

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA**

Gabriel Duarte da Silva

**PROCESSAMENTO DE DADOS EXPERIMENTAIS PARA ESTUDO DE  
SECAGEM: DESENVOLVIMENTO DE PROGRAMA EM PYTHON E  
ANÁLISE DE DADOS DA SECAGEM DE MINÉRIO DE MANGANÊS**

SÃO CARLOS -SP

2025

GABRIEL DUARTE DA SILVA

PROCESSAMENTO DE DADOS EXPERIMENTAIS PARA ESTUDO DE SECAGEM:  
DESENVOLVIMENTO DE PROGRAMA EM PYTHON E ANÁLISE DE DADOS DA  
SECAGEM DE MINÉRIO DE MANGANÊS

Trabalho de conclusão de curso  
apresentado ao Departamento de  
Engenharia Química da  
Universidade Federal de São  
Carlos.

Orientador: Prof. Dr. Thiago  
Faggion de Pádua

SÃO CARLOS -SP

2025

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia

Departamento de Engenharia Química

Folha de aprovação

Assinatura dos membros da comissão examinadora que avaliou e aprovou a Defesa de conclusão de curso do candidato Gabriel Duarte da Silva, realizada em 08/12/2025:

---

Prof. Dr. Thiago Faggion de Pádua

Universidade Federal de São Carlos

---

Prof. Dr. Monica Lopes Aguiar

Universidade Federal de São Carlos

---

Prof. Dr. Rodrigo Béttega

Universidade Federal de São Carlos

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela minha vida e por toda saúde e proteção comigo e aos meus familiares. Por todas as bênçãos nos bons momentos e por me carregar nos momentos mais difíceis. Deus é bom o tempo todo, o tempo todo Deus é bom

À toda minha família, em especial minha Mãe Dilma, meu pai João Bosco, minha Irmã Gabrielli e meu sobrinho Eduardo. É impossível eu receber mais amor do que já recebo de vocês. Sou muito grato por ter vocês na minha vida. Muito obrigado por tanto amor e carinho. Vocês são a melhor família do mundo. Amo vocês.

A todos os professores que tive durante minha trajetória, por toda contribuição e dedicação em suas profissões e por todo compartilhamento de conhecimento que fez ser possível eu estar aqui hoje. Em especial, agradeço ao Prof. Thiago, ao qual tive a honra de ser aluno e orientado, por todos os ensinamentos, e por toda atenção e compreensão comigo durante minha pesquisa de IC e o trabalho de graduação.

A todos meus amigos por todas as risadas, apoios e momentos bons vividos. Com vocês toda a graduação foi mais leve e divertida, sou muito grato por cada momento que vivi com cada um. Obrigado por tudo.

Por fim, a todos que de alguma forma estiveram comigo e fizeram eu me tornar quem sou hoje, meu muito obrigado.

## RESUMO

A secagem é uma operação unitária essencial em diversos processos industriais. Para o dimensionamento eficiente de secadores em escala industrial, estudos em escala de bancada e piloto são fundamentais, pois permitem obter informações cinéticas específicas dos produtos, como os coeficientes de película associados aos fenômenos de transporte de calor e massa. No entanto, os dados experimentais obtidos em sistemas de secagem frequentemente apresentam ruídos e incertezas, muitas vezes decorrentes de limitações da metodologia empregada na coleta, como oscilações na rede elétrica ou interferências durante a pesagem, causadas por vibrações e instabilidades dos equipamentos. Diante disso, este trabalho teve como objetivo o desenvolvimento de um programa voltado ao processamento de dados experimentais provenientes de uma estufa de convecção forçada, visando ao tratamento dos dados e à extração de informações cinéticas relevantes para o estudo da secagem. Para teste do programa, foi utilizado um ensaio de secagem de minério de manganês, sendo também realizada uma análise dos resultados obtidos com a ferramenta desenvolvida. Foram construídas rotinas em Python para o tratamento e análise dos dados de balança, capazes de: gerar curvas de secagem; comparar os dados experimentais com modelos teóricos difusivos e com dados da literatura; aplicar filtros aos dados; e armazenar os resultados. O programa foi complementado por material textual e vídeos instrucionais para facilitar sua aplicação. O teste com o minério de manganês demonstrou a eficiência da ferramenta na visualização das etapas de secagem. Foi identificado um valor de umidade crítica entre 0,10 e 0,15 kg água/ kg sólido seco para esferas de manganês de 21 mm, secas a 90 °C. Os modelos teóricos de Lewis e Page se mostraram adequados para descrever a taxa de secagem, apresentando coeficientes de correlação superiores a 0,98.

**Palavras chaves:** Secagem; Processamento de dados; modelos de secagem; minério de manganês

## ABSTRACT

Drying is an essential unit operation in various industrial processes. For the efficient design of dryers on an industrial scale, bench and pilot-scale studies are fundamental, as they provide specific kinetic information about the products, such as the film coefficients associated with heat and mass transfer phenomena. However, experimental data obtained in drying systems often exhibit noise and uncertainties, frequently resulting from limitations in the methodology used for data collection, such as fluctuations in the electrical network or interference during weighing caused by vibrations and equipment instability. In this context, the objective of this work was to develop a software aimed at processing experimental data from a forced convection oven, focusing on data treatment and the extraction of relevant kinetic information for the study of drying. For testing the program, drying data of manganese ore were applied, and an analysis of the results obtained with the developed tool was also performed. Python routines were created for the processing and analysis of balance data, capable of: generating drying curves; comparing experimental data with theoretical diffusion models and with literature data; applying filters to the data; and storing the results. The program was complemented with textual material and instructional videos to facilitate its use. The test with manganese ore demonstrated the efficiency of the tool in visualizing the drying stages. A critical moisture content value between 0.10 and 0.15 kg water/kg dry solid was identified for 21 mm manganese spheres, dried at 90 °C. The theoretical models of Lewis and Page proved to be suitable for describing the drying rate, showing correlation coefficients greater than 0.98.

**Keywords:** Drying; Data processing; Drying models; Manganese ore

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

<b>Figura 1.</b> Curva de secagem com umidade em função do tempo. ....	8
<b>Figura 2.</b> Curva de secagem com taxa de secagem em função da umidade. ....	9
<b>Figura 3.</b> Curvas de secagem relacionadas a higroscópica do material. ....	10
<b>Figura 4.</b> Ampliação na curva de dados de massa em função do tempo: (a) sem zoom, (b) com zoom. ....	14
<b>Figura 5.</b> Taxa de secagem em função da umidade sem aplicação de filtros.....	15
<b>Figura 6.</b> Exemplo genérico de funcionamento de médias móveis. ....	16
<b>Figura 7.</b> Exemplo de aplicação de média móvel simples.....	17
<b>Figura 8.</b> Exemplo de aplicação de média móvel exponencial.....	18
<b>Figura 9.</b> esferas de minério de manganês. ....	20
<b>Figura 10.</b> Sistema de secagem.....	21
<b>Figura 11.</b> Suporte das amostras. ....	22
<b>Figura 12.</b> Mensagem de aviso do programa.....	26
<b>Figura 13.</b> Primeira parte da interface em planilha (aba main). ....	30
<b>Figura 14.</b> Segunda parte da interface em planilha (aba main). ....	30
<b>Figura 15.</b> – Terceira parte da interface em planilha (aba PLOT). ....	31
<b>Figura 16.</b> Quarta parte da interface em planilha (aba Models). ....	32
<b>Figura 17.</b> Imagem de um dos vídeos instrucionais.....	33
<b>Figura 18.</b> Imagem de um dos resultados do programa em formato Excel. ....	34
<b>Figura 19.</b> Resultado gráfico do programa (Massa total em função do tempo).....	35
<b>Figura 20.</b> Umidade em base seca em função do tempo para o ensaio em 90°C e 21mm.....	36
<b>Figura 21.</b> -dX/dt em função do tempo com filtro de média móvel simples com janelas de 250, 500 e 1000.....	37
<b>Figura 22.</b> Comparação entre a janela 500 e 1000 utilizando a média móvel exponencial. ....	38
<b>Figura 23.</b> Comparação entre os filtros com a mesma janela. ....	39
<b>Figura 24.</b> Comparação entre janelas de 1000 e 3500 com o filtro de média móvel exponencial. ....	40
<b>Figura 25.</b> Destaque das etapas de secagem no plote -dX/dt em função da umidade em base seca. ....	41
<b>Figura 26.</b> Destaque das etapas de secagem no plote -dX/dt em função do tempo. ....	41

<b>Figura 27.</b> Região da Umidade Crítica ( $X_c$ ) através do gráfico $-dX/dt$ em função da Umidade em base .....	43
<b>Figura 28.</b> Região da Umidade Crítica ( $X_c$ ) através do gráfico de Umidade em base seca em função do tempo.....	44
<b>Figura 29.</b> Taxa de secagem em função da umidade em base seca para ensaio de 21mm a 70°C, 80°C e 90°C.....	45
<b>Figura 30.</b> Taxa de secagem em função da umidade em base seca para ensaio de 14mm a 70°C, 80°C e 90°C.....	45
<b>Figura 31.</b> Ajuste para modelo de Lewis no ensaio da amostra com 21mm e em 90°C.....	47
<b>Figura 32.</b> Ajuste para modelo de Page no ensaio da amostra com 21mm e em 90°C.....	48
<b>Figura 33.</b> Ajuste para modelo de Henderson e Pabis no ensaio da amostra com 21mm e em 90°C.....	48
<b>Figura 34.</b> Ajuste dos dados experimentais com modelo de difusividade efetiva de geometria esférica para ensaio de 21mm de diâmetro e em 70°C. ....	51

## LISTAS DE TABELAS

<b>Tabela 1.</b> Equações cinéticas empíricas .....	11
<b>Tabela 2.</b> Umidade crítica dos ensaios de secagem do minério de manganês em 21mm e 14mm de diâmetro e temperaturas de 70°C, 80°C e 90°C.....	46
<b>Tabela 3.</b> Taxa de secagem no período constante dos ensaios de secagem do minério de manganês em 21mm e 14mm de diâmetro e temperaturas de 70°C, 80°C e 90°C.....	47
<b>Tabela 4.</b> Resultados do modelo de Lewis. ....	49
<b>Tabela 5.</b> Resultados do modelo de Page. ....	49
<b>Tabela 6.</b> Resultados do modelo de Henderson e Pabis. ....	50
<b>Tabela 7.</b> Resultados dos ajustes em modelo de difusividade efetiva para cada ensaio. ....	51

## LISTAS DE SIGLAS

PPG-EQ	Programa De Pós-Graduação Em Engenharia Química
Mno <sub>2</sub>	Dióxido De Manganês
Mt	Milhões De Toneladas
TML	Transportable Moisture Limit
X	Umidade
$X_{b.s.}$	Umidade Em Base Seca
$X_{b.U.}$	Umidade Em Base Úmida
MR	Adimensional De Umidade
$D_{ef}$	Difusividade Mássica Efetiva
X <sub>c</sub>	Umidade crítica
X <sub>e</sub>	Umidade de Equilíbrio
MMS	Média Móvel Simples
MME	Média Móvel Exponencial
SMA	Simple Moving Average
EMA	Exponential Moving Average
mm	Milímetros
°C	Grau Celsius

