



ANÁLISE DO PROCESSO DE HIDRATAÇÃO DE SEMENTES DE JEQUITIBÁ-BRANCO (*Cariniana estrellensis* (Raddi) Kuntze) ATRAVÉS DO MODELO DIFUSIVO ASSOCIADO À MICROTOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA (MICRO-TC)

ANSELMO N. de C. FILHO¹, MARCOS P. FELIZARDO², GUSTAVO D. MAIA^{1*}

¹Universidade Federal de São Carlos UFSCar, Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia
Departamento de Engenharia Química

²Instituto Federal de Minas Gerais IFMG, Campus de Congonhas
Departamento de Mecânica

*e-mail: maia@ufscar.br

RESUMO – Jequitibá-branco (*Cariniana estrellensis* (Raddi) Kuntze) é uma espécie nativa ameaçada de extinção e de significativa importância ecológica e comercial. Visando a melhoria das condições germinativas, com consequente impacto sobre a quantidade e qualidade das mudas produzidas, o presente estudo visou contribuir na análise do processo de hidratação dessas sementes através da interpretação dos ajustes do modelo difusivo, considerando a difusividade efetiva constante e variável, associado à investigação por imagens de microtomografia computadorizada de raios X (micro-TC). As curvas de hidratação foram realizadas em temperaturas de 25, 35 e 45 °C. O modelo difusivo foi ajustado satisfatoriamente, tanto para a difusividade efetiva constante, quanto para variável. Os valores de difusividade efetiva foram considerados baixos, uma vez que esse tipo de semente apresenta tecidos de proteção contra impactos mecânicos de hídricos. A análise das variações da difusividade permitiu a observação das três fases de hidratação. A análise das imagens de micro-TC demonstrou que há uma evidente distribuição preferencial de água nos tecidos de reserva que atuam como barreira na proteção do embrião contra impactos hídricos, mostrando-se uma técnica promissora a ser empregada nesse tipo de estudo.

INTRODUÇÃO

A comercialização de sementes e a produção de mudas de espécies de valor comercial constituem atividades promissoras do ponto de vista econômico e ambiental. Uma espécie com significativo interesse comercial é o Jequitibá-branco (*Cariniana estrellensis* (Raddi) Kuntze), em função do alto valor da madeira e da sua utilização como espécie para reflorestamento (Carvalho, 2003; Chudnoff, 1984; Record e Hess, 1972).

A germinação de sementes e o estabelecimento de plântulas são fases críticas no ciclo de crescimento das plantas, uma vez que influenciam e determinam a sobrevivência

das espécies em habitats naturais (Hadas, 2005).

A análise da absorção de água em tecidos vegetais tem sido objeto de estudo para diversos pesquisadores. Na literatura pode-se encontrar pesquisas envolvendo grãos de alpiste (Lisbôa *et al.*, 2015), feijão (Resende *et al.*, 2007), pimentas verdes e vermelhas (Kaynak-Ertekin, 2002), cranberries (Lenhard *et al.*, 2016), milho (Verma e Prasad, 1999) e batatas (Cunningham *et al.*, 2007). Em sementes, o processo de hidratação pode interferir de maneira importante nas etapas de germinação e seu estudo permite a avaliação de possíveis impactos causados pelo transporte de água nos diferentes tecidos da semente.

Dessa forma, o presente trabalho teve como objetivo contribuir na análise do processo

de hidratação de sementes de Jequitibá-branco (*Cariniana estrellensis* (Raddi) Kuntze), através da interpretação dos ajustes do modelo difusivo, considerando a difusividade efetiva constante e variável, associado à investigação por imagens de microtomografia computadorizada de raios X (micro-TC).

MATERIAIS E MÉTODOS

Caracterização Física

As sementes de Jequitibá-branco foram adquiridas junto à empresa Arbocenter. Foram selecionadas aleatoriamente 105 sementes na umidade do lote (0,13 kg/kg) para a determinação das características morfológicas. Primeiramente, foram retiradas as alas das sementes de forma manual, conforme proposto por Brasil (2009). Foi utilizado um paquímetro digital, com precisão de 0,01 mm, para determinação da espessura das sementes, enquanto as demais dimensões foram determinadas por análise de imagens com o software *Image Pro Plus 6*.

As imagens foram obtidas com uma câmera digital Motorola, com resolução de 12 megapixels. O mesmo procedimento foi adotado para sementes em seu grau máximo de hidratação, para avaliação de possíveis mudanças nas características morfológicas devido à absorção de água. Foram determinados os seguintes parâmetros: diâmetro de Feret médio (D_{Fm}), perímetro (P), espessura (E), área superficial projetada (A) e esfericidade (ϕ). Com os dados obtidos através da análise de imagem, foi possível o cálculo do volume (V) considerando a semente uma semiesfera.

Modelagem da Cinética de Hidratação

As cinéticas de hidratação foram realizadas em uma câmara climática da marca Binder, modelo KMF 720, com controle de temperatura ($\pm 0,1^\circ\text{C}$) e umidade, em três temperaturas diferentes: 25, 35 e 45°C .

Para cada temperatura, foi escolhido aleatoriamente três conjuntos de 20 sementes, um para cada triplicata. Cada conjunto foi devidamente pesado, com o auxílio de uma balança digital de precisão 0,0001 g da marca Gehaka e disposto em caixas Gerbox, preenchidas com água destilada na temperatura

do ensaio. Foram utilizadas telas de proteção para garantir a total submersão da semente.

Para a determinação da umidade em diferentes intervalos de tempo, as amostras foram colocadas sobre papel filtro para remoção da água superficial durante, aproximadamente, um minuto (Verma e Prasad, 1999). Para determinação da umidade das amostras durante o processo de hidratação não foram realizadas correções por possíveis perdas de sólidos, pois se admitiu que a quantidade de água absorvida foi significativamente maior que a quantidade lixiviada (Cunningham *et al.*, 2007).

