



TRANSFERÊNCIA DE CALOR ENTRE O AR E UM GRÃO DE CEVADA: ANÁLISE DO EFEITO DA UMIDADE E DA ANATOMIA DO GRÃO DE CEVADA

MARCOS P. FELIZARDO^{1*}, 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 - A transferência de calor é um fenômeno que ocorre em diversos processos industriais que buscam beneficiar grãos, como o caso da secagem, torrefação, malteação e extrusão de grãos de cevada. Desta maneira, o objetivo deste trabalho foi analisar o efeito da anatomia e da umidade na transferência de calor entre o ar e um grão de cevada. A análise da transferência de calor foi feita para um grão de cevada imerso em um escoamento de ar aquecido a temperatura de aproximadamente 60°C e velocidade de 1 m/s, sendo realizada a medida de temperatura da superfície do grão, do centro do grão e do ar de secagem ao longo do tempo por meio de termopares do tipo T. A anatomia foi avaliada com experimentos com grãos de cevada inteiros e polidos com (24,2±3,6)% de fração de massa removida e o efeito da umidade foi avaliado por meio de experimentos com os grãos inteiros e polidos com conteúdo de umidade em base úmida de (10,3±0,3)% e (30,8±0,3)%. Foi possível observar por meio destes resultados que há uma influência térmica dos tecidos externos e que ela condiz com suas funções de proteção ao grão de cevada.

INTRODUÇÃO

Os fenômenos de transporte em meios porosos estão presentes em diversos processos industriais que envolvem operações unitárias, dentre eles podem ser citados: filtração, destilação, secagem, reações em leitos fixos e fluidizados.

Os grãos de cevadas são o quinto cereal mais produzido no mundo, sendo grande parte da sua utilização para a produção de bebidas em todo o mundo. Porém, 2% dos grãos de cevada produzidos mundialmente têm sido utilizados para alimentação e esse valor tem sido crescente devido aos aspectos positivos encontrados na saúde com a inclusão deste grão na alimentação humana. Para esta forma de consumo, as sementes devem ser polidas para a retirada das camadas externas ao endosperma (Baik e Ullrich, 2008).

Com isso, novos processos e tecnologias têm sido desenvolvidos nas indústrias

alimentícias com os grãos de cevada. Dentre eles, muitos que envolvem a transferência de calor e massa. Apesar, dos diversos trabalhos encontrados em transferência de massa durante os processamentos destas partículas, como: Mayolle *et al.* (2012), Montanuci *et al.* (2014), Markowski *et al.* (2010), Ghosh *et al.* (2009), entre outros autores, ainda são escassos os trabalhos em que se abrange os estudos da transferência de calor.

Felizardo e Freire (2015) verificaram a influência da compactação dos grãos de cevada moídos na condutividade térmica do meio poroso, constatando que conforme há a compactação existe um maior contato entre partículas, aumentando o valor da condutividade térmica efetiva do meio.

Porém, Felizardo e Freire (2016b) estudaram além dos grãos de cevada moídos, também a variação da determinação de condutividade térmica quando se faz o empacotamento da casca do grão de cevada moído e puderam verificar que a mudança na

constituição do leito, variava o comportamento da condutividade térmica do meio poroso com a compactação. Isso porque quando se fazia a compressão deste meio poroso a partícula da casca apresentava características mais planas que mudavam a característica do contato entre partículas.

No mesmo trabalho, Felizardo e Freire (2016b) observaram que com retirada dos tecidos externos dos grãos de cevada por polimento havia um aumento de densidade do leito de aproximadamente 15%, aumentando a condutividade térmica do meio em cerca de 47%. Porém, Felizardo e Freire (2018) verificaram que o polimento causa variações nas características tanto do meio poroso como da partícula e desta forma se torna ainda muito difícil afirmar pelos resultados de Felizardo e Freire (2016b) que há um isolamento térmico dos tecidos externos para a proteção dos grãos de cevada.

Desta maneira, o objetivo deste trabalho foi analisar o efeito da anatomia e da umidade na transferência de calor entre o ar e um grão de cevada.

MATERIAIS E MÉTODOS

Obtenção e Armazenamento dos Grãos

Os grãos de cevada (BRS Elis) foram obtidos da empresa Agromalte e colhidos no estado do Paraná.

O conteúdo de umidade em base úmida das sementes armazenadas foi de $(11,44 \pm 0,08)\%$. Essas sementes foram armazenadas sob refrigeração a 4°C até a sua utilização (Carvalho e Nakagawa, 1980). A limpeza dos grãos foi realizada por elutriação e seleção manual com auxílio de lupa com lâmpada circular acoplada. Na seleção manual buscou-se a seleção dos grãos com a casca com a menor incidência de danos superficiais possíveis.

A partir destes procedimentos iniciais, as demais preparações foram feitas para se alcançar os objetivos deste trabalho.