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	<b>4</b>
2.1	O MANGANÊS.....	4
2.2	O TRANSPORTE DO MINÉRIO, SUA UMIDADE E SECAGEM. ....	5
2.3	SECAGEM: MECANISMOS E CURVAS.....	6
2.4	EQ. EMPÍRICAS DE CINÉTICA DE SECAGEM E MÉTODOS DE OTIMIZAÇÃO.....	10
2.5	DIFUSIVIDADE EFETIVA .....	11
2.6	RUÍDOS DOS DADOS DE SECAGEM MONITORADAS EM LINHA DE FILTRAGEM COM MÉDIAS MÓVEIS.....	13
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>19</b>
3.1	DADOS EXPERIMENTAIS E TESTES DE EXECUÇÃO.....	19
3.2	APLICATIVOS, LINGUAGEM, PROGRAMAÇÃO E BIBLIOTECAS. ....	19
3.3	MÉTODOS .....	20
3.3.1	O Minério.....	20
3.3.2	Secagem Em Estufa.....	20
3.4	TRATAMENTO DOS DADOS E CONSTRUÇÃO DO PROGRAMA. ....	22
<b>4</b>	<b>RESULTADOS</b> .....	<b>29</b>
4.1	A INTERFACE DO PROGRAMA.....	29
4.2	PASTA ZIP E ARQUIVOS AUXILIARES .....	32
4.3	ARQUIVOS RESULTADOS E IMAGENS DOS GRÁFICOS .....	33
4.4	FILTRAGEM E JANELAS. ....	36
4.5	ANÁLISE DOS PARÂMETROS DE SECAGEM.....	40
4.5.1	Etapas do Processo.....	40
4.5.2	Umidade Crítica .....	42

4.5.3	Ajustes com Equações Empíricas de Cinética de Secagem .....	47
4.5.4	Ajustes Com Modelo De Difusividade Efetiva Com Geometria Esférica .....	50
5	CONCLUSÃO .....	53
6	REFERÊNCIAS .....	54

# 1 INTRODUÇÃO

A secagem é uma operação unitária que envolve a retirada de substância(s) volátil(eis), muitas vezes água, causando a redução da massa do material em questão (MCCABE, et al., 1991). O produto da secagem é o material sólido seco em que objetiva-se a obtenção de uma umidade específica no sólido obtido. O processo é utilizado em diversas ocasiões e por várias razões, como para conservação, armazenamento e transporte. A secagem é uma das operações industriais mais usadas na prática industrial em diversos segmentos, tanto indústrias de madeiras, borrachas, couros, plásticos, celulose e alimentícia (COSTA, 2025). No contexto mineral, a secagem é especialmente importante devido às implicações diretas do teor de umidade na qualidade do minério, no desempenho operacional e nos custos energéticos e logísticos. Entre os minerais relevantes destaca-se o manganês, atualmente o quarto metal mais utilizado no mundo e um insumo essencial para a produção de ligas metálicas e aço, atuando como agente dessulfurante, desoxidante e endurecedor (DIAS; CAXITO, 2018; TANGSTAD, 2013). O Brasil, com mais de 30% das reservas mundiais conhecidas, desempenha papel estratégico no mercado global (COSTA M. R. M. et al., 2018).

Apesar disso, o teor de umidade no minério de manganês representa um desafio tecnológico significativo. Quando o material apresenta baixa umidade, há maior propensão à perda de finos por arraste, o que reduz o rendimento do processo e causa emissões de particulados que impactam a saúde ocupacional e o meio ambiente (CHAVES, 2012). Por outro lado, um minério excessivamente úmido apresenta problemas no manuseio, aumenta o consumo energético na pelletização, dificulta o transporte e reduz seu valor comercial devido ao maior peso associado à água (SOUZA et al., 2020). Assim, otimizar o processo de secagem é uma demanda constante da indústria mineral, com impacto ambiental, econômico e operacional.

Dessa forma, aprimorar modelos de previsão da taxa de secagem, compreender mecanismos difusivos e reduzir ineficiências operacionais é fundamental para aumentar a sustentabilidade e reduzir custos. Para isso, estudos experimentais em escala de bancada ou piloto são indispensáveis, fornecendo dados que subsidiam o dimensionamento e a melhoria de secadores. No entanto, a obtenção de dados experimentais confiáveis apresenta desafios. Em processos de secagem, é comum que a massa seja medida com intervalos curtos, utilizando

balanças ou sensores sujeitos a ruídos, vibrações, instabilidades térmicas e erros sistemáticos. Esses fatores geram séries temporais ruidosas que comprometem a determinação da taxa de secagem e, conseqüentemente, o ajuste de modelos cinéticos empíricos, semiempíricos ou fundamentados em mecanismos difusivos. Taxas calculadas por derivação numérica são particularmente sensíveis ao ruído, amplificando irregularidades e podendo gerar interpretações equivocadas sobre períodos de taxa constante ou decrescente. Para superar esses desafios, técnicas de tratamento e filtragem de dados tornam-se essenciais. Filtros com médias móveis, filtros exponenciais e outros métodos de suavização permitem remover ruídos preservando tendências físicas relevantes. Assim, a qualidade do tratamento de dados está diretamente ligada à precisão dos parâmetros cinéticos e das difusividades efetivas estimadas.

Outro ponto fundamental é que a compreensão do processo de secagem envolve a escolha adequada de modelos matemáticos. Modelos empíricos e semiempíricos — como Page, Henderson & Pabis, Lewis e Thompson — são amplamente utilizados devido à sua simplicidade e capacidade de representar dados experimentais com boa precisão. Já modelos fundamentados na segunda lei de Fick permitem uma descrição mais detalhada da difusão interna e fornecem parâmetros físico-químicos como a difusividade efetiva, útil no dimensionamento de equipamentos. Desta forma, a análise crítica e o processamento adequado dos dados são etapas indispensáveis para transformar resultados experimentais em conhecimento aplicável à engenharia de secadores.

Nesse sentido, o presente trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de um programa em linguagem de programação *Python* voltado ao processamento de dados experimentais provenientes de uma estufa de convecção forçada, visando ao tratamento dos dados e à extração de informações cinéticas relevantes para o estudo da secagem. Por processamento, entende-se: organizar os dados; fazer os cálculos básicos da secagem, como cálculo da massa da amostra, umidade em base úmida, umidade em base seca; desenvolver o cálculo da derivada da umidade em base seca pelo tempo ( $-dX/dt$ ); geração de gráficos para as curvas de secagem, como a de massa total pelo tempo, taxa de secagem em função da umidade; gerar curvas e ajuste de parâmetros com modelos empíricos da literatura e teóricos difusivos. Além disso, têm-se como objetivo a análise dos resultados obtidos com dados de secagem de minério de manganês testados no programa produzido, como a caracterização das etapas do processo de secagem, obtenção de parâmetros cinéticos relevantes, como a umidade crítica e difusividade efetiva e verificação da qualidade dos

ajustes realizados pelos modelos empíricos e difusivo. Parte do programa foi desenvolvido na iniciação científica pelo proponente ao diploma de graduação, enquanto complementações foram implementadas para apresentação desse trabalho de graduação. As principais atividades que ocorreram durante o trabalho de graduação envolveram a programação de ajuste de modelos cinéticos empíricos e semiempíricos a partir dos dados experimentais. Os dados utilizados foram obtidos da tese da doutoranda Letícia Ferraresi Hidalgo, do programa de pós-graduação em engenharia química (PPG-EQ) da UFSCar (Hidalgo, 2025).

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

Este capítulo apresenta a revisão bibliográfica e os fundamentos teóricos que dão suporte ao estudo da secagem do minério de manganês. São abordados aspectos gerais relacionados à importância do manganês, suas principais aplicações industriais, a distribuição das reservas e o contexto produtivo brasileiro. O capítulo também discute o transporte do minério a granel e a influência da umidade nas limitações operacionais e de segurança, introduzindo a secagem como etapa necessária do processo. Em seguida, são apresentados os conceitos fundamentais da secagem, incluindo os mecanismos de transferência de calor e massa, os tipos de umidade, as curvas características e os diferentes períodos do processo. Por fim, são descritos os modelos matemáticos aplicados à cinética de secagem, tanto empíricos quanto difusivos, bem como técnicas de filtragem de dados experimentais.

### 2.1 O MANGANÊS.

O manganês é o 12º minério mais abundante da crosta terrestre, sendo extraído predominantemente como minério pirolusita,  $MnO_2$ . (J.D.Lee, 1999). O minério atua principalmente na produção de ligas de aço, em especial ferroligas, uma vez que garantem melhores características ao aço (DIAS; CAXITO, 2018; TANGSTAD, 2013). Ao agir como um agente que retira oxigênio e enxofre, o manganês evita a formação de bolhas no aço, resultando em uma liga extremamente resistente. Isso é evidente no aço Hadfield, composto por aproximadamente 13% de manganês e 1,25% de carbono, famoso por sua excepcional resistência ao desgaste e ao impacto, sendo amplamente empregado em equipamentos como escavadeiras e britadeiras (J. D, Lee, 1999). Entre seus outros usos destacam-se: a fabricação de baterias, fertilizantes, fungicidas, rações, agentes de secagem de tintas, oxidantes para corantes e aromatizantes, além de aplicações ambientais, como no tratamento de água e controle da poluição do ar. (SAMPAIO et al, 2009)

As reservas mundiais de manganês em 2017 foram de 842,5 milhões de toneladas (Mt) de minério, distribuídas nos seguintes países: Brasil, com 272 Mt (32,3%); África do Sul, com 200 Mt (23,7%); Ucrânia, com 140 Mt (16,6%); Austrália, com 91 Mt (10,8%), entre outros (COSTA M. R. M. et al., 2018).

. No Brasil, as principais empresas produtoras foram: VALE S/A (MG e PA), Mineração Buritirama S/A (PA) e Mineração Corumbaense Reunida S/A (MS) que, juntas, totalizam 92% da produção (COSTA M. R. M. et al., 2018).

O Brasil exporta minérios principalmente para China, Estados Unidos, Japão, Argentina e Coreia do Sul. Entretanto, o manganês representa apenas 0,4% de toda a exportação mineral. (AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO, 2022.) Em relação a importações de minérios no geral, o Brasil recebe importações principalmente da China, Chile, Estados Unidos, Índia e Rússia. Do total, 3,1% dessas importações de minérios é referente ao manganês. (AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO, 2022.) Interessante notar que, embora o Brasil exporte muito mais que importe de minérios no geral, olhando especificamente para o manganês observamos que há uma maior importação (cerca de U\$ 488.036.802), do que exportação (cerca de U\$301.729.581), mesmo possuindo o maior número de reservas (COSTA M. R. M. et al., 2018).

## 2.2 O TRANSPORTE E UMIDADE DO MINÉRIO NA SECAGEM.

Pelas diversas aplicações e o grande mercado de produtos minerais, incluindo o manganês, o transporte é um tema relevante e possivelmente limitante em termos de ganhos financeiros. Nesse contexto, a umidade do material ganha destaque. Quando se trabalha em baixa umidade pode ocorrer perdas de particulado mais fino por meio de arraste (CHAVES, 2012). Esse é um problema relevante para lucratividade e por aspectos ambientais e de saúde. Por outro lado, além de maiores umidades prejudicarem operações de manuseio e pelletização, também há aumento dos custos de transporte devido ao peso da carga de água, além de diminuir seu valor comercial (SOUZA et al., 2020).

Por fim, existe uma restrição a ser respeitada para transporte do minério bruto a granel: o limite de umidade para transporte, ou TML (“*Transportable Moisture Limit*”, FIGUEIRA; LUZ; ALMEIDA, 2010). Devido a acidentes graves envolvendo o transporte marítimos de minérios entre 2007 e 2009 a IMO (*International Maritime Organization*), agência especializada da ONU responsável pela segurança na navegação, criou a *Transport Moisture Limit* (TML), que limita a umidade que pode ser transportada em produtos a granel, onde cada material apresenta um valor máximo para que se possa embarcar com segurança (IBRAM, 2021). A limitação é baseada em um fenômeno chamado ‘liquefação’, que pode acontecer quando a umidade da carga excede um certo limite, relacionado à saturação do material. Com os movimentos do navio, a carga pode se

deslocar, comprometendo a estabilidade da embarcação e potencialmente causando seu naufrágio (IBRAM, 2021).