Para a modelagem da cinética de hidratação foi escolhido o modelo baseado na Segunda Lei de Fick conforme a Equação 1 em coordenadas esféricas.

$$\frac{\partial X}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2 X}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial X}{\partial r} \right) \quad (1)$$

Foram consideradas as seguintes condições de contorno, aplicadas ao modelo:

$$\begin{aligned} X(r, t) \Big|_{r=R} &= X_{eq}; (t > 0) \\ \frac{dX(r, t)}{dr} \Big|_{r=0} &= 0; (t > 0) \\ X(r, t) \Big|_{t=0} &= X_0 \end{aligned} \quad (2)$$

A aplicação dessas condições de contorno resulta na Equação 3.

$$X^* = \frac{X - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} e^{-\left[\frac{-n^2 \pi^2 D_{ef} t}{9} \left(\frac{3}{r} \right)^2 \right]} \quad (3)$$

Crank (1975) definiu o adimensional de umidade como sendo o quão distante o material a ser processado está da sua condição de equilíbrio final. Deste modo, mesmo em processos de hidratação, para $t = 0$, $X^* = 1$. O modelo proposto considera que há sempre umidade de equilíbrio na superfície, o que implica que a umidade no interior da semente é instantaneamente distribuída entre os tecidos internos, de forma que o gradiente de concentrações é considerado desprezível. A massa seca foi obtida mantendo-se as sementes em estufa com circulação de ar da marca

Technal a uma temperatura de 105 ± 3 °C por 24 horas (Felizardo *et al.*, 2021).

Os coeficientes de difusividade foram ajustados utilizando o software Excel. Tanto os ajustes para D_{ef} constante, quanto para variável, foram realizados conforme proposto por Felizardo *et al.* (2021).

Os parâmetros foram estimados utilizando o método de mínimos quadrados para ajustar funções não lineares (Felizardo, *et al.*, 2021). Os valores dos resíduos entre os dados de umidade observados e estimados foi calculada de acordo com a Equação 4:

$$\delta(t) = X_{obs}^* - X_{est}^* \quad (4)$$

A qualidade do ajuste foi avaliada tanto pela distribuição dos resíduos quanto pelo teste de chi-quadrado conforme a Equações 5.

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^K \delta_i^2}{K - nP} \quad (5)$$

Microtomografias de Raios-X (micro-TC)

A microtomografia de raios X (micro-TC) é uma técnica que permite a obtenção de imagens com alta resolução de seções transversais de um objeto, de forma não destrutiva, nas quais são mapeados parâmetros físicos como a densidade e a porosidade de cada região interna (Gomes-Junior *et al.*, 2014).

As sementes de Jequitibá-branco com diferentes níveis de umidade foram submetidas à análise no micro tomógrafo de raios X SkyScan 1172 do Laboratório de Técnicas Nucleares da Embrapa Instrumentação Agropecuária, em São Carlos, SP.

Na definição dos parâmetros de aquisição das seções transversais das sementes foram analisadas as resoluções de câmera de 2000 x 1048 pixels (modo 2K) e 4000 x 2300 pixels (modo 4K). Na reconstrução das imagens, foi utilizado o software NRecon e foram avaliadas diferentes variações no percentual de correção do artefato de beam hardening (0%, 20%, 40%, 60%, 80% e 100%), além dos parâmetros de correção de artefato de anel e filtro para redução do ruído, com valores variando de 0 a 20 (Gomes-Junior *et al.*, 2014).

Para a avaliação do ganho de umidade dos tecidos, considerou-se que quaisquer mudanças de densidade consistiam unicamente do aumento da massa de água. Os histogramas com a distribuição relativa da escala de cinza dos voxels em cada umidade foram obtidos pelo software CTan. Foram desconsiderados voxels de intensidade de cinza inferior a 25, normalmente representativos das regiões com ausência de tecidos (Bovik, 2009).

Para efeito de padronização, foram consideradas as quantidades relativas de voxels de uma dada escala de cinza ponderadas pelo número total de voxels obtidos pela varredura do aparelho.

As amostras foram coletadas para análise em intervalos pré-definidos de 1, 4, 15, 26 e 90 h durante o processo de hidratação. As sementes foram preservadas em ambiente hermeticamente fechado e submetidas a análise num período nunca superior a 24h. As amostras foram pesadas antes de cada análise para a garantia de manutenção da umidade. As análises foram realizadas em triplicata.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Caracterização Física

As dimensões medidas e calculadas para as sementes de Jequitibá-branco encontram-se listadas na Tabela 1.

Tabela 1: Dimensões das sementes de Jequitibá-branco secas e úmidas.

	X (kg/kg)	
	0,13	0,8
D _{Fm} (mm)	8,2 (±0,9)	7,9 (±0,8)
P (mm)	25,8 (±2,9)	25,0 (±2,7)
A (mm ²)	36,7 (±6,5)	33,9 (±5,6)
V (mm ³)	86,0 (±23,8)	73,2 (±18,5)
φ	0,7 (±0,10)	0,7 (±0,06)
E (mm)	3,7 (±0,30)	3,7 (±0,30)

Através dos dados obtidos foi possível observar que as sementes secas apresentam significativa uniformidade de tamanhos. Isso

pode ser constatado pelos baixos desvios calculados para as dimensões estudadas. Adicionalmente, o baixo desvio associado às medidas de diâmetro médio de Feret também sugere que as sementes apresentam formato homogêneo, não diferindo entre si em tamanho e em forma de maneira significativa.

Comparativamente às sementes secas, também se observou que a hidratação não promoveu mudanças significativas nas dimensões estudadas. Esse comportamento era esperado, uma vez que sementes de Jequitibá-branco possuem dispersão alada e têm alta resistência externa contra impactos mecânicos.