Polimento dos grãos de cevada

Para o polimento das sementes de cevada foi utilizado o tambor rotativo de um moinho de bolas (Stoneware, modelo OH44413). Para melhorar a abrasão, a parede do tambor foi

revestida com lixas de granulometria 80 (3M 330U). A rotação utilizada foi a máxima permitida pelo equipamento, cerca de 45 RPM.

O tambor tinha diâmetro de 14 cm e comprimento de 10 cm e a massa inicial de sementes foi de 350 gramas.

O tempo máximo de polimento foi de cinco dias, quando se obteve uma redução percentual de massa maior que $(24,2 \pm 3,6)\%$, valor pelo qual Felizardo (2018) constatou que há a retirada da maior parte dos tecidos externos ao endosperma e embrião das sementes de cevada como foi observado em Felizardo e Freire (2018) por meio das características físicas do processo de polimento e por Felizardo e Freire (2016) por meio da análise da cinética do processo de reumidificação dinâmica dos grãos.

Reumidificação estática dos grãos de cevada

A reumidificação estática foi feita em recipientes de vidros com vedação em PVC. Nestes recipientes foi adicionada uma massa de aproximadamente 50 g de material, onde foi adicionada uma massa de água que forneceria um valor de umidade em base úmida de aproximadamente 30%.

Para isto, o conteúdo de umidade inicial dos grãos foi medido pelo método gravimétrico em estufa a $(105 \pm 3)^\circ\text{C}$ por 24 horas. Com este valor, calculou-se a massa de água necessária e então os recipientes foram vedados e armazenados sob refrigeração ($T \approx 4^\circ\text{C}$) por no mínimo 48 horas para que essa água se distribuisse uniformemente pelos grãos.

Localização dos termopares

As medidas de temperatura no centro do grão de cevada e na superfície do grão de cevada foram realizadas para se poder analisar a transferência de calor. Para isto, utilizou-se termopares implantáveis (tipo T) da Cole Parmer, tendo como objetivo que o diâmetro destes termopares sendo na escala de décimos de milímetro oferecessem menores perturbações ao escoamento.

Os grãos de cevada foram colocados sobre uma base circular de cobre (diâmetro 15 mm), e logo abaixo do grão foi fixado um termopar implantável com fita adesiva de alumínio (423 3M).

Três experimentos considerados “branco”, ou seja, sem nenhum grão de cevada foram realizados para se analisar a influência desta base de cobre sobre os dados de temperatura.

Para a temperatura do centro do grão, um termopar foi inserido no seu interior, buscando-se localizar este termopar na região central do grão, dentro do endosperma. Isto foi realizado com a perfuração do grão com uma agulha de aproximadamente 1 mm de diâmetro. Para a centralização deste caminho do termopar, introduziu-se a agulha na extremidade oposta do embrião e conforme foi introduzida verificou-se se a sua extremidade saiu centralizada no embrião. Caso isso não fosse satisfeito, a amostra era descartada e reiniciava-se o procedimento com um novo grão de cevada.

Com a perfuração realizada, o comprimento do grão foi medido com paquímetro (0,01 mm), então a medida de meio comprimento do grão do comprimento de termopar foi inserida. Para evitar efeitos de contato, o termopar foi inserido por pasta térmica (implastec). O grão foi posicionado com a região dorsal exposta ao escoamento livre.

A Figura 1 mostra o grão de cevada inteiro com o termopar implantável no seu interior.



Figura 1 - Imagem de um grão de cevada com termopar implantado (Fonte: Acervo Pessoal, 2018).

Escoamento do ar

A unidade de aquecimento e escoamento do ar está esquematizado na Figura 2.

Uma ventoinha (1) faz a circulação do ar numa caixa de isolamento acústico para evitar superaquecimento do soprador (2). O soprador consiste num compressor radial (IBRAN), o qual forneceu uma vazão de ar fixa, então um

sistema de válvulas (3) do tipo gaveta fazia a regulação de vazão do ar, formando um sistema de tubos para saída de ar e recuperação. Para a determinação da velocidade do escoamento foram feitas medidas em nove localizações, sendo 3 na altura e 3 no comprimento da seção transversal do escoamento, sendo feitas 3 repetições de medidas de velocidade em cada local, desta forma totalizando 27 medidas, estas medidas não tiveram variações maiores que 10% na seção transversal, resultados condizentes com 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.

Estas medidas de velocidade foram realizadas com termoanemômetro (TSI 8346).

Após regulada e medida a vazão, o ar foi aquecido por um aquecedor elétrico (4) com duas resistências em série de 750 W, a potência fornecida a estas resistências foram 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.

Um termopar localizado aproximadamente a um metro após as placas defletoras mediu a temperatura do ar e dois termopares foram localizados a jusante e a montante da localização da amostra em cerca de 0,5 m. 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 em intervalos de 1 s.

