nível de polimento ($R_{T,n}$).

$$R_{T,n} = R_{diff,0} + R_{diff,1} + \dots + R_{diff,n} = \frac{r_0 \cdot \ln\left(\frac{r_0}{r_0^*}\right)}{D_{eff,0}} + \frac{r_0 \cdot \ln\left(\frac{r_1}{r_0}\right)}{D_{eff,1}} + \dots + \frac{r_n \cdot \ln\left(\frac{r_n}{r_{n-1}}\right)}{D_{eff,n}} \quad (16)$$

Assim, a partir desta generalização, a difusividade efetiva de umidade na camada n qualquer, pode ser estimada pela Equação 17(17).

$$D_{eff,n} = \frac{r_n \cdot \ln\left(\frac{r_n}{r_{n-1}}\right)}{R_{diff,n}} \quad (17)$$

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Raio do cilindro equivalente

Quando avaliamos a Figura 4 pode-se constatar que no intervalo observado, o raio equivalente em função da fração de massa removida pode ser descrita por uma função linear, que foi ajustada conforme o método dos mínimos quadrados. Para esta função o coeficiente angular foi de -1.07×10^{-2} mm e o coeficiente linear foi de 1.61 mm, com $R^2=0.99$ e $\chi^2=4.61 \times 10^{-5}$. A partir destes dados, podemos

estimar que para $Y=25\%$ temos um raio de aproximadamente 1.34 mm, o que corresponde aproximadamente ao raio do endosperma.

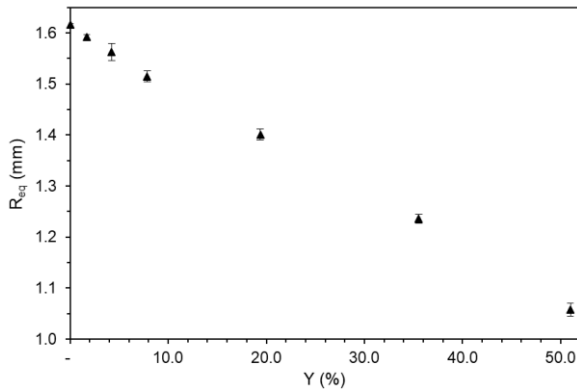


Figura 4: Raio do cilindro equivalente em função da fração de massa removida.

Assim, pode-se relacionar que a espessura do conjunto de camadas de aleurona, pericarpo, testa e casca foi de aproximadamente 273 μm , o que está de acordo com as magnitudes que podem ser vistas em resultados de imagens de microscopias da seção transversal de grão de cevada de Alvarez et al. (2020).

Ajuste do modelo difusivo

Na Tabela 1 tem-se os parâmetros de qualidade dos ajustes do modelo difusivo da Equação 5. Ambos permitem afirmar que a qualidade do ajuste foi boa, tendo em vista que o valor de $R^2 > 0.98$ e $\chi^2 < 0.0018$ foram considerados adequados quando comparados aos resultados de estudos de modelagem de hidratação de cevada, como em Carvalho et al. (2018).

Tabela 1: Parâmetros de ajuste do modelo difusivo.

n	Y (%)	$D_{\text{eff},T}$ (m^2/s)	R^2	X^2
0	0	2.79×10^{-11}	0.99	0.0011
1	1.71	2.71×10^{-11}	0.98	0.0014
2	4.23	3.24×10^{-11}	0.99	0.0009
3	7.86	4.32×10^{-11}	0.98	0.0014
4	19.37	5.33×10^{-11}	0.99	0.0006
5	35.54	6.83×10^{-11}	0.98	0.0018
6	51.01	9.10×10^{-11}	0.99	0.0006

Na Figura 5 tem-se a visualização dos diferentes coeficientes difusivos total para os

diferentes níveis de polimento dos grãos de cevada.

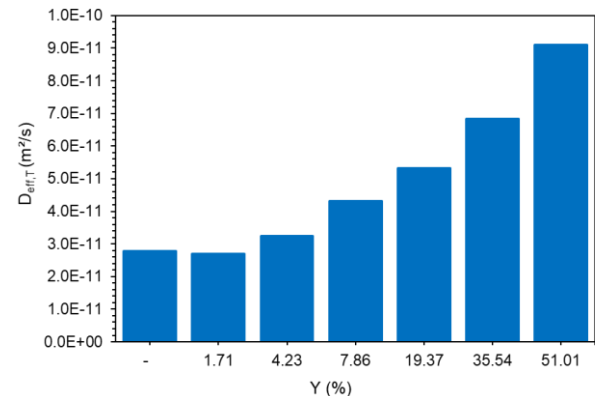


Figura 5: Difusividade Efetiva de umidade total em relação as frações mássicas removidas.