Dentro desse contexto, faz-se necessária a secagem do minério de manganês, porém, a secagem de produtos minerais não é realizada. Os minerais secam em pilhas no pátio ao não atingirem as necessidades para embarque ou processamento, ocasionando perdas e paradas da unidade. Deste modo, o desenvolvimento da secagem se coloca como essencial para indústria da mineração, cuja maior dificuldade está na escala de processamento. Dessa forma, as próximas seções trazem uma revisão do processo de secagem e das curvas características. Assim, pretende-se contextualizar o tema para apresentar a análise de dados que foi implementada com o programa desenvolvido.

### 2.3 SECAGEM: MECANISMOS E CURVAS.

A secagem é uma operação unitária que envolve a retirada de substância(s) volátil(eis), muitas vezes água, causando a redução da massa do material em questão e obtenção de sólido seco como produto (MCCABE, et al., 1991). O processo é utilizado em diversas ocasiões e por várias razões, como para conservação, armazenamento e transporte. Reduções mecânicas de umidade costumam ser realizadas antes do processo em questão, até o momento em que a secagem se torna necessária. Dentro desse contexto, a secagem definida aqui se caracteriza como a redução de umidade promovida pela transferência de energia ao material (GEANKOPLIS, 2003).

Nesse contexto, têm-se um dos principais conceitos da secagem: a umidade do material a ser seco, na maioria das vezes um sólido úmido. Convencionalmente simbolizada pela letra 'X', a umidade do material é expressa em duas principais bases: umidade em base seca (X b.s.) e umidade em base úmida (X b.u.). A base estabelecida é o que vai definir que tipo de umidade que é considerada. A umidade é sempre a relação entre a massa de água (ou outro volátil) existente no material e outra massa de referência, indicando, portanto, uma razão de proporcionalidade. X b.s. é dada pela equação que segue:

$$X_{b.s.} = \frac{M_{\text{água}}}{M_{\text{sólido seco}}} \quad (1)$$

onde 'M<sub>água</sub>' é a massa de água presente na amostra e 'M<sub>sólido seco</sub>' é a massa da amostra seca, ou seja, é a massa da amostra sem água, obtida através de um processo descrito no tópico 3.3.2. do

trabalho.  $X_{b.s.}$  tem como unidade, portanto, kg água/ kg sólido seco (ou outro equivalente em massa).  $X_{b.u.}$  é dado pela equação que segue:

$$X_{b.u.} = \frac{M_{\text{água}}}{M_{\text{amostra total}}} = \frac{M_{\text{água}}}{M_{\text{água}} + M_{\text{sólido seco}}} \quad (2)$$

tendo como unidade kg água/ kg amostra total (KEEY, 1978).

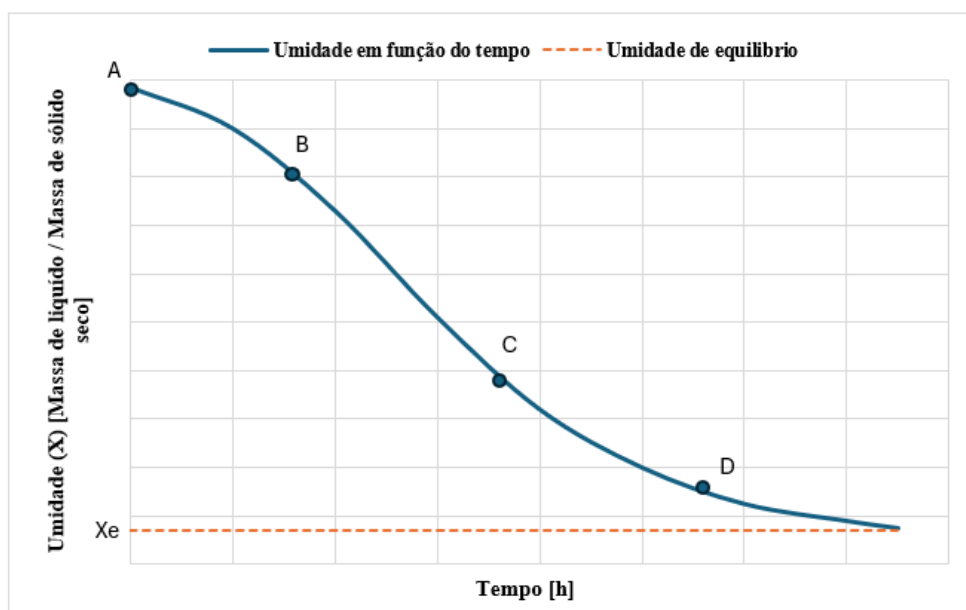
Ainda sobre a umidade, a mesma pode possuir dois estados no material, estando ela ligada ou não ligada. Estando ligada, ela não mais exerce toda sua pressão de vapor – aquela pressão de vapor referente a um líquido em contato com um gás, que é função apenas da temperatura, quando na ausência de curvatura da superfície. A umidade – quase sempre água – em um sólido pode tornar-se ligada pela sua retenção em capilares, solução nas estruturas celulares, solução com o sólido, adsorção física ou adsorção química na superfície do sólido. Umidade não ligada em um material higroscópico é a umidade além do equilíbrio com ar saturado. Grande parte da umidade de um material não higroscópico é umidade não ligada, enquanto a maior ou mesmo toda umidade em um material higroscópico costuma ser ligada (MUJUMDAR, 1995).

Quando um sólido é submetido ao processo de secagem, ocorre ao mesmo tempo dois fenômenos: a transferência de massa e a transferência de energia. A energia transferida para secagem costuma ser calor, principalmente no que se denomina secagem convectiva (ou direta), onde a energia para evaporação vem do próprio ar de secagem. Formas indiretas de secagem envolvem transferência de calor por outras fontes, como a radiação térmica de outras fontes, ou superfícies quentes (aquecimento de paredes com vapor, por exemplo), além de radiação eletromagnética em outras frequências, como o micro ondas. A transferência de massa está associada à remoção de umidade da mistura sólido-líquido, geralmente para uma corrente gasosa (convecção), que é representada pelo coeficiente convectivo de massa e de difusão. Durante a secagem em período de taxa constante, a transferência de calor está relacionada com a evaporação da água que ocorre na superfície do material (MARTINS et al., 2020). É importante destacar que o movimento da água para superfície por capilaridade pode estender o período de secagem em taxa constante. Já durante o período de taxa decrescente, a energia transferida tanto aquecerá o material quanto evaporará água. Muitos mecanismos de transporte estão relacionados ao processo de transporte de umidade interno ao sólido, como a difusão molecular, capilaridade e difusão líquida (ZOGZAS, 1996).

Através da análise de curvas de secagem, é possível observar que o processo ocorre em períodos com a taxa de secagem constante e períodos com a taxa decrescente. As curvas de taxa de secagem em função da umidade e a umidade em função do tempo são utilizadas para esse fim.

A Figura 1 mostra um esboço para a curva de secagem da umidade em função do tempo, onde os pontos de B a C são referentes ao período de taxa constante, C é chamado ponto crítico e indica o final do período de taxa constante.

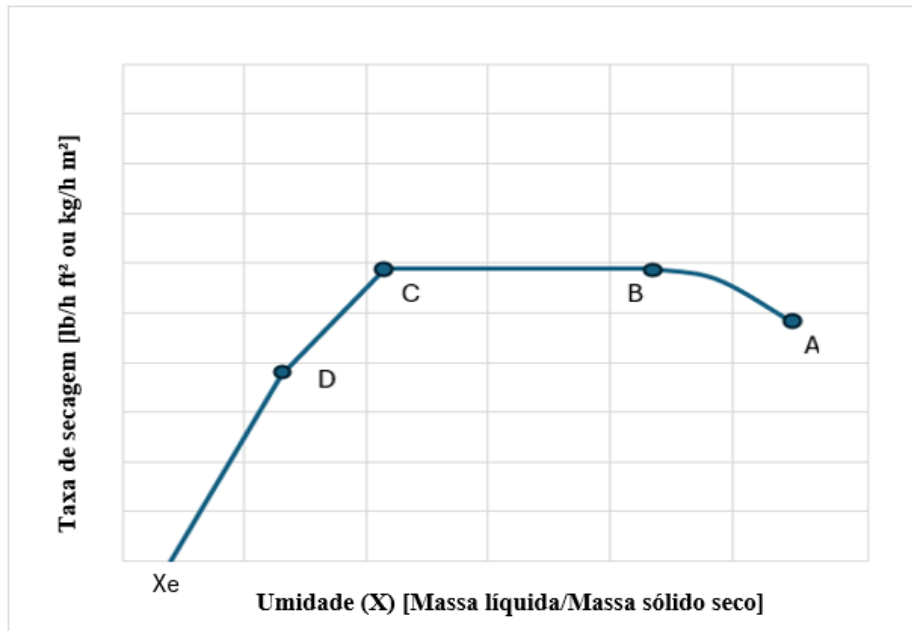
**Figura 1.** Curva de secagem com umidade em função do tempo.



Fonte: Adaptado de FOUST et al., 1982.

Outra curva de secagem bem comum para análise dos mecanismos envolvidos é a da taxa de secagem em função da umidade, como mostra a Figura 2. Destaca-se que de A até B há o período de aquecimento, pressupondo que o material úmido seja inserido no secador em temperatura menor do que a da secagem. Neste aspecto, destaca-se que o fluxo de umidade para fora do material costuma receber a denominação “taxa de secagem” em muito livros de uso comum (como em FOUST et al, 1982). A figura em questão apresenta exatamente o fluxo de umidade com tal denominação, em dimensões de  $[M_{\text{água}}/\text{Área Tempo}]$ . Porém, a taxa de secagem também pode se referir diretamente a taxa de remoção de umidade, em dimensão de  $[M_{\text{água}}/M_{\text{sól.seco}} \text{ Tempo}]$ , tal qual será definida na análise de dados do presente trabalho de graduação

**Figura 2.** Curva de secagem com taxa de secagem em função da umidade.

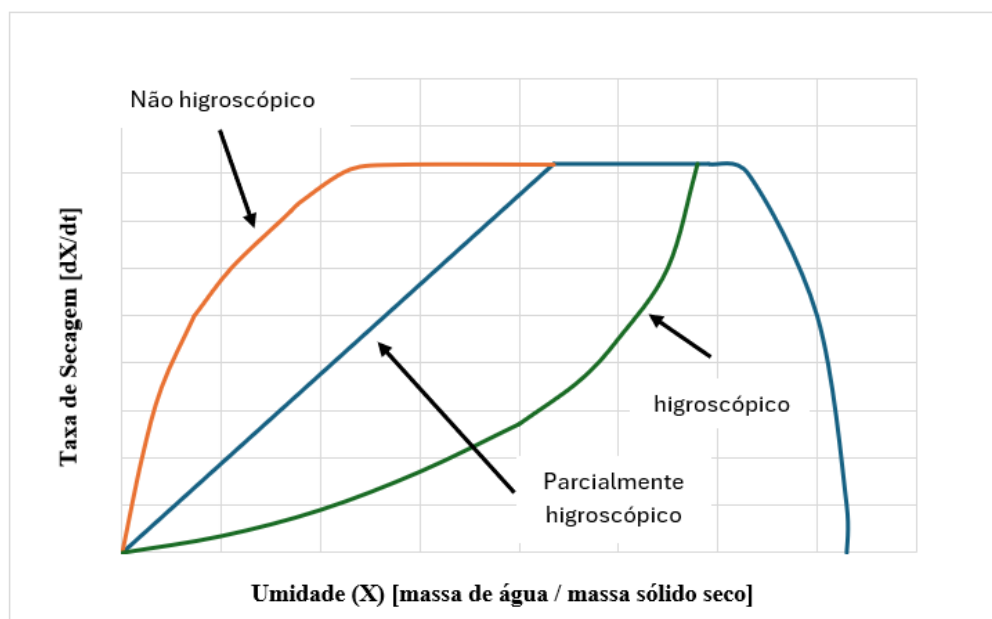


Fonte: Adaptado de FOUST et al, 1982.