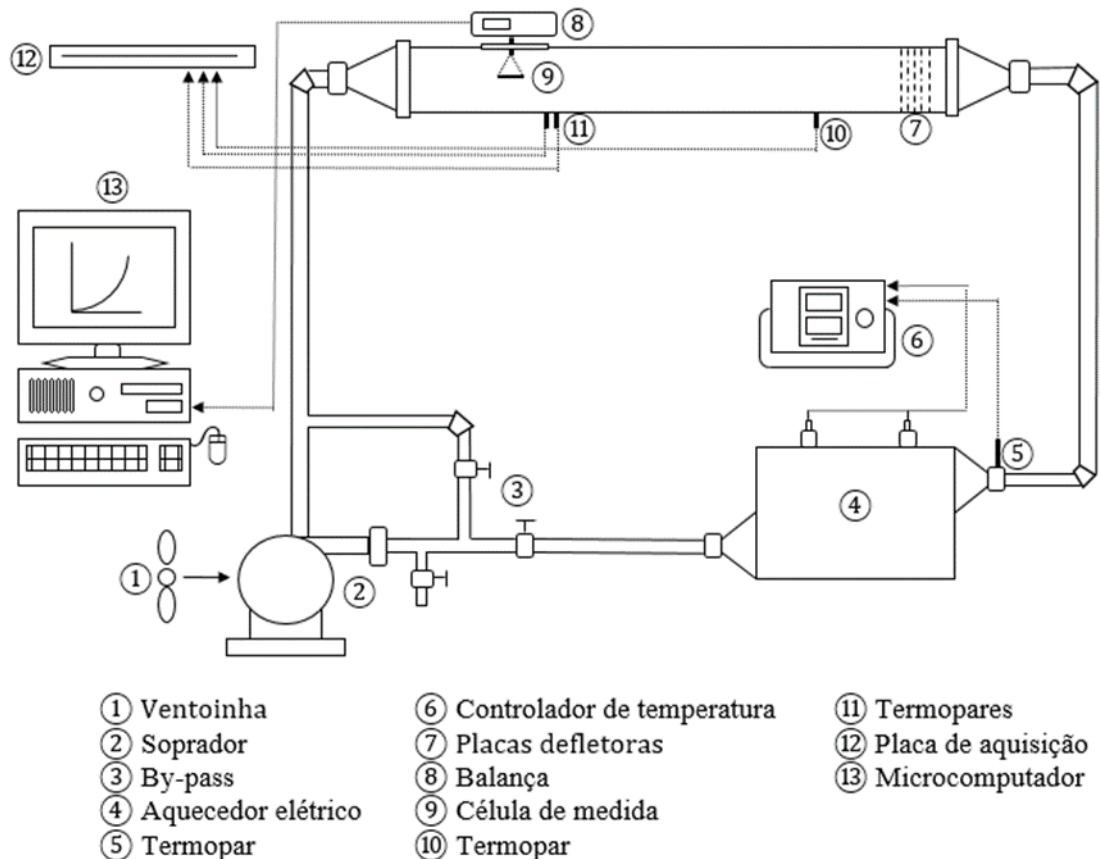


Figura 2 - Esquematização da unidade de aquecimento e escoamento de ar (Adaptado de Cassandre *et al.*, 2001).

Experimentos realizados

Para ser alcançarem os objetivos deste trabalho, foram feitos experimentos que avaliaram o efeito da anatomia radial e da umidade na transferência de calor entre o ar e um grão de cevada.

Para avaliar a umidade foram feitos experimentos com grãos de cevada que estavam em equilíbrio com a temperatura de aproximadamente 60°C e umidade relativa abaixo de 8%.

Para a determinação de temperatura e umidade relativa do ar foi utilizado um termo-higro-anemômetro (Tri-Sense, 37000-95), sendo feitas 27 medidas em 9 locais da seção transversal do escoamento, conforme já descrito para medida de velocidade.

Para se obter um grão em equilíbrio com estas condições, este grão tinha os termopares localizados e então a amostra era exposta ao escoamento por 24 horas. Desta maneira, o conteúdo de umidade da amostra se aproximava ao máximo possível do equilíbrio com as

condições de temperatura, umidade e velocidade do ar. Após isto, essa amostra era vedada em um recipiente e permanecia armazenada sob refrigeração ($T \approx 4^\circ\text{C}$) por 24 horas, para que qualquer possível variações de umidade no interior do grão fossem homogêneas.

Assim, se obtinha uma amostra que teria a maior variação de umidade possível ao entrar em contato com a fase fluida.

Para se obter um grão de cevada que tivesse uma grande quantidade de água no seu interior, e portanto, tivesse a transferência de massa simultaneamente ao processo de transferência de calor, foi realizada a reumidificação de 50 g de grãos de cevada como descrito anteriormente.

Com esta amostra com cerca de 30% de umidade preparada, então iniciava-se o procedimento de implantação do termopar, e logo após a amostra era novamente vedada num recipiente e refrigerada ($T \approx 4^\circ\text{C}$) por 24 horas.