A difusividade é menor para os menores níveis de polimento, quando comparado aos maiores níveis de polimento, pois conforme foi retirado mais massa, as estruturas externas de proteção do endosperma e do embrião foram removidas. Assim, reduzindo as barreiras internas a transferência de massa dos grãos de cevada.

Resistência a transferência de massa

Na Figura 6 tem-se a difusividade efetiva de umidade estimada para o núcleo em função do logaritmo do raio interno do núcleo.

A análise realizada pela Figura 6 permitiu a estimativa do raio interno do núcleo que aproximou o valor da difusividade efetiva do núcleo e a obtida pelo ajuste da Equação (5). Verificou-se que para $r_0^* < 2.45 \times 10^{-142}$ mm o erro percentual foi menor que 0.01%.

A partir disto, na Figura 7 foi mostrado a difusividade efetiva ao longo das camadas dos grãos de cevada para o processo de hidratação, tanto pela abordagem de parâmetro constante ou parâmetro variável. Este resultado possibilita a avaliação radial da difusividade efetiva de umidade e com isso inferir que as camadas de proteção dos grãos têm efeitos físicos sobre a transferência de massa. Sendo que a hipótese deste parâmetro ser constante leva a estimativa de um parâmetro representativo médio para um grão de cevada inteiro.

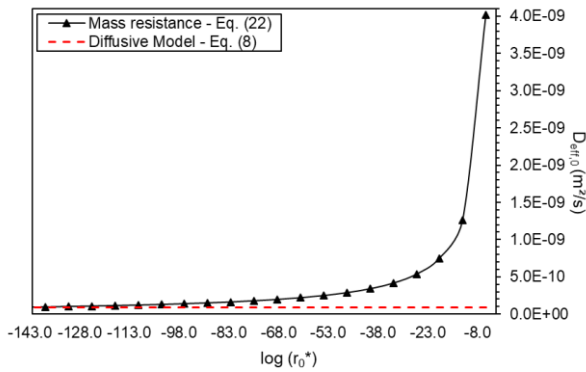


Figura 6: Difusividade efetiva de umidade do núcleo em função do logaritmo do raio interno do núcleo.

Para o grão com 51.01% de fração de massa removida foi considerado que a difusividade efetiva é constante, o que é razoável tendo em vista que para esta fração mássica removida, o grão na verdade trata-se do endosperma isolado.

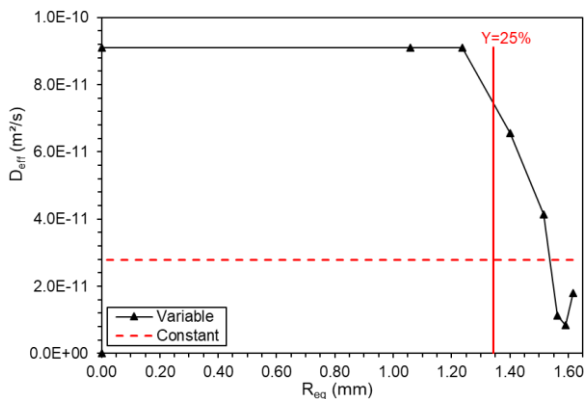


Figura 7: Difusividade efetiva de umidade em função do raio do cilindro equivalente para grãos de cevada à temperatura de 25°C.

Na superfície grão tem-se a casca, seguida de testa e pericarpo, então aleurona e por fim, no núcleo, o endosperma. A partir disto, pela Figura 7 há uma elevação da difusividade próximo a superfície, o que se justifica segundo Alvarez et al.; (2020) e Reynolds & MacWilliam (1966), que mostraram que a casca tem uma rápida absorção de água quando comparada com os outros demais tecidos.