O ponto C é o encontro entre os dois períodos de secagem e é chamado de umidade crítica, um parâmetro cinético importante na secagem. Abaixo da umidade crítica a curva de secagem passa a ser influenciada por diferentes condições físicas em comparação com o período de taxa constante. Depois do ponto crítico, surgem áreas na superfície do sólido que não estão mais saturadas com umidade. O calor, que antes era diretamente transferido para o líquido na superfície, agora precisa penetrar no interior do sólido, onde a umidade remanescente se encontra. A velocidade do ar (convecção externa) passa assim a não mais influenciar a taxa de secagem obtida quando em período decrescente. Em materiais porosos, muitos mecanismos de transporte estão presentes no período de taxa de secagem do período decrescente: de efeitos capilares e transporte do líquido à transporte de vapor, já que a umidade interna absorverá o calor, evaporará, e o vapor resultante se difundirá até a superfície, onde será capturado pela corrente de gás (MUJUMDAR, 1995).

A Figura 3 mostra a forma típica das curvas de taxa de secagem para o controle da camada limite mais o controle de difusão interna (OLIVER E ASHWORTH, 1982) que pode ser um indicativo do grau de higroscopicidade do material analisado.

**Figura 3.** Curvas de secagem relacionadas a higroscópica do material.



Fonte: Adaptado de OLIVER E ASHWORTH, 1982.

## 2.4 EQUAÇÕES EMPÍRICAS DE CINÉTICA DE SECAGEM E MÉTODOS DE OTIMIZAÇÃO

Diversos autores desenvolveram modelos matemáticos empíricos aplicados às curvas de secagem de seus experimentos, especialmente em ensaios com produtos agrícolas (INYANG; OBOH; ETUK, 2018). Esses modelos empíricos são frequentemente denominados de *equações cinéticas* e precisam que seus parâmetros sejam ajustados a dados experimentais para o material específico em estudo. Lewis (1921) foi um dos primeiros a propor uma equação exponencial simples para representar a taxa de secagem de sólidos, estabelecendo a base para diversos modelos subsequentes. Posteriormente, Page (1949) modificou o modelo de Lewis, introduzindo um expoente adicional que melhorava o ajuste aos dados experimentais de secagem de milho branco. Já Henderson e Pabis (1961) desenvolveram um modelo exponencial para prever a variação de umidade durante a secagem de grãos, considerando o efeito da temperatura sobre o coeficiente de ajuste da curva de secagem. A tabela 1 a seguir contempla as equações cinéticas com suas respectivas referências.

**Tabela 1.** Equações cinéticas empíricas

Equação	Autor
$MR = e^{-k t}$	Lewis
$MR = e^{-k t^n}$	Page
$MR = a e^{-k t}$	Henderson e Pabis

Fonte: INYANG; OBOH; ETUK, 2018.

Nessas equações,  $\kappa$  é a constante de secagem (parâmetro ajustável),  $t$  é o tempo de secagem,  $n$  e  $a$  são também constantes empíricas adimensionais de ajuste. O valor da constante de secagem  $\kappa$  tem influência da temperatura, da umidade, das condições e do método de secagem utilizados (INYANG; OBOH; ETUK, 2018). MR é um adimensional de umidade, dada pela equação que segue:

$$MR = \frac{X - X_e}{X_0 - X_e} \quad (3)$$

Onde  $X$  é a umidade do material em determinado instante de tempo  $t$ , enquanto  $X_0$  corresponde à umidade inicial da secagem e  $X_e$  é a umidade de equilíbrio, que é o ponto em que o material para de apresentar variações de umidade ao estar em contato com ar em umidade relativa constante.

Como o ajuste de equações cinéticas a dados experimentais foi implementado no programa desenvolvido durante o trabalho de graduação, tais equações são de suma importância para as atividades desenvolvidas. Além disso, as seções seguintes trazem modelos semi-empíricos para o período de taxa de secagem decrescente, que também foram implementados e testados durante o trabalho de graduação.

## 2.5 DIFUSIVIDADE EFETIVA

O deslocamento da água do interior do material até sua superfície durante a secagem pode ser descrito com base na Lei de Difusão de Fick (Equação 4). Essa equação é amplamente utilizada para representar os processos de secagem na fase de taxa decrescente, em que o fenômeno de transporte é controlado pela difusividade mássica efetiva ( $D_{ef}$ ) do material (GOUD et al., 2019; KOUHILA et al., 2020; REYES et al., 2013; ŞEVİK et al., 2019; SUHERMAN et al., 2020).

$$\frac{\partial MR}{\partial t} = D_{ef} \nabla^2 MR \quad (4)$$

Segundo Marinou-Kouris e Maroulis (2006), mesmo em sistemas com estrutura heterogênea, o transporte de umidade pode ser analisado por meio da equação 4, originalmente desenvolvida para meios homogêneos. Nessa perspectiva, considera-se o material como um meio contínuo, e as irregularidades internas são incorporadas por meio do parâmetro difusividade mássica efetiva. Em outras palavras, meios homogêneos são representados pela difusão ordinária no sólido, representada pelo coeficiente de difusão de Fick. Em contrapartida, meios porosos fazem uso de um coeficiente efetivo durante a secagem. Esse coeficiente reflete o fluxo difusivo da umidade dentro do material e sintetiza os efeitos de diferentes mecanismos de transporte (GOUD et al., 2019), já apresentados nas seções anteriores. De modo geral, a difusividade mássica efetiva depende de fatores como a temperatura, a umidade e a morfologia estrutural do material (MARINOS-KOURIS; MAROULIS, 2006). A transferência de massa por difusão pode ser ajustada conforme a geometria do sistema, sendo comum o ajuste para representar como placa plana ou esfera.

Quando o sistema de secagem é representado como um volume de controle esférico, a Equação 4 deve ser expressa em coordenadas esféricas. Para resolver o modelo de difusão transiente unidimensional nessa geometria, considerando que a interface está sempre em equilíbrio, adotam-se as hipóteses apresentadas por Crank (1975): A difusividade mássica efetiva ( $D_{ef}$ ) permanece constante durante todo o processo; o transporte de umidade ocorre exclusivamente na direção radial; a esfera possui raio fixo ( $R$ ) e não sofre variações dimensionais ao longo da secagem; a umidade inicial ( $X_0$ ) é uniforme em todo o material; a umidade de equilíbrio ( $X_e$ ) é atingida instantaneamente na superfície ( $r = R$ ), assumindo-se resistência convectiva desprezível; as condições do ar de secagem são mantidas constantes.

Com essas premissas, o balanço de massa acoplado à lei de difusão de Fick resulta na Equação 5, acompanhada das condições inicial e de contorno necessárias para o problema (CREMASCO, 2002):

$$\frac{\partial MR}{\partial t} = \frac{D_{ef}}{r^2} \left[ \frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \frac{\partial MR}{\partial r} \right) \right] \quad (5)$$

$$\begin{cases} MR(t = 0, \forall r) = 1 & (5.i) \\ MR(\forall t, r = R) = 0 & (5.ii) \\ \frac{\partial MR}{\partial r}(\forall t, r = 0) = 0 & (5.iii) \end{cases}$$

A condição inicial (5.i) define que o adimensional de umidade começa igual a 1 em toda a esfera no instante inicial. A condição de contorno da superfície (5.ii) estabelece que, no raio externo ( $r = R$ ), prevalece imediatamente a umidade de equilíbrio, resultando em  $MR=0$  para qualquer tempo. Já a condição no centro da esfera (5.iii) impõe um gradiente radial nulo, indicando que o centro é um extremo da função (nesse caso, ponto de máximo) e, portanto, a taxa de secagem ali é nula.

A solução analítica correspondente, apresentada na Equação 6 (para o raio  $R$ ), permite obter valores da difusividade efetiva ( $D_{ef}$ ) a partir do comportamento temporal do adimensional de umidade médio ( $MR$ ). Nessa expressão aparecem os termos  $n$  e  $N$ , que representam números inteiros positivos associados à série infinita da solução. Maiores detalhes quanto à solução podem ser obtidos em Cremasco (2002).

$$MR = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^N \frac{1}{n^2} \exp\left(\frac{-n^2\pi^2}{R^2} D_{ef} t\right) \quad (6)$$

## 2.6 RÚIDOS DOS DADOS DE SECAGEM MONITORADAS EM LINHA DE FILTRAGEM COM MÉDIAS MÓVEIS

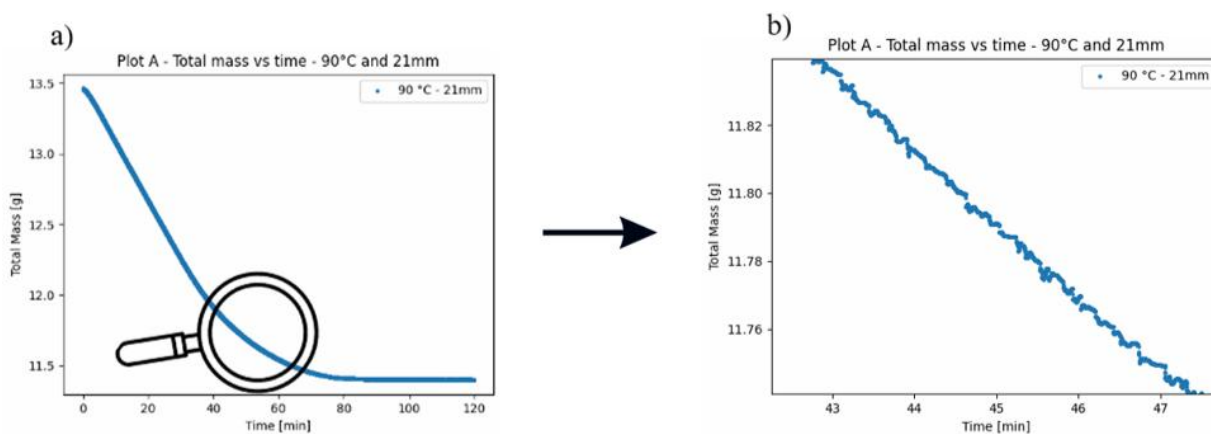
A presença de ruídos é uma característica inevitável em experimentos científicos, resultando de fatores intrínsecos aos instrumentos de medição, às condições ambientais ou ao próprio processo de amostragem. No tratamento dos dados, os ruídos desempenham papel ainda mais crítico, pois podem mascarar tendências, gerar interpretações equivocadas ou dificultar a identificação de relações significativas entre variáveis (BEVINGTON; ROBINSON, 2003.)

No caso de experimentos de secagem, é comum que os dados gerados em venham acompanhados de incertezas, reflexo de perturbações e limitações do sistema de medição. Flutuações no fornecimento de energia, perturbações ambientais e instabilidades mecânicas —

como vibrações durante a pesagem — podem comprometer a fidelidade dos registros e dificultar, ou até impossibilitar, a transformação dos dados em informações.

A figura 4 mostra a variação de massa total de uma amostra de manganês ao decorrer do tempo. Quando se restringe mais o intervalo das massas, é possível observar a oscilação presente nos dados.