Estas amostras que já estavam com o termopar implantado eram retiradas da refrigeração e com o recipiente ainda vedado este era exposto às condições ambientes, onde a temperatura do grão chegava a aproximadamente 30°C após 4 horas.

Verificações preliminares permitiram verificar que com este tempo de exposição, não havia mais variações da temperatura no centro do grão exceto as variações da própria oscilação de medida.

Então, após estes cuidados, iniciou-se o processo de aquisição de temperaturas e então o sistema de grão e termopar foi inserido no escoamento de ar.

Para a verificação do efeito da anatomia radial, estes procedimentos com diferentes conteúdos de umidade foram realizados para grãos de cevada inteiros e polidos (conforme procedimento descrito anteriormente).

Foram verificados por análises preliminares que a velocidade ar de 1 m/s reduzia significativamente a movimentação da amostra no interior do túnel de vento. A temperatura de 60°C foi a máxima possível para o equipamento utilizado, o que está de acordo com a temperatura de secagem de grãos utilizadas em processos de beneficiamento (Brooker *et al.*, 1992)

Todos os experimentos foram realizados com três repetições a fim de se avaliar a reprodutibilidade dos procedimentos experimentais.

Desta forma, com a análise geral dos experimentos foi possível analisar o efeito da umidade e da anatomia radial do grão de cevada durante o aquecimento convectivo por ar, conforme pode ser visto pelos Resultados e Discussão apresentados, a seguir.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Aquecimento do Grão Inteiro

A Figura 3 mostra as temperaturas medidas em função do tempo de aquecimento pelo ar para um grão inteiro de cevada com umidade (10,1±0,9)% em base úmida.

Foi possível confirmar a reprodutibilidade dos experimentos tendo em vista que as barras de desvios padrões foram menores que a dimensão dos marcadores.

Por meio desta Figura pode-se visualizar que a temperatura do fluido permaneceu em (59,4±0,3)°C para o todo o tempo de processo de aquecimento. Desta maneira, podendo se afirmar que o ar apresenta uma maior energia térmica quando comparada com o grão de cevada, assim sendo, pode-se afirmar que há a transferência de calor da fase fluida para a fase sólida por mecanismos de condução e convecção.

Verifica-se que inicialmente a temperatura média da superfície do grão de cevada foi de (33,2±0,3)°C e a temperatura do centro foi de (33,4±0,2)°C, estes resultados mostram que a diferença entre a temperatura da superfície do centro do grão não são diferentes estatisticamente, pois as diferenças das médias são menores que seus desvios.

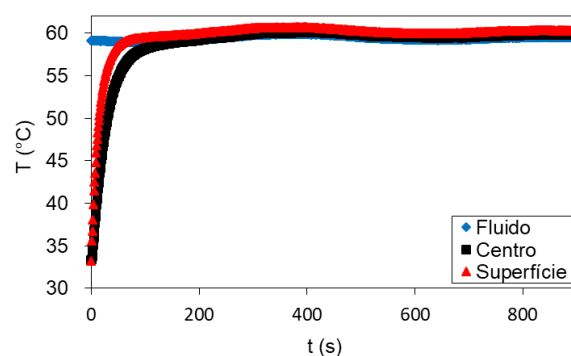


Figura 3 – Temperaturas em função do tempo de aquecimento de um grão de cevada inteiro seco (Fonte: Acervo Pessoal, 2018).

Porém, a diferença percentual entre a temperatura da superfície do grão e a do ar em relação a temperatura do ar é cerca de 44%. Mostrando que nestes instantes iniciais há uma maior força motriz dos mecanismos convectivos de transferência de calor.

Esta diferença percentual permanece maior que 1,4% até 46 s, mostrando que a partir deste tempo há um equilíbrio entre a temperatura da superfície e do fluido. Verifica-se que esta diferença permanece em torno de 1,4% pelo restante de tempo de experimento, mostrando que esta diferença se deve a diferenças dos instrumentos de medida. Confirmando que há uma precisão muito alta entre os dispositivos de medida, estando a diferença dos seus resultados muito menor que 10%, que é um valor aceitável pela engenharia.

Porém, a diferença percentual entre a temperatura da superfície e o centro do grão em relação a temperatura da superfície do grão para o tempo de 46 s ainda é de aproximadamente 7%.

Esta diferença percentual vai decaindo com o tempo de aquecimento e em 400 s esta diferença é menor que 0,9% e a partir deste ponto as diferenças percentuais não mudam mais que 0,1%. Estes resultados nos mostram que a partir de 46 s o fluxo de calor fornecido pelo ar para a superfície do grão de cevada é igual ao fluxo de calor condutivo no seu interior.

Também podemos constatar que em 400 s, o grão de cevada chegou a condição de equilíbrio térmico, pois não há diferença significativa entre a temperatura do núcleo do grão e o a temperatura do ar.