Além dessa forma de dispersão, as sementes também são distribuídas na natureza por macacos, o que sugere resistência também à ação digestiva desses animais. Com tecidos externos significativamente resistentes, o aumento de umidade se reflete primordialmente nas mudanças de densidade dos tecidos internos, sem reflexo expressivo no tamanho da semente.

Essa análise permitiu a elaboração de uma metodologia mais simples para a obtenção das imagens de micro-TC. Salvo diferenças naturais na distribuição e posição dos tecidos no interior da semente, a comparação de imagens entre sementes diferentes pode ser realizada, guardados os devidos cuidados mesmo que essa análise seja qualitativa.

Caso as sementes fossem morfológicamente distintas ou apresentassem mudança significativa do volume e da forma durante o processo de hidratação, as imagens de micro-TC para diferentes umidades deveriam ser obtidas utilizando a mesma semente, o que tornaria o processo muito mais longo e sujeito a erros, uma vez que a interrupção no processo de hidratação e transporte das sementes para a realização das imagens realizados sucessivas vezes poderia causar stress nos tecidos internos e mascarar os resultados almejados.

Dessa forma, considerando a uniformidade morfológica e física das sementes, optou-se por realizar a aquisição de imagens com sementes distintas em triplicata, cada uma em uma umidade específica.

Cinética de Hidratação

As curvas de hidratação das sementes de Jequitibá-branco nas temperaturas de 25, 35 e

45°C e os ajustes para o modelo considerando a difusividade efetiva constante estão ilustradas na Figura 1. As taxas de hidratação estão ilustradas na Figura 2.

A partir do ajuste pelo método dos mínimos quadrados, definiu-se os valores dos coeficientes de difusão líquida efetiva para as três temperaturas. Os valores ajustados de difusividade e o χ^2 estão indicados na Tabela 2.

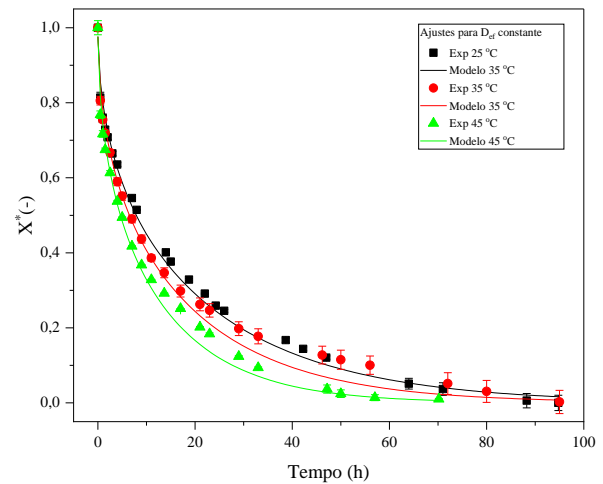


Figura 1: Cinética de hidratação para as temperaturas de 25, 35 e 45°C e ajuste do modelo para difusividade efetiva constante.

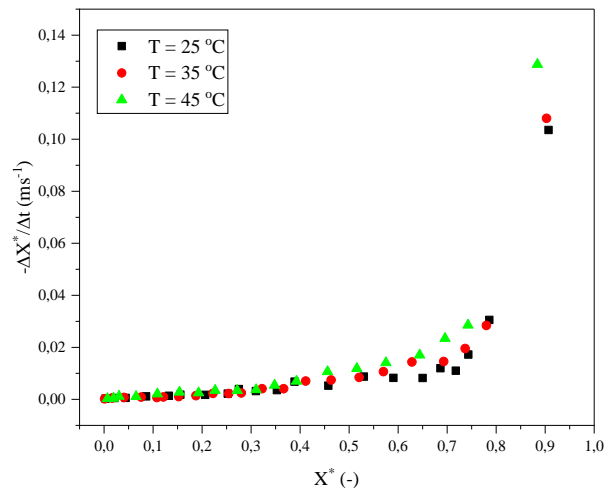


Figura 2: Taxa de hidratação em função da umidade adimensional para as temperaturas de 25, 35 e 45°C.

O ajuste do modelo proposto considerando difusividade constante foi feito com o auxílio do programa Excel, com aproximação da série de solução analítica por 25 termos. A partir de $N = 20$, o aumento do número de termos na série tem pouco efeito sobre a qualidade do ajuste e sobre a estimativa

da difusividade efetiva da hidratação (Felizardo *et al.*, 2021).

Tabela 2: Difusividade efetiva constante para diferentes temperaturas e a correspondente análise estatística.

T (°C)	D_{ef} (m ² s ⁻¹)	χ^2
25	1,64E-11	4,93E-4
35	2,06E-11	6,61E-4
45	2,70E-11	5,34E-4

Através dos dados experimentais foi possível observar discreta influência da temperatura no processo de hidratação. Como esperado, a hidratação ocorreu de maneira mais rápida na medida em que a temperatura aumentou.

Entretanto, o processo de hidratação até as condições em que o ganho de massa das sementes permaneceu praticamente inalterado demorou mais do que 70h na temperatura de 45°C e até 90h nas temperaturas de 25 e 35°C. Isso significa que a hidratação das sementes de Jequitibá-branco é um processo bastante lento quando comparado com sementes como o milho (Verma e Prasad, 1999).

Enquanto as sementes de milho atingem um platô de hidratação por volta de 20 minutos, sementes de Jequitibá-branco o fazem em 3,75 dias. Isso acontece, pois, as sementes de Jequitibá-branco possuem estruturas internas e externas que as protegem, tanto de impactos mecânicos, quanto do stress hídrico. Conforme dito anteriormente, a casca dessas sementes é significativamente resistente, o que resulta em um tempo considerável para a captação de água pela semente.