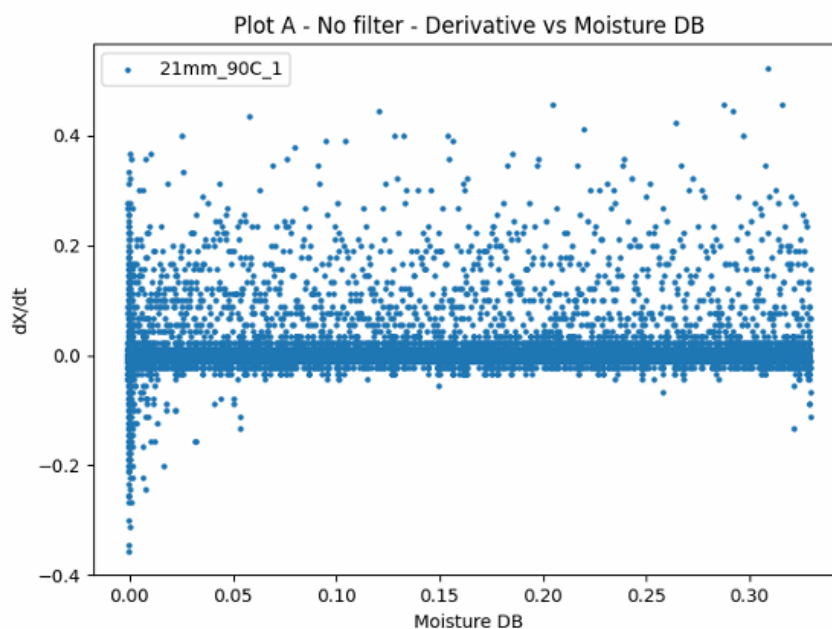
**Figura 4.** Ampliação na curva de dados de massa em função do tempo: a) sem zoom, b) com zoom.



Fonte: Autoria Própria

A figura 5 mostra a relação da taxa de secagem pela umidade em base seca, conceitos que estão discutidos em tópicos posteriores, da mesma amostra da Figura 5. Como pode-se observar, a oscilação aplicou um forte ruído aos dados, impossibilitando a análise.

**Figura 5.** Taxa de secagem em função da umidade sem aplicação de filtros.

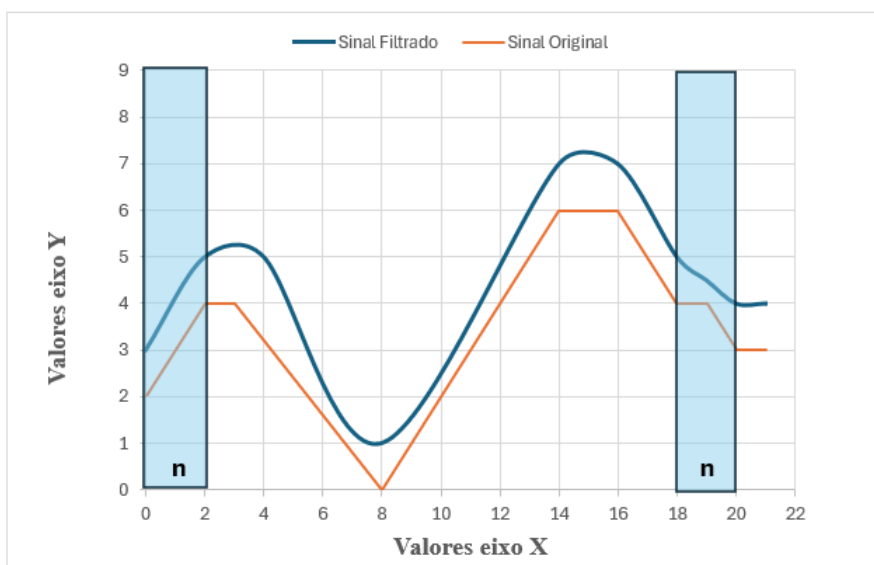


Fonte: Autoria Própria

Uma forma de resolver tal problema é o uso de ferramentas de filtragem de dados. Duas delas foram usadas nesse trabalho, são através da Média Móvel Simples (MMS, no inglês, *Simple Moving Average* – SMA) e a Média Móvel Exponencial (MME, no inglês, *Exponential Moving Average* - EMA).

Comumente usada no mercado financeiro, as médias móveis têm como objetivo mostrar a tendência de um gráfico com menos irregularidades (SARTORELLI, 2024). Elas funcionam como um método estatístico empregado na análise de séries temporais com o objetivo de suavizar flutuações nos dados e destacar tendências ao longo do tempo. Elas agem ao calcular a média de um conjunto de valores dentro de uma janela que se desloca ao longo da série, de forma que cada ponto na série representa a média dos valores de um período específico (HYNDMAN, 2011). Ou seja, as médias móveis são os valores calculados baseados nas médias de determinados períodos, em que cada média móvel representará um intervalo dos dados, de forma que suaviza a tendência dos dados, como, de forma generalizada, exemplifica a Figura 6.

**Figura 6.** Exemplo genérico de funcionamento de médias móveis.



Fonte: Adaptado de DUMAS, 2024.

A principal diferença entre as médias móveis está na forma em que os dados são ponderados. Na média MMS se dá o mesmo peso para cada observação, ou seja, cada observação dentro da janela contribui da mesma maneira para determinar o valor final da média móvel (SARTORELLI, 2024). A fórmula da MMS é mostrada pela Equação 7, a seguir.

$$MMS_{n,t} = \frac{[P_1 + P_2 + \dots + P_n]}{n} \quad (7)$$

em que ‘P’ representa cada observação experimental (uma determinada observação em ‘t’) e ‘n’ é o tamanho do período selecionado, também chamado de ‘janela’. O número de observações é sempre igual ao tamanho da janela.

Exemplificando, em um conjunto de dados de 5 observações: P1 = (1,2), P2 = (2,4), P3 = (3,6), P4 = (4,8) e P5 = (5,10); em que cada Pi=(i, j) é um dos dados, de indicação i e valor observado j. Os dados estão representados na Figura 7, onde também está exemplificado visualmente o cálculo dos valores de média móvel simples (MMS) a cada janela de três observações em série. Assim, considerando uma janela n = 3, os seguintes valores são calculados para a MMS:  $MMS_{3,3} = (2 + 4 + 6)/3$ ;  $MMS_{3,4} = (4 + 6 + 8)/3$ ;  $MMS_{3,5} = (6 + 8 + 10)/3$ . Deve ser destacado que nesse caso se mantém o valor da janela e ela é deslocada ao passar por todos os

dados. Os primeiros dados ficam sem valores de MMS, pois não há dados anteriores para considerar dentro da janela definida.

**Figura 7.** Exemplo de aplicação de média móvel simples.

Janela = 3

	X	Y	MMS
P1	1	2	-
P2	2	4	-
P3	3	6	4
P4	4	8	6
P5	5	10	8

→  $MMS = (2 + 4 + 6) / 3 = 4$   
→  $MMS = (4 + 6 + 8) / 3 = 6$   
→  $MMS = (6 + 8 + 10) / 3 = 8$

Fonte: Autoria Própria

Ao aplicar a média móvel exponencial (MME), os dados mais recentes são considerados com peso maior do que os dados mais antigos, devido à ponderação exponencial. Isso significa que as flutuações recentes têm um impacto maior na média do que as flutuações mais antigas (SARTORELLI, 2024). No entanto, todos os dados disponíveis são considerados no cálculo da MME, garantindo uma análise abrangente da série temporal, diferentemente da média móvel simples, que sempre se perde um número inicial  $n$  dos primeiros dados. Conforme a média exponencial atua nos dados mais recentes, os dados iniciais vão perdendo exponencialmente seu peso na média. A MME utiliza o cálculo que segue:

$$MME_{n,t} = \alpha P_t + (1 - \alpha)MME_{t-1} \quad (8)$$

Em que 'Pt' é a observação referente a um tempo  $t$ , 'MME  $t-1$ ' é a MME anterior a  $t$ , e  $\alpha$  é dado pela Equação 4, onde 'n' é a janela da MME.

$$\alpha = \frac{2}{n + 1} \quad (9)$$

A Figura 8 exemplifica visualmente o funcionamento da MME com o mesmo conjunto de dados do exemplo anterior, também com uma janela de valor  $n=3$ . O primeiro valor da MME é o mesmo valor da primeira observação da série.

**Figura 8.** Exemplo de aplicação de média móvel exponencial

Janela = 3

$$\alpha = 2/(n+1)$$

$$\alpha = 2/(3+1) = 0,5$$

	X	Y	MME
P1	1	2	2
P2	2	4	3
P3	3	6	4,5
P4	4	8	6,25
P5	5	10	8,125

$MME2 = \alpha \times P2 + (1 - \alpha) \times MME1$   
 $MME2 = 0,5 \times 4 + (1 - 0,5) \times 2 = 3$

$MME3 = \alpha \times P3 + (1 - \alpha) \times MME2$   
 $MME3 = 0,5 \times 6 + (1 - 0,5) \times 3 = 4,5$

$MME4 = \alpha \times P4 + (1 - \alpha) \times MME3$   
 $MME4 = 0,5 \times 8 + (1 - 0,5) \times 4,5 = 6,25$

$MME5 = \alpha \times P5 + (1 - \alpha) \times MME4$   
 $MME5 = 0,5 \times 10 + (1 - 0,5) \times 6,25 = 8,125$

Fonte: Autoria Própria

Qual o melhor valor de janela de cada caso também é uma questão importante, que foi analisada por tentativa e erro no trabalho e reportada nesse trabalho para dados de secagem do manganês.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo descreve os dados experimentais e a metodologia adotada para o desenvolvimento, teste e validação do programa de tratamento e análise de dados de secagem. São apresentados os materiais, equipamentos e procedimentos utilizados nos ensaios de secagem do minério de manganês, assim como os métodos de aquisição dos dados e definição de parâmetros operacionais. O capítulo também aborda as ferramentas computacionais empregadas e a estrutura do programa desenvolvido, incluindo o tratamento dos dados, a aplicação de filtros, a geração de gráficos e o ajuste de modelos matemáticos. Por fim, são descritos os procedimentos de construção do executável e a disponibilização de materiais de apoio para facilitar a utilização da ferramenta.

#### 3.1 DADOS EXPERIMENTAIS E TESTES DE EXECUÇÃO.

As rotinas desenvolvidas e o executável foram construídos fazendo-se testes através de dados brutos vindos de dados da literatura (HIDALGO, 2025). Em seus experimentos, Hidalgo utilizou principalmente os seguintes materiais:

- minério de manganês com diâmetro de partícula menores que 1 mm;
- moldes esféricos metálicos com diâmetro 21 mm;
- estufa de convecção forçada no modelo Tecnal, TE-349/1;
- balança analítica no modelo OHAUS Pioneer, PA214;
- suporte metálico (ou BIAS, que será explicado adiante);
- sacos de polipropileno do tipo zip-lock;
- dessecador;
- água destilada.

#### 3.2 APLICATIVOS, LINGUAGEM, PROGRAMAÇÃO E BIBLIOTECAS.

Para construção do programa de tratamento de dados, foi utilizada a linguagem de programação Python (versão 3.12.3). Dentro da linguagem, existem diversas bibliotecas de uso público. Foram utilizadas, as biblioteca Pandas (versão 2.2.2), Numpy (versão 1.26.4), Matplotlib (versão 3.8.4.) e SciPy (versão 1.15.2). Ademais, foram utilizadas as funções exists da biblioteca

os.patch (versão 3.8) e a função messagebox da biblioteca tkinter (versão 8.6). Além disso, foi utilizado o software Excel (Microsoft), para construção de planilhas de entrada do programa desenvolvido na iniciação e para análise de dados de saída.