Na Figura 4 temos as temperaturas em função do tempo de aquecimento para um grão com umidade de $(29,04 \pm 0,02)\%$ em base úmida.

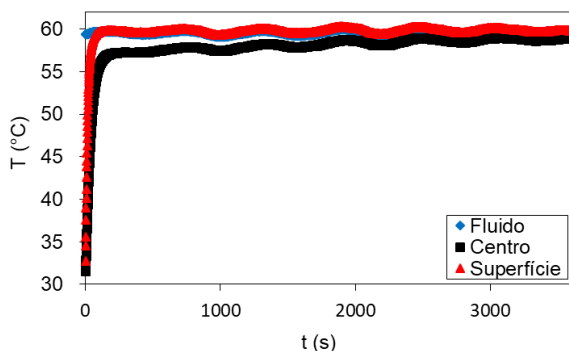


Figura 4 - Temperaturas em função do tempo de aquecimento de um grão de cevada inteiro úmido (Fonte: Acervo Pessoal, 2018).

A temperatura do ar média durante o experimento foi de $(59,6 \pm 0,2)^\circ\text{C}$, a temperatura inicial da superfície do grão foi de $(32,8 \pm 0,4)^\circ\text{C}$ e a temperatura do centro foi de $(32,5 \pm 0,3)^\circ\text{C}$. Estes resultados estão conforme os observados para os grãos inteiros seco, discutidos anteriormente.

Observa-se que a diferença percentual entre a temperatura do ar e da superfície do grão foi de aproximadamente 45%, este resultado também está de acordo com o visto para o grão inteiro seco.

Esta diferença percentual foi reduzida com o tempo de aquecimento até cerca de 0,4%

a qual permaneceu constante a partir de 83 s. Verifica-se que o tempo para que a superfície entrasse em equilíbrio com a fase fluida foi maior para o grão inteiro úmido, isto se deve, pois parte do calor transferido entre a fase sólida e a fase fluida foi utilizada como calor latente para a mudança de fase da água superficial e a outra parte foi utilizada como calor sensível para elevação da temperatura da superfície. Visto que na condição de grão inteiro seco o efeito da água foi reduzida ao máximo, todo o calor transferido foi calor sensível para elevação da temperatura da superfície do grão, desta maneira, necessitando de um menor tempo para que houvesse o equilíbrio entre as temperaturas de superfície e da fase fluida.

Para o tempo de 83 s verificou-se que a diferença entre a temperatura da superfície do grão e o centro do grão em relação a temperatura da superfície do grão foi de 8,5%, como esperado, esse valor foi reduzindo com o tempo de aquecimento, não reduzindo a mais que 1,9% de diferença percentual para o tempo de 3063 s.

O que podemos observar com estes resultados é que a redução da espessura do filme líquido de água na superfície do grão possibilitou um equilíbrio de temperaturas entre a superfície do grão e a fase fluida no tempo de 83 s. Porém, devido a difusão de água do interior do grão para a superfície manter uma fina camada de líquido ainda há absorção de calor latente para a mudança de fase deste filme delgado, assim o fluxo de calor para o interior do grão durante a secagem é menor do que o fluxo de calor para o grão seco, desta maneira aumentando significativamente o tempo para que o grão entre em equilíbrio térmico com o ar.

Estas constatações ficam claras quando se compara as Figuras 3 e 4.

Aquecimento do Grão Polido

A Figura 5 mostra as temperaturas medidas em função do tempo de aquecimento pelo ar para um grão polido de cevada com umidade $(10,7 \pm 1,2)\%$ em base úmida.

A temperatura do ar durante o experimento foi de $(59,4 \pm 0,4)^\circ\text{C}$, a temperatura inicial da superfície do grão foi de $(32,9 \pm 0,5)^\circ\text{C}$ e a temperatura do centro foi de $(32,9 \pm 0,3)^\circ\text{C}$.

Estes resultados estão conforme os observados para os grãos inteiros secos e úmidos, discutidos anteriormente.

Podemos verificar que há uma semelhança muito clara quando comparamos os resultados apresentados nas Figuras 3 e 5. Isto se deve a característica semelhante da fase sólida entre os dois resultados, sendo que podemos inferir que o polimento do grão mudou características físicas dos grãos, mas ainda não foram tão significativos para mudar o comportamento observado visualmente entre as Figuras.

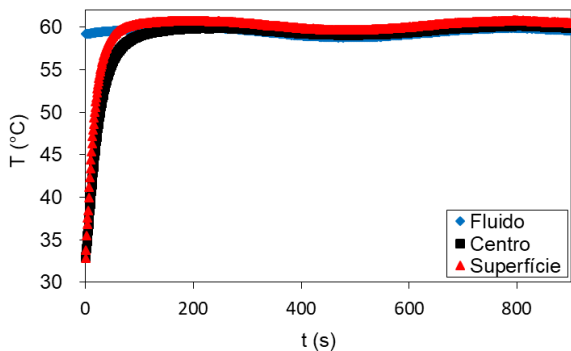


Figura 5 – Temperaturas em função do tempo de aquecimento de um grão de cevada polido seco (Fonte: Acervo Pessoal, 2018).