Esse fato também pode ser corroborado pelos baixos valores de difusividade efetiva calculados através do ajuste do modelo difusivo considerando-a constante. Ainda que a difusividade efetiva aumente na medida em que a temperatura aumenta, seus valores são da ordem de 10⁻¹¹, enquanto que para o milho, em situações similares, a difusividade efetiva é da ordem de 10⁻⁷ (Verma e Prasad, 1999).

Ainda conforme a Tabela 2, o χ^2 apresentou valores condizentes com um bom ajuste. Felizardo *et al.* (2021) obtiveram um bom ajuste para o modelo difusivo aos seus dados experimentais com valores de χ^2 da ordem de 10⁻³, enquanto que o presente trabalho

obteve valores da ordem de 10⁻⁴, ainda que o modelo subestime os valores de umidade adimensional no intervalo de tempo entre 15 e 50h.

Felizardo *et al.* (2021) sugerem a solução do modelo considerando a difusividade efetiva variável como uma forma de identificar efeitos mais sutis do processo a ser analisado. Ainda que o objetivo de se realizar o ajuste dessa forma esteja ligado à sua melhoria, dispor de informações que relacionam a difusividade efetiva com a umidade adimensional permitem uma análise mais aprofundada sobre os fenômenos que acompanham o processo de hidratação.

Ainda que a difusividade efetiva seja um parâmetro sem significado físico próprio, devido ao acúmulo de efeitos que ele representa, uma análise das suas variações pode contribuir de maneira significativa para a observação de impactos causados pelo transporte de água no interior das sementes.

Os ajustes realizados conforme sugerido por Felizardo *et al.* (2021) estão ilustrados na Figura 3. A Figura 4 apresenta as variações da difusividade efetiva em função da umidade adimensional. A Tabela 3 apresenta a análise estatística do ajuste.

Através da Tabela 3 foi possível observar que a qualidade do ajuste para o modelo considerando a difusividade efetiva variável foi superior ao ajuste para o modelo com difusividade efetiva constante. Houve diminuição no valor de χ^2 para todas as temperaturas estudadas. O coeficiente de correlação também foi superior em todas as temperaturas avaliadas.

Tabela 3: Análise estatística para o ajuste do modelo difusivo considerando difusividade efetiva variável.

T (°C)	χ^2
25	2,64E-4
35	2,23E-4
45	2,82E-4

Na Figura 4, observamos um comportamento mais sensível da difusividade em função do adimensional de umidade na temperatura de 45°C. Na medida em que a temperatura é aumentada de 25 para 35°C, há um aumento nos valores de difusividade efetiva

menos significativo do que o observado ao aumentarmos a temperatura de 35 para 45°C. Isso pode ter relação com o fato de que as temperaturas de 25 e 35°C são mais facilmente encontradas nas regiões onde o Jequitibá-branco germina. Temperaturas superiores, além de fornecerem mais energia para os processos de difusão da água no interior da matriz biológica da semente, podem ativar mecanismos de defesa da semente contra o stress térmico, diminuindo a resistência ao trânsito de água no seu interior para garantir a sobrevivência das estruturas germinativas e dos tecidos de reserva. Não é possível determinar, entretanto, se é o conjunto desses efeitos que resulta no comportamento observado ou se é apenas um deles individualmente, muito embora haja indícios de um efeito conjunto.

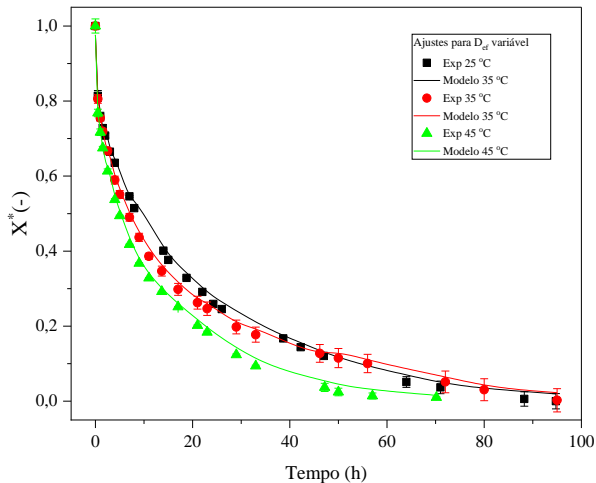


Figura 3: Cinética de hidratação para as temperaturas de 25, 35 e 45°C e ajuste do modelo para difusividade efetiva variável.

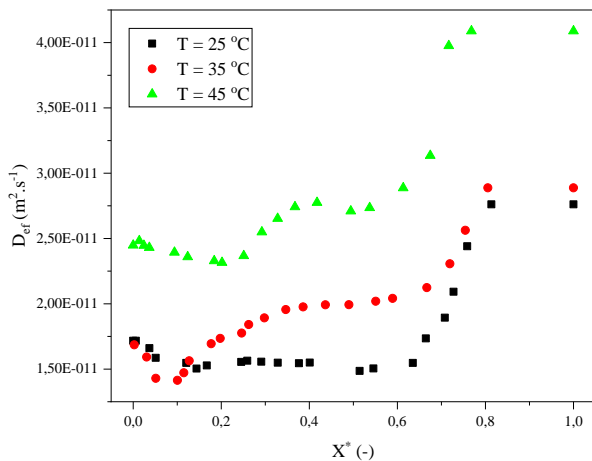


Figura 4: Variação da difusividade no processo de hidratação nas temperaturas de 25, 35 e 45°C.