Abaixo da casca tem-se as camadas de testa e pericarpo, os quais segundo Reynolds & MacWilliam (1966) apresentaram uma lenta absorção de água quando comparado a casca e o endosperma. Além disto, Brookes et al. (1976) classifica o pericarpo como

impermeável e a testa como semi-impermeável. Essas constatações, junto a análise realizada por Alvarez et al. (2020) que utilizou o azul metileno como traçador de água no grão de cevada, comprovam a característica do perfil observado na Figura 7.

A Figura 8 mostrou os dados da resistência total a transferência de massa estimada pela Eq. (16) para os grãos de cevada com diferentes níveis de polimento. Pode-se observar que os grãos com menor fração de massa removida têm uma resistência total a difusão elevada, o que é resultado dos efeitos dos tecidos que tem função de proteção dos grãos, como aleurona, testa, pericarpo e casca.

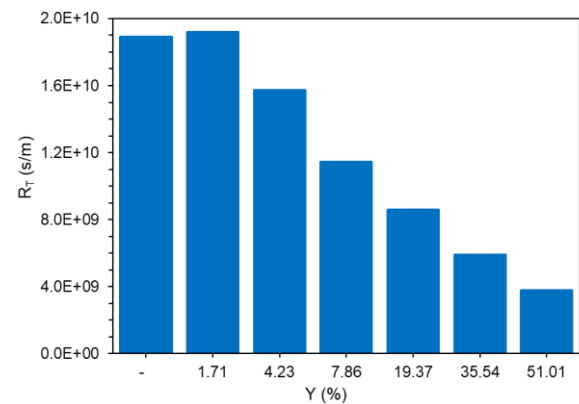


Figura 8: Resistência a transferência de massa total em relação a fração mássica removida.

Na Figura 9 mostrou-se os dados de resistência difusiva estimada nas camadas em função do raio do grão de cevada.

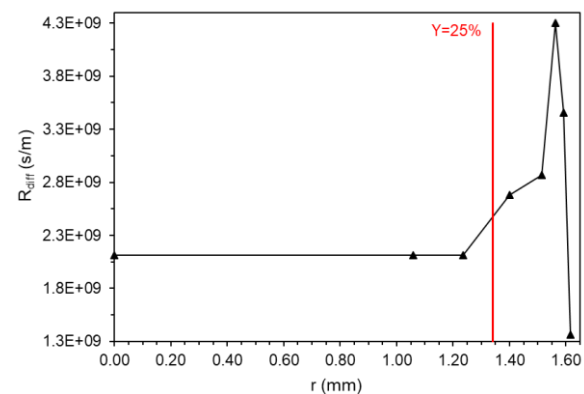


Figura 9: Resistência difusiva em função do raio do grão de cevada.

Dentro deste período temos uma baixa resistência a transferência de massa da casca, uma alta resistência do pericarpo e testa e uma redução desta resistência da aleurona até chegar ao endosperma. Ao comparar as Figuras 8 e 9

verificamos que a resistência total é muito influenciada pela resistência oferecida pelo pericarpo e testa.

CONCLUSÕES

A resistência a transferência de massa foi estimada por meio de sequências de polimentos e medidas de cinética de reumidificação. Os resultados dessa modelagem foram consistentes com os mecanismos físicos esperados dos diferentes tecidos sobre a superfície do endosperma.

Dentro da fina camada dos tecidos de proteção, foi possível observar a alta resistência da transferência de massa do pericarpo e testa quando comparado ao endosperma, casca e aleurona. Isto mostra a heterogeneidade na anatomia dos grãos de cevada, mostrando que suas funções influenciam nos mecanismos físicos de transferência de massa.

A comparação com as observações e estudos sobre a morfologia dos grãos de cevada permitiram validar o perfil das resistências ao longo das camadas dos grãos de cevada.

NOMENCLATURA

Bi	Biot	[-]
i	Índice da somatória	[-]
D	Difusividade efetiva de umidade	[m ² /s]
J _{in}	Fluxo de massa na entrada	[kg/s/m ²]
J ₀	Função Bessel de primeira espécie de ordem zero	[-]
L	Comprimento do grão	[m]
m	Massa do grão	[g]
ṁ	Taxa de transferência de massa	[kg/s]
n	Número de camadas	[-]
R, r	Raio do grão	[m]
R _{diff}	Resistência difusiva	[s/m]
R _T	Resistência total nas camadas do grão	[s/m]
r ₀ *	Raio interno do grão	[m]
R ²	Coefficiente de determinação	[-]
t	Tempo	[s]
W	Largura do grão	[m]
X	Conteúdo de umidade em base seca	[g/g]