A diferença percentual entre as temperaturas do ar e da superfície do grão polido foi de aproximadamente 44%, o que está de acordo com o que foi estimado para os demais experimentos apresentados. Estes valores com pequenas variações são devido aos cuidados e critérios metodológicos durante os experimentos para se obter a reprodutibilidade das condições experimentais.

Esta diferença percentual foi reduzida até 1,6% permanecendo oscilante em torno deste valor a partir de 47 s. Este valor está de acordo com o observado para o grão inteiro seco, sendo que houve um aumento de 4 s, que podem estar ligados aos erros experimentais durante a inserção e posicionamento da amostra.

Para este tempo, foi estimado que a diferença percentual entre a temperatura da superfície e do centro do grão foi cerca de 6%, sendo que esse valor é reduzido até 1,1%, o qual permanece constante a partir de 359 s.

Podemos verificar que as diferenças das características físicas do grão de cevada com o polimento não mostraram variações

significativas para os mecanismos de transferência de calor. Porém, deve ser claro que estas diferenças não estão sendo avaliadas para altas precisões, por isso não há como fazermos a afirmação que não existem. Mas sim do ponto de vista físico da engenharia, então para as condições estudadas por estes experimentos, não foi observada variações entre grãos secos para o polimento.

Na Figura 6 estão os resultados de temperaturas medidas em função do tempo de aquecimento pelo ar para um grão polido de cevada com umidade de $(30,0 \pm 0,7)\%$ em base úmida.

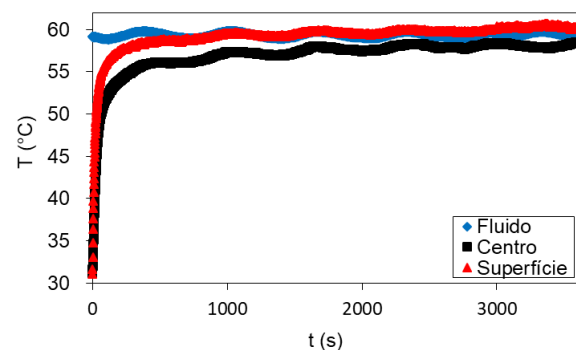


Figura 6 – Temperaturas em função do tempo de aquecimento de um grão de cevada polido úmido (Fonte: Acervo Pessoal, 2018).

A diferença percentual entre as temperaturas do ar e da superfície do grão foi de 47,5%, sendo a maior observada, mas com uma diferença de 3,5% da menor observada, sendo ainda valores razoáveis de reprodutibilidade de experimento.

As temperaturas de superfície e do centro do grão foram $(31,1 \pm 0,2)^\circ\text{C}$ e $(31,1 \pm 0,5)^\circ\text{C}$, respectivamente.

A diferença percentual entre as temperaturas do ar e da superfície do grão reduziram conforme aumentou-se o tempo de aquecimento, este valor manteve-se constante em 0,5% a partir de 736 s, este tempo foi cerca de 10 vezes maior do que encontrado para o grão inteiro úmido. Isto pode estar relacionado com a interação entre a superfície do grão inteiro e do polido com a água, podendo-se inferir que com a superfície do grão polido há a formação de um filme líquido mais espesso do que o formado para o grão inteiro. Esta maior espessura do filme pode estar relacionada ao material pulverizado que ficou aderido a

superfície do grão e a interação com o filme líquido. Além disso, esse pó formou uma superfície mais rugosa, assim aumentando a área superficial de formação de filme líquido, aumentando a quantidade de água livre e aumentando o tempo para redução desse filme líquido.

Há outro fator importante que é a difusão que mantém o filme líquido, sendo que a maior difusão de água no interior do grão polido (MAYOLLE et al., 2012; FELIZARDO e FREIRE, 2016a; FELIZARDO 2018) para a superfície dificulta a redução da espessura do filme líquido, pois necessita de maior energia de evaporação para que o filme líquido seja consumido. Como a quantidade de energia no ar é a mesma para o inteiro, o tempo para se estabelecer um equilíbrio térmico entre a superfície do grão polido e o ar foi maior.

Para 736 s foi observado que a diferença percentual entre a temperatura da superfície e a do centro do grão foi de aproximadamente 4,4%, sendo a menor encontrada entre as quatro situações. A partir desta informação, pode-se inferir que o maior período de tempo para alcançar o equilíbrio térmico entre as temperaturas da fase fluida e a da superfície foi influenciado pelo calor latente e sensível, porém como inferido com a maior espessura do filme líquido houve um maior consumo de calor latente total e ele foi consumido por um intervalo maior de tempo, mas de forma semelhante ao grão inteiro, parte do calor transferido foi consumido na forma de calor sensível que foi conduzido para o interior do grão elevando a temperatura do centro do grão e reduzindo a diferença percentual no final do período de aquecimento da superfície.