### 3.3 MÉTODOS

Os procedimentos experimentais descritos aqui podem ser consultados em Hidalgo (2025), já que atividades experimentais não foram realizadas no trabalho de graduação. No entanto, as descrições precisaram ser realizadas para viabilizar as discussões de resultados.

#### 3.3.1 O Minério.

O minério de manganês *in natura* foi fornecido pelo Instituto Tecnológico Vale (ITV), proveniente da mina do Azul na Serra Norte de Carajás no Estado do Pará. O termo *in natura* se refere ao material em estoque, armazenado em tonel lacrado com umidade residual e recebido diretamente da ITV. Os materiais foram peneirados a fim de obter amostras com diâmetro de partículas menores que 1 mm, em seguida, foram completamente desidratados e novamente umidificados para a execução dos experimentos de secagem.

#### 3.3.2 Secagem Em Estufa.

Para ajustar a quantidade de água no minério de manganês é utilizado o método de umidificação para minérios realizado por Souza Pinto et al. (2020). As amostras úmidas são inseridas em moldes de compressão para a formação de esferas (*pellets*) de minério de manganês, conforme apresentado na Figura 9.

**Figura 9.** esferas de minério de manganês.



Fonte: Hidalgo, 2025

Feitos os *pellets*, eles seguem para um sistema de secagem (Figura 10), que é constituído por:

- uma estufa de convecção forçada;
- uma balança, posicionada sobre a estufa;
- um computador, que por meio de um software da própria empresa fabricante da balança, registra os dados brutos e salva em um arquivo em formato texto.

A balança em citada apresenta um gancho na parte inferior, que pode ser conectado à amostra suspensa para aferição de sua massa. Para o ensaio de secagem em questão, uma corrente conecta o gancho à amostra sendo seca dentro da estufa. A passagem da corrente da região exterior para dentro da estufa ocorre pela furação superior da mesma, onde normalmente se insere um termômetro para aferição de temperatura.

**Figura 10.** Sistema de secagem.



Fonte: Hidalgo, 2025

O minério fica depositado em um suporte de alumínio que se conecta na balança pela corrente, deixando o material suspenso dentro da Estufa. A Figura 11 mostra os suportes utilizados para *pellets* esféricos.

**Figura 11.** Suporte das amostras.



Fonte: Autoria Própria

Após o registro inicial da massa úmida e feita a coleta dos dados de pesagem através do sistema mencionado durante todo o processo de secagem, a amostra é inserida em estufa a 105°C por 24 horas para aferir a massa seca do material por método gravimétrico. Além disso, é aferido também o BIAS, valor medido para a massa de todo o suporte suspenso acrescido do viés devido ao funcionamento da estufa, ligada na condição de trabalho. Durante a pesagem, a vibração da estufa gera um desvio sistemático nos dados de massa (ou viés), ou seja, há uma variação nos valores da pesagem devido a essa agitação. Essa variação é contabilizada na massa do suporte. Para isso, a estufa é ligada e mantida em funcionamento até o estado estacionário nas condições do ensaio, com a estabilização da temperatura e já com todo o suporte suspenso instalado (sem a inclusão do material, ou seja, do *pellet*). Após estabilização, a aquisição de dados é iniciada por cerca de 5 minutos. Assim, a massa do suporte (sem amostra) é pesada durante esse tempo, já contabilizando o viés das pesagens, que é aferida na média de todos os valores obtidos por cinco minutos, esse valor corresponde ao BIAS.

### 3.4 TRATAMENTO DOS DADOS E CONSTRUÇÃO DO PROGRAMA.

Como dito anteriormente, a base de dados brutos da secagem é armazenada em um arquivo texto. O primeiro passo, portanto, foi transformar os dados em uma variável manipulável no Python. Isso foi feito através da função `'read_csv'` da biblioteca *Pandas*. Posteriormente, foi se desenvolvendo o programa em blocos, onde cada bloco possui um papel específico e foram

integrados em uma rotina principal (*main*). O objetivo é tornar a programação modular, facilitando a detecção e solução de erros, além de favorecer o reaproveitamento do código. No entanto, dadas as necessidades do programa e a menor demanda por reaproveitamento dos códigos, não se utilizou a programação orientada a objetos. Ao invés disso, a modularização ocorreu somente pela construção de funções. Foram criados sete blocos.

*Primeiro bloco: cálculos básicos.*

O primeiro bloco criado tem como papel executar cálculos básicos da secagem. Ele faz isso utilizando como dados de entrada os dados brutos vindo do arquivo em formato de texto, a massa seca da amostra, o BIAS e a taxa de amostragem (representada pelo intervalo entre cada ponto da aquisição de dados, ou “intervalo de amostragem”). Nesse momento, é importante destacar que o arquivo de dados brutos armazena somente os N dados amostrados pela balança (N dados de massa adquiridos), assim, não possui qualquer referência ao tempo de cada massa aferida. O vetor de tempo é construído a partir do intervalo de amostragem aferido no experimento, mas testes prévios às atividades da iniciação indicaram que o intervalo é constante e reprodutível. Todos esses dados são específicos de cada experimento e são inseridos pelo usuário através da interface, que será explicada adiante no relatório. Apesar disso, vale ressaltar que todas as calibrações experimentais apresentaram o mesmo intervalo de amostragem até o momento, como correspondendo a 0,001441min. Esse valor pode ser obtido também a partir da contagem e tempo decorrido dos cinco minutos de aquisição para definição do BIAS. A seguir, estão definidas cada uma das variáveis que o programa pode calcular.

- instante de tempo de aquisição de cada valor adquirido pelo computador;
- ‘Sample Mass’, que é apenas a massa das amostras, ou seja, é a massa total menos o BIAS;
- ‘Water mass’, que é massa de água, ou seja, a massa da amostra menos a massa seca;
- ‘Moisture DB’ (Xb.s.), que é a umidade em base seca (Equação 1);
- ‘Moisture UB’ (Xb.u.), que é a umidade em base úmida (Equação 2);
- ‘Moisture DB dimensionless’, que é a umidade em base seca adimensional, que é a umidade em base seca dividida pela umidade em base seca do primeiro ponto coletado.

Os resultados são armazenados em uma matriz, cuja ordem depende da quantidade de cálculos e aplicações que o usuário seleciona para o programa executar. Por exemplo, caso o usuário selecione que deseja obter as informações de tempo, a massa total e a umidade em base seca, a matriz resultante é de ordem Nx4, sendo N o número de dados coletados no experimento. Cada dado adquirido em distinto instante de tempo é armazenado numa linha distinta, enquanto cada coluna indica uma das variáveis selecionadas como opções pelo usuário. Essa resposta sai do bloco no tipo DataFrame da biblioteca Pandas.

*Segundo bloco: cálculo de taxa de secagem.*

O segundo bloco calcula o negativo da derivada da umidade em base seca no tempo ( $-dX/dt$ ), ou seja, a taxa de secagem, variável muito importante nos estudos de secagem. O programa calcula a derivada pelo método de diferenças centrais a cada dois pontos de umidade em base seca, ou seja, a derivada de um determinado ponto  $i$  é dada por:

$$\frac{dX}{dt} = \frac{-[X(i+1) - X(i)]}{t(i+1) - t(i)} \quad (10)$$

A derivada em questão vale para o valor do ponto médio de  $X(i+1)$  e  $X(i)$ , da mesma forma para o tempo  $t(i+1)$  e  $t(i)$ . Por fim, calcula-se uma sequência de valores para taxa, um para cada ponto médio obtido dos dados. A unidade da taxa é  $\text{min}^{-1}$  (ou  $\frac{\text{Kg}_{\text{água}}}{\text{Kg}_{\text{sól' seco}} \text{ min}}$ ). A saída desse programa é uma matriz de ordem  $(N-1) \times 3$ . As três 3 colunas são referentes a taxa, os pontos médios do tempo e os pontos médio da umidade em base seca. Ela contém  $(N - 1)$  linhas por conta de se perder um ponto ao realizar os cálculos de taxa, por se trabalhar com diferenças centrais e executar o cálculo até o penúltimo ponto. Assim, essa é uma resposta em tipo *nparray* da biblioteca *numpy*.

*Terceiro bloco: filtragem de dados.*

O terceiro bloco trata dos filtros. Nele se o filtro é aplicado para janela que o usuário indica na entrada em planilha. Para a aplicação dos filtros, foram utilizados métodos da biblioteca *Pandas*. Para a média móvel simples foi utilizada o método aplicado ao objeto `‘.rolling(window=window).mean()’`, enquanto para a média móvel exponencial o método aplicado a objeto `‘.ewm(span=window).mean()’`.

A entrada de dados do bloco segue o formato de *DataFrame* do *Pandas*, em que as colunas representam umidade em base seca e tempo, já geradas pelo bloco de cálculos básicos. Portanto,

se trata de duas entradas do tipo *DataFrame* Nx1 da biblioteca *Pandas*. Os dados são processados a partir das informações fornecidas pelo usuário na seleção de filtro na planilha de interface. A saída é uma matriz em *DataFrame* com duas colunas, a primeira com o tempo e a segunda com os novos dados, agora filtrados, dos valores de umidade seca. A quantidade de linhas da matriz resposta depende do método aplicado, sendo da ordem Nx2 para a média móvel exponencial e (N-n)x2 para a média móvel simples, uma vez que a aplicação da média móvel simples leva à perda dos n primeiros pontos, como discutido anteriormente.

*Quarto bloco: interação com usuário.*

O quarto bloco diz respeito às interações com o usuário (interface com o usuário). Foi feita uma planilha no Excel ao qual o usuário utiliza para passar parâmetros de entrada para o programa, esse é o arquivo de interface com usuário. Uma das ideias do trabalho é simplificar o uso mesmo que na ausência de uma interface gráfica, de modo que até um usuário sem conhecimentos em programação também pudesse utilizá-lo. O Excel foi escolhido pensando nisso, sendo uma ferramenta popular e simples. O bloco em questão faz a leitura desse arquivo Excel e coleta todos os dados relevantes que o usuário fornece. Isso é feito através da função *'read\_excel'*, da biblioteca *Pandas*. Internamente, as informações da planilha são transformadas em variáveis do tipo *'Numpy array'*, referente a biblioteca *Numpy*.

*Quinto bloco: geração de informações gráficas de saída.*

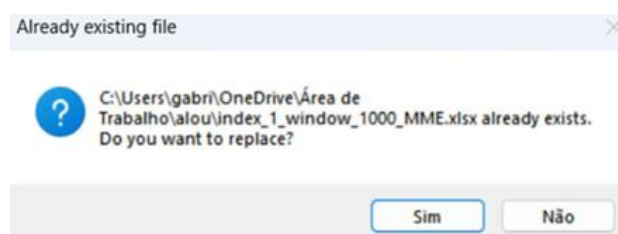
O quinto bloco possui o papel de construir gráficos de saída. Ele recebe as informações dos demais blocos e cria diversos gráficos com os dados até então gerados. Esse bloco utiliza a biblioteca *'Matplotlib'* para a criação e exibição dos gráficos.

*Sexto bloco: armazenamento de informações.*

O sexto bloco possui também o papel de saída, mas principalmente para armazenamento das informações em memória rígida. Ele reúne todas as informações até então recebidas, e, de acordo com as preferências indicadas pelo usuário no arquivo de interface, é feito o armazenamento dos dados processados. Além das funções mencionadas, o bloco evita equívocos que possam ser cometidos pelo usuário no armazenamento. Para isso, é utilizada a função *'exist'* da biblioteca *os.pach* para verificar caso o usuário crie um documento com o nome que já existe na máquina. Assim, é verificado se um arquivo do programa com os dados atuais já foi gerado.