A análise da Figura 4 também mostra que para as três temperaturas observadas, a semente apresenta uma etapa inicial com difusividade efetiva diminuindo de forma acentuada e aproximadamente linear até uma umidade adimensional de cerca de 0,6. Considerando que a umidade adimensional com valor 1 representa o fenômeno no seu ponto mais distante do equilíbrio, ou seja, com o teor de umidade mais baixo, essa diminuição da difusividade efetiva acontece devido à saturação de água na casca, antes que a água seja disponibilizada para os tecidos internos. Isso explicaria o rápido declínio nos valores de difusividade efetiva num intervalo de umidade adimensional relativamente pequeno. Essa análise está de acordo com o que se espera para sementes com tecidos externos resistentes a impactos mecânicos e hídricos, como é o caso das sementes de Jequitibá-branco.

Considerando a qualidade do ajuste e levando-se em conta que o modelo considera a ausência de gradientes significativos de umidade no interior da semente, pode-se concluir que essa etapa inicial está mais relacionada com a distribuição rápida de umidade na casca e não inviabiliza a condição de contorno adotada.

Caminhando para a condição de maior umidade, a semente passa por um estágio onde a difusividade efetiva permanece constante nos ensaios a 25°C, diminuindo de maneira menos acentuada para a temperatura de 35°C e mais intensa na temperatura de 45°C até uma umidade adimensional de 0,2.

De acordo com Hadas (2005), a absorção de água pelas sementes secas é caracterizada por três fases: a fase inicial – a fase de embebição – é caracterizada por um padrão de cinética de saturação; a segunda fase – a fase de transição – é caracterizada por uma taxa de absorção de água baixa a insignificante; e a terceira fase – a fase de crescimento – é caracterizada por um aumento rápido e exponencial da taxa de absorção de água, acompanhado pela emergência da radícula. As duas primeiras fases são observadas em sementes mortas, inertes e viáveis, enquanto a fase de crescimento é exclusiva de sementes viáveis para germinação.

Isso explica o comportamento observado a partir de uma umidade adimensional de 0,2

para a temperatura de 45 °C e 0,1 para as temperaturas de 25 °C e 35 °C, onde é possível observar uma tendência de aumento nos valores de difusividade efetiva. Esse aumento sugere o princípio da fase 3 descrita por Hadas (2005), muito embora esse mesmo comportamento não seja evidente no gráfico da Figura 2. Analisando unicamente a taxa de hidratação, não foi possível observar a formação da fase 3.

Considerando que o sucesso na germinação garante a produção de uma maior quantidade de mudas, empregar o ajuste do modelo difusivo com difusividade variável nos permite observar a umidade na qual os primeiros indícios da germinação acontecem, mesmo quando não há formação da radícula propriamente dita e não haja mudança expressiva no comportamento da taxa de hidratação. Essa análise pode nos levar à determinação das condições de umidade críticas para a germinação, além de permitir a análise de viabilidade das sementes, considerando que a fase 3 não acontece em sementes mortas ou com baixa viabilidade. Não foram encontrados na literatura estudos que relacionem a análise da difusividade efetiva com a viabilidade de sementes pela observação da formação da fase 3 do processo de hidratação. Isso pode indicar que a análise da difusividade efetiva nas condições propostas por este trabalho é promissora na avaliação, tanto da umidade crítica para germinação, quanto para a viabilidade de sementes.

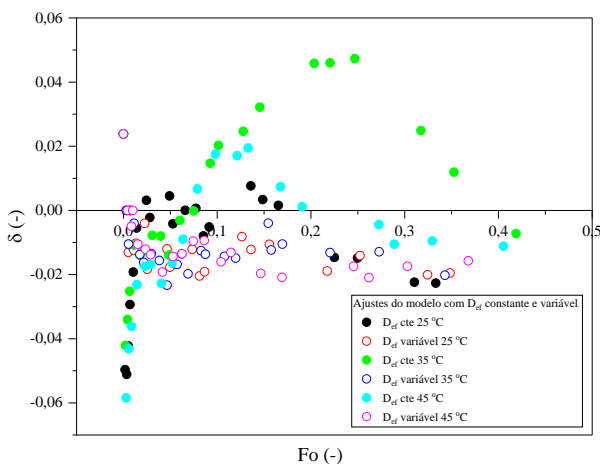


Figura 5: Gráfico da distribuição de resíduos para os ajustes com difusividade efetiva constante e variável em função de $Fo = D_{ef}.t/E$.

A Figura 5 ilustra a distribuição de resíduos para ambos os ajustes. Fica evidente a tendência na distribuição e resíduos para a condição de difusividade efetiva constante. Isso indica que apesar dos baixos valores de χ^2 , a tendência nos desvios permite avaliar que o modelo que supõe difusividade efetiva constante não é adequado para representar os dados experimentais. De forma diferente, a distribuição de resíduos para a consideração de difusividade efetiva variável mostra, tanto uma menor amplitude nos resíduos, como uma melhor aleatoriedade, permitindo inferir que essa análise é mais adequada do que a primeira.

Imagens de micro-TC

A semente de Jequitibá-branco é do tipo obovado, plano-convexo; extremidade micropilar aguda; provida de fina asa unilateral papirácea, com expansão da testa de comprimento variável na região da rafe e pré-rafe, contendo feixe funicular; micrópila situada na extremidade aguda do núcleo seminífero e hilo pequeno, lateral, localizado no terço final do dorso da asa; chalaza marrom-escuro localizada no ápice da semente. A superfície da semente é rugosa, opaca, de coloração marron-clara, com estrias longitudinais. Embrião axial longo, constando do eixo hipocótilo-radícula, com cotilédones amarelo-claros e foliáceos, imbricados, finos, amplamente expandidos, plicados, formando pregas bastante acentuadas. (Rêgo e Possamai, 2001).