Efeito da Anatomia

Com o objetivo de analisarmos a estrutura, na Figura 7 são apresentados os resultados de diferença de temperatura entre a superfície do grão e o centro, comparando-se as quatro situações de experimento: grãos inteiros secos, grãos inteiros úmidos, grãos polidos secos e grãos polidos úmidos.

Podemos verificar que a força motriz da transferência de calor no interior do grão úmido foi muito maior para o grão inteiro úmido até 100 s, sendo a diferença percentual menor que 2% a partir deste tempo.

O mesmo comportamento foi observado para o grão inteiro seco quando comparado ao grão polido seco. Verifica-se que a 80 s, o grão inteiro teve uma maior diferença entre a temperatura da superfície do grão e o centro.

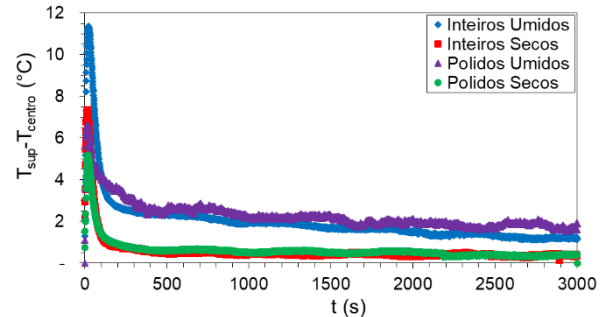


Figura 7 – Diferenças de temperatura entre a superfície do grão e o centro em função do tempo de aquecimento (Fonte: Acervo Pessoal, 2018).

Na Figura 8 podemos comparar as temperaturas do centro do grão em função do tempo de aquecimento para as quatro condições.

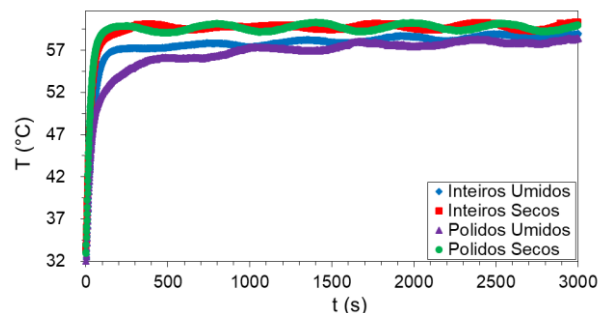


Figura 8 – Temperatura no centro do grão em função do tempo de aquecimento (Fonte: Acervo Pessoal, 2018).

Quando comparamos os grãos inteiros secos e polidos secos verificamos que a diferença percentual média entre as temperaturas do centro foi de $(0,04 \pm 0,84)\%$ ao longo do tempo de aquecimento de 3600 s. Desta forma, podemos observar que há uma larga distribuição em torno de 0,04% que mostra que a diferença entre estas temperaturas aproximadamente não tem variação entre as duas condições, o que pode ser confirmado pela Figura 8. Porém, na Figura 7 observamos que há um período de tempo curto em que a força motriz foi maior para o grão inteiro, isso pode

indicar que há uma resistência térmica oferecida pelos tecidos externos que reduzem o efeito do aquecimento sobre o centro do grão, o que é esperado tendo em vista que estes tecidos são biologicamente constituídos para proteger o grão. Se a temperatura no interior do grão se eleva, há uma deterioração dos amidos e por consequência reduz a qualidade da fonte de nutrientes do futuro embrião da semente.

Quando verificamos os resultados de temperatura no centro para os grãos úmidos, verificamos que a temperatura no centro do grão inteiro aumenta mais rapidamente que a temperatura do grão polido. Isso mostra que os efeitos do filme líquido do grão polido foram maiores que os efeitos de proteção dos tecidos externos, reduzindo a temperatura da superfície tão significativamente que houve uma maior transferência condutiva para o interior do grão polido.

Na Figura 9 isto pode ser confirmado, quando verificamos a temperatura da superfície do grão em função do tempo de aquecimento.

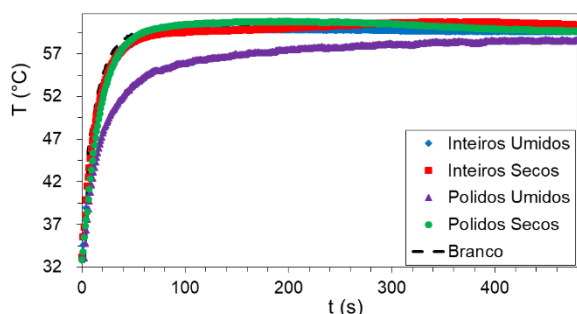


Figura 9 – Temperatura da superfície do grão em função do tempo de aquecimento (Fonte: Acervo Pessoal, 2018).