X ^m	Média dos adimensionais de umidade observados	[-]
X*	Adimensional de umidade	[-]
Y	Fração mássica removida	[-]

Subscripts

e	Equilíbrio
eq	Cilindro equivalente
est	Estimado
m	Massa
o	Inicial
obs	observado
r	Raio
t	Tempo de hidratação

Greek symbols

α, γ	Raízes da função	[-]
χ^2	Qui-quadrado	[-]
ρ	Massa específica seca	[kg.m ⁻³]

REFERÊNCIAS

- ALVAREZ, D. C.; JORGE, L. M. M.; JORGE, R. M. M. (2020). The impact of periodic operation on barley hydration. *Journal of Food Process Engineering*, v. 43, n. 2, p. 1–11.
- BASUNIA, M. A. (2013). Comparison of five commonly used thin-layer moisture transfer models in fitting the re-wetting data of barley. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, v. 15, n. 4, p. 228–235.
- BASUNIA, M. S.; ABE, T. (2005). Diffusion coefficients for predicting barley re-wetting behavior. *Journal of the Bangladesh Agricultural University*, v. 3, n. 2, p. 317–326.
- BATISTA, L. M.; DA ROSA, C. A.; PINTO, L. A. (2007). Diffusive model with variable effective diffusivity considering shrinkage in thin layer drying of chitosan. *Journal of Food Engineering*, n. 81, p. 127–132.
- BORSATO, V. M.; JORGE, L. M. M.; MATHIAS, A. L.; JORGE, R. M. M. (2019a). Thermodynamic properties of barley hydration process and its thermostability. *Journal of Food Process Engineering*, v. 42, n. 2, p. 1–7.
- BORSATO, V. M.; JORGE, L. M. M.; MATHIAS, A. L.; JORGE, R. M. M.

- (2019B). Ultrasound assisted hydration improves the quality of the malt barley. *Journal of Food Process Engineering*, v. 42, n. 6, p. 1–10. <https://doi.org/10.1111/jfpe.13208>
- BROOKES, P. A.; LOVETT, D. A.; MACWILLIAM, I. C. (1976). The Steeping of Barley. A Review of the Metabolic Consequences of Water Uptake, and Their Practical Implications. *Journal of the Institute of Brewing*, n. 82, p. 14–26.
- CARVALHO, G. R. DE, POLACHINI, T. C.; DARROS-BARBOSA, R.; BON, J.; TELIS-ROMERO, J. (2018). Effect of intermittent high-intensity sonication and temperature on barley steeping for malt production. *Journal of Cereal Science*, n. 82, p. 138–145.
- COZZOLINO, D.; ROUMELIOTIS, S.; EGLINTON, J. (2013). 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.
- COZZOLINO, D.; ROUMELIOTIS, S.; EGLINTON, J. K. (2014a). The influence of starch pasting properties and grain protein content on water uptake in barley. *Journal of the Institute of Brewing*, v. 120, p. 38–44.
- COZZOLINO, D.; ROUMELIOTIS, S.; EGLINTON, J. K. (2014b). The role of total lipids and fatty acids profile on the water uptake of barley grain during steeping. *Food Chemistry*, v. 151, p. 231–235.
- CRANK, J. (1975). *The Mathematics of diffusion* (2nd ed.). Oxford University Press.
- CU, S.; COLLINS, H. M.; BETTS, N. S.; MARCH, T. J.; JANUSZ, A.; STEWART, D. C.; SKADHAUGE, B.; EGLINTON, J.; KYRIACOU, B.; LITTLE, A.; BURTON, R. A.; FINCHER, G. B. (2015). Water uptake in barley grain: Physiology; genetics and industrial applications. *Plant Science*, v. 242, p. 260–269.
- DAVIES, N. L. (1991). Use of X-ray microanalysis to study hydration patterns in barley. *Journal of Cereal Science*, v. 14, n. 1, p. 85–94.
- DAVIES, N. L. (1992). A new malting index: prediction of malting quality by endosperm hydration. *Journal of the Institute Brewing*, v. 98, p. 43–46.
- FAGGION, H.; TUSSOLINI, L.; FREIRE, F. B.; FREIRE, J. T.; ZANOELO, E. F. (2016). Mechanisms of heat and mass transfer during drying of mate (*Ilex paraguariensis*) twigs. *Drying Technology*, v. 34, n. 4, 474–482.
- FELIZARDO, M. P.; FREIRE, J. T. (2018). Characterization of barley grains in different levels of pearling process. *Journal of Food Engineering*, v. 232, p. 29–35.
- JÄÄSKELÄINEN, A. S.; HOLOPAINEN-MANTILA, U.; TAMMINEN, T.; VUORINEN, T. (2013). 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.
- KIRSOP, B. H.; REYNOLDS, T.; GRIFFITHS, C. M. (1967). The distribution of water in germinating barley. *Journal of the Institute of Brewing*, v. 73, n. 2, p. 182–186.
- LOMBI, E.; SMITH, E.; HANSEN, T. H.; PATERSON, D.; DE JONGE, M. D.; HOWARD, D. L.; PERSSON, D. P.; HUSTED, S.; RYAN, C.; SCHJOERRING, J. K. (2011). Megapixel imaging of (micro)nutrients in mature barley grains. *Journal of Experimental Botany*, v. 62, n. 1, p. 273–282.
- MACLEOD, A. M. (1967). The physiology of malting - A review. *Journal of the Institute of Brewing*, v. 73, p. 146–162.
- MARTYNENKO, A. I. (2006). Evaluation of Mass Transfer Resistances from Drying Experiments. *Drying Technology*, v. 24, p. 1569–1582.
- MAYOLLE, J. E.; LULLIEN-PELLERIN, V.; CORBINEAU, F.; BOIVIN, P.; GUILLARD, V. (2012). Water diffusion and enzyme activities during malting of barley grains: A relationship assesment. *Journal of Food Engineering*, v. 109, p. 358–365.