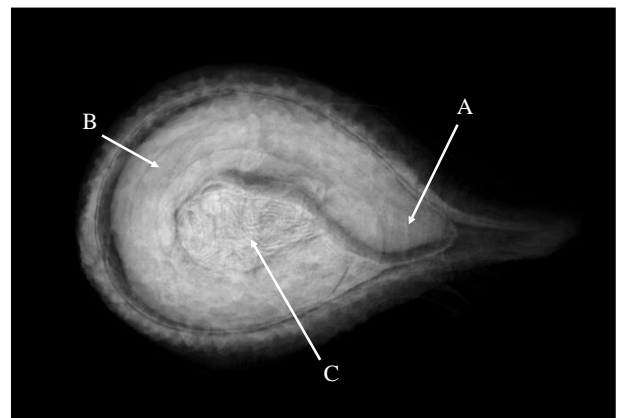


Figura 6: Imagem de micro-TC em corte transversal no plano central para uma semente de Jequitibá-branco representada em escala de cinza. A: feixe vascular; B: eixo hipocótilo-radicular; C: endosperma primário.

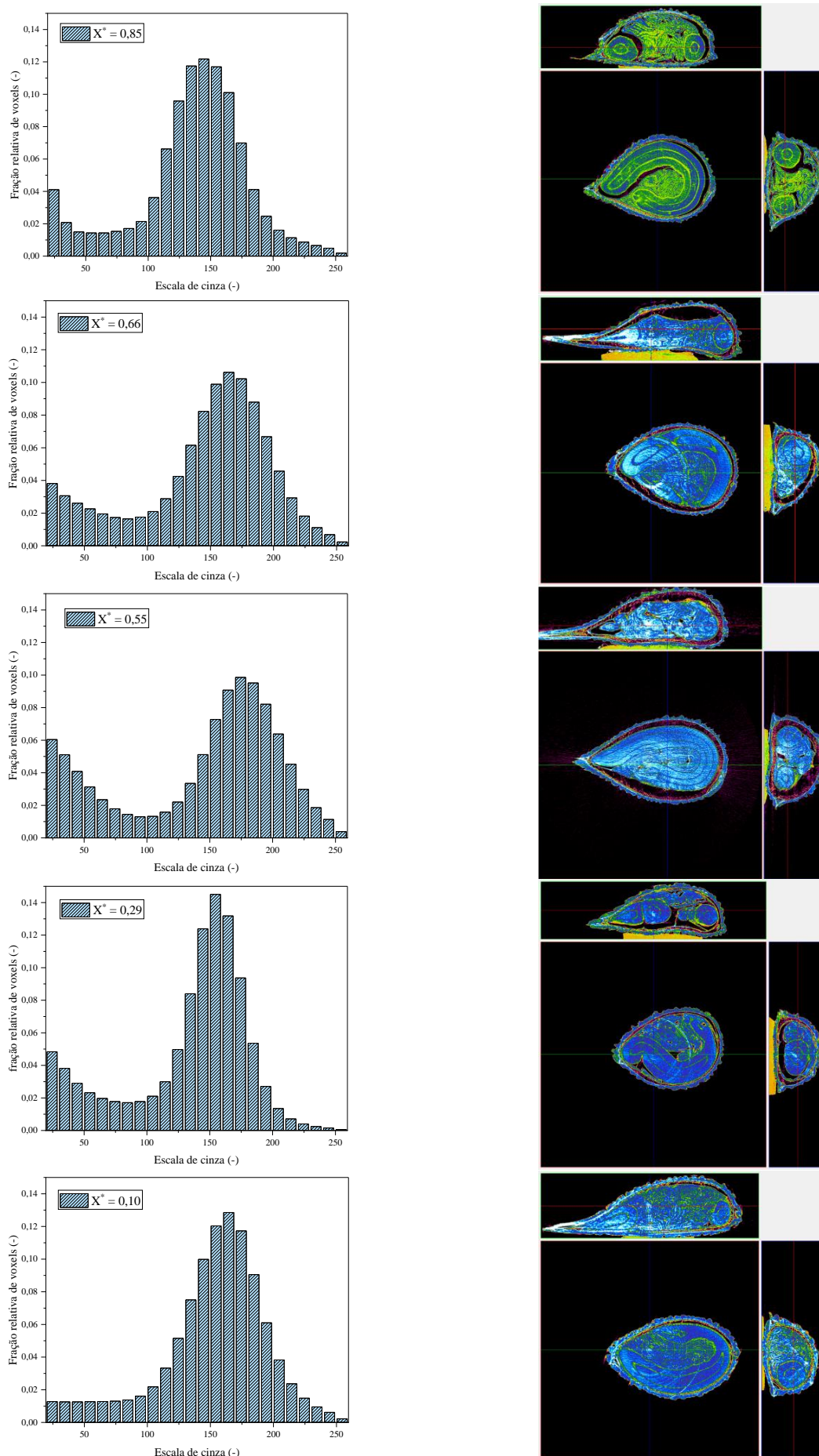


Figura 7: Distribuição da escala de cinza em diferentes umidades (esquerda); imagens de micro-TC transversais e longitudinais do plano central em diferentes umidades (direita).

A Figura 6 apresenta uma imagem em escala de cinza de um corte transversal obtida do plano central de uma semente de Jequitibá-branco.

A Figura 7 fornece um panorama das distribuições normalizadas dos valores de escala de cinza para as imagens obtidas por micro-TC das sementes em diferentes níveis de hidratação. As imagens foram submetidas a contraste de cor para visualização das diferentes densidades dos tecidos. A densidade dos tecidos aumenta de acordo com a sequência cromática: preto, violeta, rosa, vermelho, laranja, amarelo, verde azul, anil e branco.

Nas imagens em contraste foi possível observar a presença de regiões da semente com ausência de tecidos internos. O que seria um problema severo em sementes agrícolas como o milho e a soja, não representa risco para sementes de Jequitibá-branco. Por apresentar distribuição anemocórica e possuir um endosperma primário relativamente pequeno em comparação ao eixo hipocótilo radicular, a presença de espaços vazios no interior da semente não resulta em inviabilidade germinativa, mas aumenta a proteção contra impactos mecânicos, além de promover espaço para o intumescimento dos tecidos com consequente ganho de densidade e volume, impedindo que a resistência externa da casca atue comprimindo os tecidos internos durante o processo de hidratação com possíveis impactos deletérios sobre a estrutura interna da semente.