Além disto, na Figura 9 apresentou-se o resultado da temperatura da superfície de cobre com o termopar sem nenhum material (denominado “branco”) e observamos que essa medida teve uma grande influência da transferência de calor na placa de cobre e que para os resultados de grão inteiros e polidos secos e inteiros úmidos esse valor foi muito próximo.

Desta maneira, pode-se ainda verificar que estes efeitos do filme líquido foram tão significativos sobrepondo os efeitos da placa de cobre.

CONCLUSÕES

Mediante os resultados apresentados e as condições experimentais realizadas pode-se concluir que existe uma influência térmica dos tecidos externos sobre a transferência de calor por mecanismos condutivos no interior do grão de cevada e que esse efeito é condizente com a função dos tecidos de serem agentes amenizadores das condições externas sobre o interior do grão.

Além disto, foi possível notar que há um efeito significativo do filme líquido e que mudanças superficiais dos grãos de cevada podem influenciar isso tão significativamente que alterem a condução de calor para o interior.

REFERÊNCIAS

- BAIK, B. K.; ULLRICH, S. E. (1992) Barley for food: Characteristics, improvement, and renewed interest. *Journal of Cereal Science*, v. 48, p. 233–242, 2008.
- BROOKER, Donald B.; BAKKER-ARKEMA, Fred W.; HALL, Carl W. Drying and storage of grains and oilseeds. New York: An Avi, 450 p. ISBN 0-442-20515-5.
- CARVALHO, N. M.; NAKAGAWA, J. (1980) Sementes: ciência, tecnologia e produção. Campinas: Fundação Cargil, p. 326.
- 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*, v. 1. p. 1-4.
- FELIZARDO, M. P. (2018) Secagem de cevada: Uma análise da anatomia e do meio de transporte. 2018. 147 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Química, Programa de Pós-graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos. Disponível em: <<https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/9819?show=full>>. Acesso em: 15 fev. 2019.
- FELIZARDO, M. P.; FREIRE, J. T. (2015) Análise do efeito da porosidade na condutividade térmica de pós de sementes de cevada. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE SISTEMAS PARTICULADOS - ENEMP 2015, 37.,

- 2015, São Carlos. Anais do XXXVII Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados - ENEMP 2015. Fortaleza: Blucher, p. 1360 - 1369. Disponível em: <<http://www.proceedings.blucher.com.br/article-details/anlise-do-efeito-da-porosidade-na-condutividade-termica-de-ps-de-sementes-de-cevada-20742>>. Acesso em: 15 fev. 2018.
- FELIZARDO, M. P.; FREIRE, J. T. (2016) Cinética de absorção de água de sementes de cevadas com diferentes níveis de polimento. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA, 21., 2016a, Fortaleza. Anais do Congresso Brasileiro de Engenharia Química. Fortaleza: Galoá, v. 1, p. 1 - 8. Disponível em: <<https://proceedings.science/cobeq/cobeq-2016/papers/cinetica-de-absorcao-de-agua-de-sementes-de-cevadas-com-diferentes-niveis-de-polimento>>. Acesso em: 15 fev. 2019.
- FELIZARDO, M. P.; FREIRE, J. T. (2016) Análise do efeito da casca na determinação da condutividade térmica efetiva de sementes de cevada. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA, 21., 2016b, Fortaleza. Anais do Congresso Brasileiro de Engenharia Química. Fortaleza: Galoá, 2016. v. 1, p. 1 - 8. Disponível em: <<https://proceedings.science/cobeq/cobeq-2016/papers/analise-do-efeito-da-casca-na-determinacao-da-condutividade-termica-efetiva-de-sementes-de-cevada>>. Acesso em: 15 fev. 2019.
- FELIZARDO, M. P.; FREIRE, J. T. (2018) Characterization of barley grains in different levels of pearling process. *Journal Of Food Engineering*. [s.l.], p. 29-35.
- GHOSH, P. K.; JAYAS, D. S.; GRUWEL, M. L. H. (2019) Measurement of Water Diffusivities in Barley Components Using Diffusion Weighted Imaging and Validation with a Drying Model. *Drying Technology*, v. 27, p. 382–392.
- MARKOWSKI, M.; BIAŁOBRZEWSKI, I.; MODRZEWSKA, A. (2010) Kinetics of spouted-bed drying of barley: Diffusivities for sphere and ellipsoid. *Journal of Food Engineering*, v. 96, n. 3, p. 380–387.
- MAYOLLE, J. E.; LULLIEN, V.; CORBINEAU, F.; BOIVIN, P.; GUILARD, V. (2012) Water diffusion and enzyme activities during malting of barley grains: A relationship assesment. *Journal of Food Engineering*, v. 109, p. 358–365.
- MONTANUCI, F. D.; PERUSSELLO, C. A.; JORGE, L. M. 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.