- MIANO, A. C.; FORTI, V. A.; ABUD, H. F.; GOMES-JUNIOR, F. G.; CICERO, S. M.; AUGUSTO, P. E. D. (2015). Effect of ultrasound technology on barley seed germination and vigour. *Seed Science and Technology*, v. 43, n. 2, p. 297–302.
- MIANO, ALBERTO CLAUDIO, & AUGUSTO, P. E. D. (2018). The Hydration of Grains: A Critical Review from Description of Phenomena to Process Improvements. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, v. 17, n. 2, p. 352–370.
- MOK, C. K.; LEE, H. Y.; NAM, Y. J.; MIN, B. Y. (1983). A kinetick study on the hydration process of barley kernels with various polishing yields. *Korean Journal of Food Science and Technology*, v. 15, n. 2, p. 136–140.
- MONTANUCI, F. D.; JORGE, L. M. DE M.; JORGE, R. M. M. (2013). Kinetic, thermodynamic properties, and optimization of barley hydration. *Food Science and Technology*, v. 33, n. 4, p. 690–698.
- MONTANUCI, F. D.; JORGE, L. M. M.; JORGE, R. M. M. (2015). Effect of time and temperature on the hydration process of barley grains. *Heat and Mass Transfer/Waerme- Und Stoffuebertragung*, v. 51, n. 3, p. 363–372.
- MONTANUCI, F. D.; MARIO, L.; JORGE, D. M.; MARIA, R.; JORGE, M. (2013). Kinetic , thermodynamic properties , and optimization of barley hydration, v. 33, n. 4, p. 690–698.
- MONTANUCI, F. D.; PERUSSELLO, C. A.; DE MATOS JORGE, L. M.; JORGE, R. M. M. (2014). Experimental analysis and finite element simulation of the hydration process of barley grains. *Journal of Food Engineering*, v. 131, p. 44–49.
- NAIR, S.; KNOBLAUCH, M.; ULLRICH, S.; BAIK, B. K. (2011). Microstructure of hard and soft kernels of barley. *Journal of Cereal Science*, v. 54, n. 3, p. 354–362.
- PERAZZINI, H.; FREIRE, F. B.; FREIRE, J. T. (2013). Drying Kinetics Prediction of Solid Waste Using Semi-Empirical and Artificial Neural Network Models. *Chemical Engineering and Technology*, v. 36, n. 7, p. 1193–1201.
- REYNOLDS, T.; MACWILLIAM, I. C. (1966). Water Uptake and Enzymic Activity During Steeping of Barley. *Journal of the Institute of Brewing*, v. 72, p. 166–170.