Em caso afirmativo, através da função ‘*messagebox*’ da biblioteca *tkinter*, é emitida uma mensagem em caixa avisando o usuário, que pode decidir pela substituição por um novo arquivo de dados. Deste modo, evita-se a substituição não intencional de arquivos de dados. A Figura 12 mostra como é a mensagem em caixa de texto e seleção.

**Figura 12.** Mensagem de aviso do programa.



Fonte: Autoria Própria

#### *Sétimo bloco: Modelagem.*

O bloco de modelagem tem como finalidade ajustar modelos empíricos e teóricos aos dados experimentais de secagem, a fim de estimar parâmetros cinéticos e difusivos. Foram implementadas funções para as equações cinéticas de Lewis, Page e Henderson e Pabis (Tabela 1), além dos modelos analíticos para geometria esférica (Equação 6). O bloco utiliza as bibliotecas NumPy, Matplotlib e SciPy, esta última por meio da função *curve\_fit*, responsável por realizar o ajuste não linear dos parâmetros pelo método de *Levenberg–Marquardt*. O método de *Levenberg–Marquardt* é um algoritmo iterativo utilizado para ajustar modelos não lineares a dados experimentais. Ele combina as vantagens dos métodos do gradiente descendente e de *Gauss–Newton*, ajustando os parâmetros de modo a minimizar o erro quadrático entre os valores experimentais e os previstos pelo modelo. Em cada iteração, o algoritmo adapta o tamanho do passo de correção conforme a curvatura da superfície de erro, garantindo maior estabilidade e convergência mesmo em ajustes complexos (MARQUARDT, 1963).

Cada função recebe como entrada um *DataFrame* do Pandas contendo as colunas de tempo e umidade em base seca, a umidade crítica e um parâmetro nos casos dos modelos difusivos, sendo o raio da amostra para o modelo esférico e a espessura da amostra para o modelo de placa plana. Os dados são tratados para eliminar os pontos com taxa constante com base na umidade

crítica (fornecida pelo usuário), de forma que se tenha um ajuste apenas do trecho com taxa decrescente, e normalizados em relação à unidade inicial. Em seguida, são geradas séries temporais e aplicadas as equações correspondentes a cada modelo.

O ajuste dos modelos de Lewis, Page e Henderson & Pabis resultam nos parâmetros de taxa de secagem  $k$  e, no caso de Henderson e Pabis, no expoente  $n$ . Para os modelos difusivos de placa e esfera, o parâmetro ajustado é o coeficiente de difusão efetivo, obtido iterativamente a partir da série truncada no décimo termo ( $n=10$ ) para modelo de placa e no centésimo termo ( $n=100$ ) para modelo esférico.

Ademais, a partir desse bloco, são gerados gráficos comparando os dados experimentais e as curvas ajustadas, utilizando a biblioteca *Matplotlib*. As figuras apresentam a equação ajustada e os parâmetros obtidos, permitindo a análise visual da aderência do modelo aos dados experimentais. Além disso, são calculados e apresentados o coeficiente de determinação ( $R^2$ ), a raiz quadrada do erro médio (RMSE), dado pela equação 11, e o teste do qui-quadrado, dado pela equação 12. Quanto o  $R^2$  for mais próximo de 1, e o RMSE e Qui-quadrado mais próximos de zero, melhor os dados experimentais se ajustaram ao modelo.

$$RMSE = \left[ \sum_{i=1}^N \frac{1}{N} (MR_{exp,i} - MR_{calc,i})^2 \right]^{1/2} \quad (11)$$

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^N \frac{(MR_{exp,i} - MR_{calc,i})^2}{N - n} \quad (12)$$

Onde  $MR_{exp,i}$  e  $MR_{calc,i}$  são os adimensionais de umidade experimentais e calculados em determinada observação  $i$ ,  $N$  é o número total de observações e  $n$  é o número de parâmetros estimados.

#### *Construção de executável e material de apoio aos usuários.*

O arquivo Python completo foi transformado em um executável através da biblioteca ‘*Pyinstaller*’. Além disso, foram feitos vídeos explicativos de como usar o programa, além de um manual explicativo em texto em formato PDF. Além disso, as planilhas de base para interface em

Excel são fornecidas em arquivo, mais um conjunto de dados de exemplo de dados brutos em formato texto foram compactados em uma pasta e disponibilizada para a equipe de secagem.

## 4 RESULTADOS

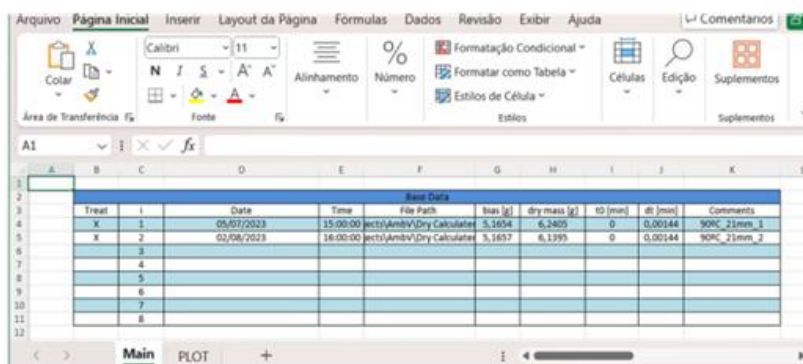
Este capítulo apresenta a interface do programa desenvolvido para o tratamento e análise de dados de secagem, detalhando sua estrutura baseada em planilha Excel e a forma de interação com o usuário. São expostas as funcionalidades relacionadas à organização dos ensaios, inserção de parâmetros operacionais, aplicação de métodos de filtragem, geração de gráficos e armazenamento dos dados processados. O capítulo também aborda a análise cinética da secagem, incluindo a identificação das diferentes etapas do processo, a determinação da umidade crítica e o ajuste de modelos matemáticos, tanto empíricos quanto difusivos, aos dados experimentais.

### 4.1 A INTERFACE DO PROGRAMA.

O arquivo do Excel funciona como interface para o usuário. É nela que o usuário irá fornecer parâmetros de operação para o programa desenvolvido. A ideia é que ela seja preenchida continuamente, à medida que experimentos forem sendo realizados. Assim, o preenchimento da planilha também é uma forma de organizar as informações dos ensaios realizados pelo usuário em uma listagem. Cada linha da planilha é referente a um ensaio do usuário em específico, organizados pelas colunas de *indicies* (i). A planilha conta com três abas: *Main*, *Plot* e *Models*.

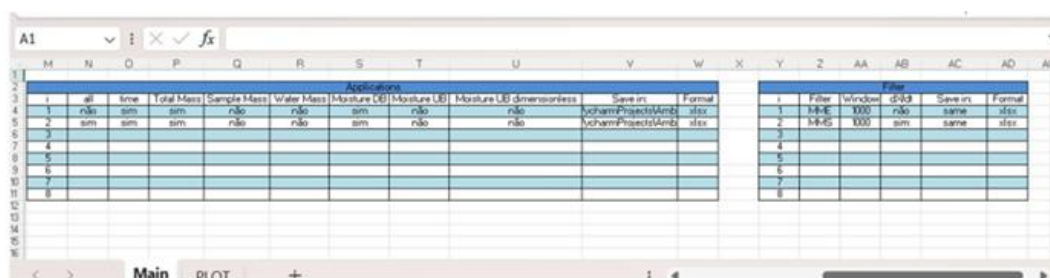
Na aba *Main* (Figuras 13 e 14), o usuário coloca as informações essenciais para o programa, como o '*file path*' do arquivo texto do ensaio de secagem, a massa seca da amostra, o BIAS e o variação do tempo de cada ponto. O '*file path*' deve apontar para o arquivo de texto com dados brutos. Aqui também existem outras colunas para serem preenchidas a fim de ajudar o usuário a se organizar, tais como data e hora do ensaio além de uma coluna de comentários. Essas colunas são acessórias e não influem na execução do programa de tratamento de dados construído. Além disso, nessa planilha, o usuário deve informar o que deseja ser executado pelo programa e se deseja armazenar saídas em arquivo de dados. Caso opte por realizar o armazenamento, deve indicar o caminho para criação do(s) arquivo(s) de saída, o formato dos arquivos armazenados. É necessário indicar parâmetros mais técnicos, como o tipo de filtragem que deseja aplicar, a janela dos filtros. Como descrito posteriormente, arquivos auxiliares foram desenvolvidos para ajudar na utilização do programa.

**Figura 13.** Primeira parte da interface em planilha (aba *main*).



Fonte: Autoria Própria

**Figura 14.** Segunda parte da interface em planilha (aba *main*).



Fonte: Autoria Própria

Na aba *PLOT* (Figura 15), o usuário coloca suas preferências e informações a respeito da construção de gráficos. Assim, é possível gerar diversos gráficos de uma só vez, selecionando os eixos em questão, os títulos e quais dados de determinados experimentos serão exibidos em cada gráfico (através dos *indices*). Dados de vários experimentos podem ser incluídos no mesmo gráfico, auxiliando em comparações. O propósito é favorecer uma análise mais rápida de resultados, comparando condições experimentais distintas ou analisando a reprodutibilidade de réplicas. Para construção de gráficos de aspecto mais profissional, é indicado exportar os dados em arquivo e utilizar programas especializados (para armazenamento de dados, utilizar a aba “*Main*”, como já foi mencionado). Porém, as construções gráficas do programa devem auxiliar os usuários para análise rápida de resultados. Apesar disso, é possível armazenar os gráficos construídos pelo próprio Python, onde o usuário indica se deseja salvar as imagens geradas e em qual local na aba *PLOT*.

**Figura 15.** – Terceira parte da interface em planilha (aba *PLOT*).

plot	Title	axis y	axis x	Save in:	i1	i2	i3	i4	i5
A	Derivada vs Umidade BS	dx/dt	Moisture DB	1	1				
B	Massa total vs Tempo	Total Mass [g]	Time [min]	1 2	1	2			
C									
D									
E									
F									
G									

Fonte: Autoria Própria

A aba *Models* da planilha (Figura 16) funciona como local de definição e organização dos modelos de secagem que o usuário deseja ajustar aos dados experimentais. Cada linha corresponde a um ensaio específico, identificado pelo *índice* (*i*), de forma correlata à aba *Main*. Nessa aba, o usuário deve selecionar o modelo de secagem a ser ajustado aos dados, dentre as opções disponíveis: Lewis, Page, Henderson e Pabis (tabela 1), além dos modelos baseados na difusividade para geometria esférica (Equação 6). Para os modelos difusivos, é necessário fornecer um parâmetro fixo, que pode corresponder à área superficial da placa ou ao raio da esfera, dependendo do modelo escolhido. Além disso, o usuário deve indicar o valor de  $X_c$ , para selecionar os dados de forma que o ajuste aconteça no período de taxa decrescente. Essa aba, portanto, permite ao programa identificar, para cada ensaio, qual modelo será utilizado no ajuste, além de fornecer os parâmetros necessários para sua aplicação. Há também uma coluna destinada à escolha do usuário quanto ao armazenamento dos dados gerados pelo modelo. Caso essa opção seja ativada, será criado um arquivo Excel contendo os seguintes elementos: tempo ajustado, tempo real do experimento, os valores de umidade adimensional obtidos experimentalmente e os calculados pelo modelo. O arquivo gerado inclui ainda uma aba adicional com informações sobre os parâmetros definidos pelo usuário no momento da análise.