A presença desses espaços é particularmente evidente nas sementes que correspondem às umidades relativas de 0,85 a 0,29, com especial destaque para a semente avaliada na umidade de 0,66. Mesmo com uma grande depressão na sua parte superior, a estrutura interna pode ser observada sem quaisquer tipos de injúrias que promovam a inviabilidade do embrião. Apenas na umidade relativa de 0,1 é possível observar que os tecidos internos da semente preencheram eventuais espaços vazios entre eles devido à hidratação.

As tonalidades predominantemente verdes observadas para $X^*=0,85$ indicam regiões dos tecidos internos com menor densidade quando comparadas às áreas em azul. Foi possível observar para a semente ainda seca que a distribuição de umidade no interior da

semente é heterogênea e o meio não é isotrópico. O correspondente histograma para a distribuição das tonalidades de cinza indica uma maior concentração de voxels na região cinza entre 130 e 160. Foi possível observar também que parte dos tecidos que constituem o hipocótilo radicular apresentam densidades já na faixa do azul, portanto, mais densas que as regiões ocupadas pelo endosperma primário.

A hipótese de que estas sementes constituem um meio isotrópico e que o transporte de água se faz de maneira homogênea no seu interior é refutada imediatamente na primeira comparação em relação ao histograma e a imagem em contraste para $X^*=0,66$. Nessa etapa, a hidratação promove evidente aumento na densidade do endosperma primário. Mesmo que o eixo hipocótilo radicular apresente mudança de densidade observável comparativamente à imagem para $X^*=0,85$, quem governa o processo de absorção de água são os tecidos que constituem o endosperma primário. Além disso, o histograma da escala de cinza nos mostra que há um deslocamento para a direita, indicando um aumento no número de voxels com densidade maior, caracterizando um aumento médio na densidade da semente como um todo.

Essa observação colocaria em xeque as condições adotadas para a solução do modelo difusivo. Entretanto, considerando que o ajuste empregando difusividade efetiva variável apresentou bons resultados do ponto de vista estatístico, ainda que o meio não seja de fato homogêneo e isotrópico, essa consideração não promove imprecisões significativas no ajuste a ponto de inviabilizar o emprego do atual modelo.

Destaca-se também um efeito inesperado observado no histograma para $X^*=0,29$, comparativamente ao imediatamente anterior para $X^*=0,55$. Ocorre uma diminuição no número de voxels de maior densidade, notadamente na região de escala de cinza entre 200 e 250. Considerando que esse comportamento se repetiu em todos os histogramas provenientes da análise de imagens das triplicatas nessa faixa de umidade, descartou-se a possibilidade de erro experimental. Conforme já mencionado, ainda que as sementes sejam distintas, a análise das suas características morfológicas fornece

subsídios para que a distribuição dos voxels possa ser comparada do ponto de vista qualitativo. Desse modo, ocorre a diminuição da densidade de alguns tecidos e um ganho potencializado de densidade representado pelo número de voxels na região da escala de cinza entre 130 e 170.

Hadas (2005) nos sugere uma possível explicação para este comportamento. Segundo o autor, durante a fase de transição (fase 2), também conhecida como “fase de pausa”, a taxa de hidratação da semente, a taxa de respiração e a morfologia aparente permanecem quase inalteradas. No entanto, uma variedade de processos metabólicos é ativada, e diferenças nos níveis de atividade desses processos e em sua ordem de ocorrência têm sido observadas entre sementes de diferentes espécies e entre sementes que atingiram diferentes níveis de hidratação. Portanto, a ativação dos processos metabólicos na fase 2 pode ter contribuído para uma diminuição na densidade de alguns tecidos, mesmo com um aumento da umidade total.

A identificação do teor de umidade que desencadeia os processos metabólicos de germinação em uma dada espécie é de grande importância no sucesso do processo germinativo. Ainda segundo Hadas (2005), quaisquer condições ambientais adversas que levem ao ressecamento das sementes, por exemplo, por submetê-las ao estresse hídrico, ou redução da área de contato semente-solo e, assim, influenciar seus níveis de hidratação, podem prejudicar, retardar ou mesmo inibir a germinação.

Por se tratar de um efeito biológico, modelos de transferência de massa não são capazes de identificar essas mudanças, uma vez que do ponto de vista macroscópico a semente continua a ganhar massa, muito embora esse ganho de massa não se traduza em mudança uniforme de densidade nos tecidos internos da semente. Nesse sentido, o estudo da cinética de hidratação associado à análise de imagens por micro-TC podem ser ferramentas promissoras na análise de fenômenos que não podem ser medidos ou observados apenas pelo conhecimento sobre transferência de massa, mas que necessitam da análise biológica do fenômeno. Essa análise é particularmente

importante em processos como o condicionamento osmótico de sementes.

Segundo Nascimento (2004), o condicionamento osmótico (seed priming), consiste em uma hidratação controlada das sementes, suficiente para promover atividades pré-metabólicas, sem, contudo, permitir a emissão da raiz primária. Em geral, o tratamento consiste em embeber as sementes em uma solução osmótica por um determinado período e fazer em seguida uma secagem para o grau de umidade inicial.

Segundo Arun *et al.* (2022), o condicionamento de sementes permite o desenvolvimento dos processos metabólicos necessários para melhoria da taxa de germinação e a qualidade da semente através do gerenciamento do teor de umidade e a controle de temperatura de forma a conduzir a semente através dos processos bioquímicos iniciais dentro dos estágios iniciais de germinação, mas impedindo a transição da semente para a germinação completa. Segundo os autores, isso garantirá melhor emergência em campo e resistência a doenças sob várias condições adversas. O objetivo do priming é reduzir o tempo de germinação e melhorar o padrão e a porcentagem de germinação em condições ambientais desfavoráveis.

Por fim, podemos também observar que em nenhum nível de hidratação a semente sofreu qualquer injúria em seus tecidos internos, e que na faixa de temperatura estudada, o processo de hidratação não compromete a integridade dos tecidos internos.

CONCLUSÕES

Podemos concluir que o modelo difusivo considerando a difusividade efetiva variável representou melhor o comportamento da cinética de hidratação para sementes de Jequitibá-branco na faixa de temperatura estudada.

A análise das variações da difusividade efetiva associada à análise de imagens de micro-TC se mostrou útil para a compreensão dos mecanismos físicos da hidratação juntamente com os aspectos metabólicos. A associação das técnicas também se mostrou promissora em eventuais estudos de condicionamento osmótico de sementes.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o inestimável auxílio da EMBRAPA Agropecuária de São Carlos, que permitiu a aquisição de imagens de micro-TC, sem as quais o presente trabalho não teria sido possível.

NOMENCLATURA

A	área (mm ²)
D _{ef}	difusividade efetiva (m ² s ⁻¹)
D _{Fm}	diâmetro médio de Feret (mm)
E	espessura (mm)
F _o	número de Fourier (-)
K	número de observações (-)
n	número de termos (-)
nP	número de parâmetros ajustados (-)
P	perímetro (mm)
r	coordenada radial (mm)
R ²	coeficiente de correlação (-)
t	tempo (h)
V	volume (mm ³)
X	umidade em base seca (kg/kg)
X*	umidade adimensional (-)
X _{est} *	umidade estimada (-)
X _{obs} *	umidade observada (-)
X ₀	umidade inicial b.s. (kg/kg)
X _{eq}	umidade de equilíbrio b.s. (kg/kg)
δ	resíduos (-)
φ	esfericidade (-)
χ ²	chi-quadrado (-)

REFERÊNCIAS

- ARUN, M. N.; HEBBAR, S. S.; BHANUPRAKASH, B.; SENTHIVEL, T.; NAIR, A. K.; PADMAVATHI, G.; PANDEY, P.; SINGH, A. (2022), Seed Priming: The Way Forward to Mitigate Abiotic Stress in Crops. *In: Plant Stress Physiology - Perspectives in Agriculture*.
- BOVIK, A. C. (2009), Basic gray level image processins. *In: The Essential Guide to Image Processing*, Academic Press, p.43-68.
- CARVALHO, P. E. R. (2003), Jequitibá-branco. Circular técnica n.73. Embrapa, Colombo, p.1-13.
- CHUDNOFF, M. (1984), Tropical timbers of the world. Agriculture Handbook, 607. Madison: USDA. Forest products Laboratory, 26p.
- CRANK, J. (1975), The mathematics of diffusion. Oxford University Press, 2 ed. London, 424p.
- CUNNINGHAM, S. E.; MCMINN, W. A. M.; MAGEE, T. R. A.; RICHARDSON, P. S. (2008), Effect of processing conditions on the water absorption and texture kinetics of potato. *Journal of Food Engineering*, v. 84, n. 2, p.214–223.
- FELIZARDO, M. P.; MERLO, G. R. F.; MAIA, G. D. (2021), Modeling drying kinetics of *Jacaranda mimosifolia* seeds with variable effective diffusivity via diffusion model. *Biosystems Engineering*, v. 205, p. 234-245.
- GOMES-JUNIOR, F. G.; VAZ, C. M. P.; CICERO, S. M.; JORGE, L. A. C. (2014), Procedimentos para avaliação da estrutura de sementes de soja e milho por microtomografia computadorizada de raios X. *Anais do Simpósio Nacional de Instrumentação Agropecuária*, p.621-624 São Carlos-SP.
- HADAS, A. (2005), Germination and seedling establishment. *Encyclopedia of Soils in the Environment*, Elsevier, p.130-137.
- KAYMAK-ERTEKIN, F. (2002), Drying and Rehydrating Kinetics of Green and Red Peppers. *Journal of Food Science*, v. 67, n. 1, p.168-175.
- LENHARD, D. C.; GARCIA, C. C.; CIOLIN, I. H. (2016), Cinética de reidratação de cranberries em leite e água. *Anais do XXI Congresso Brasileiro de Engenharia Química*. Fortaleza, Ceará. Anais eletrônicos.
- LISBÔA, J. F.; SILVA, J. N.; CAVALCANTI, M. T.; SILVA, E. M. C. A.; GONÇALVES, M. C. (2015), Análise da hidratação de grãos de alpiste. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* v.19, n.3, p.218–223.
- NASCIMENTO, W. M. (2004), Condicionamento osmótico de sementes de hortaliças. Embrapa Hortaliças, Brasília. Circular técnica, 11 p.
- RECORD, S. J.; HESS, R. W. (1972), Timbers of the new worlds: use and abuse of

America's nature resources. New York.
Arno Press, 640p.

- RÊGO, G. M.; POSSAMAI, E. (2001),
Recomposição Florestal: Cultivo do
Jequitibá-Rosa (*Cariniana legalis*).
Circular Técnica n. 25. EMBRAPA, p.27.
- RESENDE, O.; CORRÊA, P. C. (2007),
Modelagem matemática do processo de
hidratação de sementes de feijão. Acta
Sci. Agron. Maringá, v. 29, n. 3, p. 373-
378.
- VERMA, R. C., PRASAD, S. (1999), Kinetics
of absorption of water by maize grains.
Journal of Food Engineering, v. 39, n. 4,
p. 395–400.