**Figura 16.** Quarta parte da interface em planilha (aba Models).

	A	B	C	D	E	F	G	
1								
2		Modeling						
3		i	Model	Xc	Parameter [m]	File Path Save		
4		1	Esfera Model	0,11	0,11	\\gabri\OneDrive\Documentos\tes		
5		3	Lewis	0,11	-	\\gabri\OneDrive\Documentos\tes		
6		3	Page	0,11	-	\\gabri\OneDrive\Documentos\tes		
7		4	Hem e Pabis	0,11	-	\\gabri\OneDrive\Documentos\tes		
8								
9								
10								
11								
12								
13								
14								
15								
16								
17								
18								
19								
20								
21								
22								
23								
24								
25								
26								

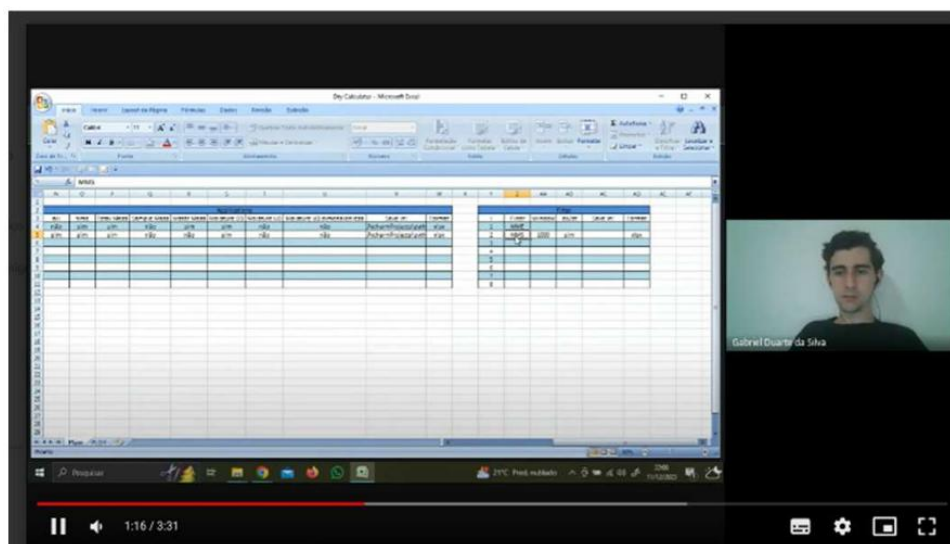
< >
Main
PLOT
Models
+

Fonte: Autoria Própria

## 4.2 PASTA ZIP E ARQUIVOS AUXILIARES

Como mencionado anteriormente, a interface em arquivo Excel, dois arquivos texto de dados brutos exemplificativos, instruções de uso em texto em arquivo PDF e os vídeos instrucionais foram compactados em uma pasta ZIP, facilitando o envio. A Figura 17 mostra um dos frames de um dos vídeos instrucionais.

**Figura 17.** Imagem de um dos vídeos instrucionais.



Fonte: Autoria Própria

O executável foi construído para facilitar a aplicação por usuários sem domínio de programação ou mesmo baixa afinidade pelo uso de recursos computacionais. Assim, não há a necessidade de o computador do usuário ter Python ou IDE's instaladas. O material de apoio (vídeos e texto instrucional) se mostrou útil e funcional, destacando em mais detalhes o funcionamento e utilização do programa, recebendo retorno positivo de uma estudante que desenvolve iniciação científica na secagem de grãos de café e testou a ferramenta.

#### 4.3 ARQUIVOS RESULTADOS E IMAGENS DOS GRÁFICOS

A Figura 18 mostra como fica o resultado do arquivo Excel de resultado quando o usuário seleciona todas as opções das funções de cálculo básico.

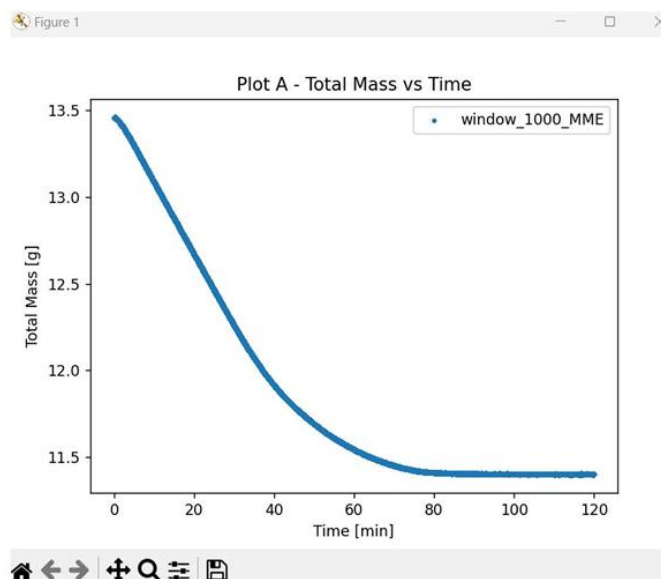
Figura 18. Imagem de um dos resultados do programa em formato Excel.

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	Time [min]	Total Mass [g]	Sample Mass [g]	Water Mass [g]	Moisture UB	Moisture DB	Moisture UB dimensionless	
2	0	13,4554	8,29	2,0495	0,247225573	0,328419197		1
3	0,00144	13,4556	8,2902	2,0497	0,247243734	0,328451246	1,000097585	
4	0,00288	13,4557	8,2903	2,0498	0,247252814	0,32846727	1,000146377	
5	0,00432	13,4558	8,2904	2,0499	0,247261893	0,328483295	1,00019517	
6	0,00576	13,4559	8,2905	2,05	0,247270973	0,328499319	1,000243962	
7	0,0072	13,4559	8,2905	2,05	0,247270973	0,328499319	1,000243962	
8	0,00864	13,4558	8,2904	2,0499	0,247261893	0,328483295	1,00019517	
9	0,01008	13,4558	8,2904	2,0499	0,247261893	0,328483295	1,00019517	
10	0,01152	13,4558	8,2904	2,0499	0,247261893	0,328483295	1,00019517	
11	0,01296	13,4558	8,2904	2,0499	0,247261893	0,328483295	1,00019517	
12	0,0144	13,4559	8,2905	2,05	0,247270973	0,328499319	1,000243962	
13	0,01584	13,456	8,2906	2,0501	0,247280052	0,328515343	1,000292754	
14	0,01728	13,4563	8,2909	2,0504	0,247307289	0,328563416	1,000439131	
15	0,01872	13,4567	8,2913	2,0508	0,247343601	0,328627514	1,000634301	
16	0,02016	13,457	8,2916	2,0511	0,247370833	0,328675587	1,000780678	
17	0,0216	13,4572	8,2918	2,0513	0,247388987	0,328707636	1,000878263	
18	0,02304	13,4574	8,292	2,0515	0,247407139	0,328739684	1,000975848	
19	0,02448	13,4576	8,2922	2,0517	0,247425291	0,328771733	1,001073433	
20	0,02592	13,4577	8,2923	2,0518	0,247434367	0,328787757	1,001122225	
21	0,02736	13,4578	8,2924	2,0519	0,247443442	0,328803782	1,001171017	
22	0,0288	13,4578	8,2924	2,0519	0,247443442	0,328803782	1,001171017	
23	0,03024	13,4577	8,2923	2,0518	0,247434367	0,328787757	1,001122225	
24	0,03168	13,4576	8,2922	2,0517	0,247425291	0,328771733	1,001073433	
25	0,03312	13,4574	8,292	2,0515	0,247407139	0,328739684	1,000975848	
26	0,03456	13,4573	8,2919	2,0514	0,247398063	0,32872366	1,000927055	
27	0,036	13,4571	8,2917	2,0512	0,24737991	0,328691611	1,000829471	

Fonte: Autoria Própria

A Figura 19 mostra como fica o resultado de um gráfico, no exemplo foram selecionados os eixos de massa total e tempo.

**Figura 19.** Resultado gráfico do programa (Massa total em função do tempo).



Fonte: Autoria Própria

Os arquivos resultantes com todos os cálculos e informações que o usuário alimenta no programa via interface por planilha são armazenados diretamente em formato Excel. Nele, além do conteúdo que o programa oferece, também há uma guia com as informações referentes ao ensaio, o que deve facilitar a organização do usuário. Os gráficos construídos oferecem recursos para facilitar a análise do usuário, como *zoom in*, *zoom out* e algumas configurações de visualização, podendo inclusive serem salvos em diversos formatos (PDF, JPG, JPNG, etc).

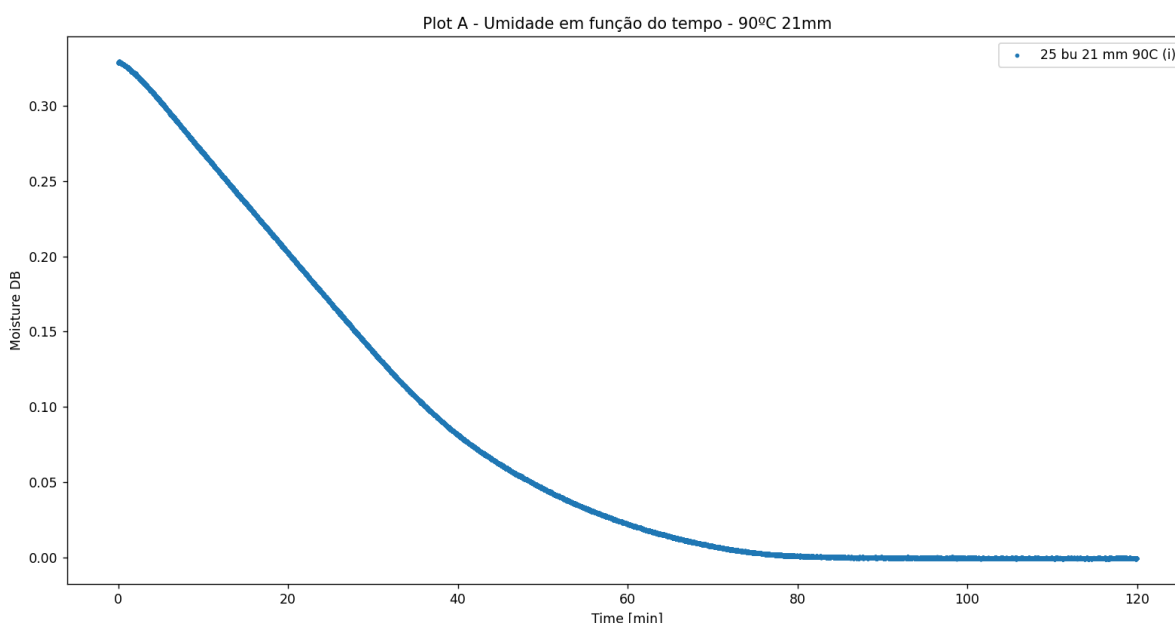
Pela taxa de aquisição, cada ensaio de secagem gera cerca de 41.637 dados de massa úmida aquisitados a cada hora. Mesmo ensaios curtos como para *pellets* de manganês podem gerar grande quantidade de dados (83.280 em duas horas, como na Figura 19). Esse trabalho de graduação apresentará uma análise dos resultados para o manganês, fazendo uma análise geral do processo. A secagem do manganês apresenta longo período de taxa constante e assim será possível visualizar que ensaios de secagem podem ser bem mais longos, principalmente quando envolvem a secagem de materiais higroscópicos, com muita água ligada, sendo realizados por muitas horas. Deste modo, é possível notar como a análise e processamento de dados gerados da balança a partir de ensaios de secagem costumam ser trabalhosos e demandam muito tempo. A utilização direta de planilhas de cálculo operadas manualmente não é indicada nesse caso, o que se agrava na presença de dados ruidosos no cálculo da taxa de secagem. Nesse caso, a alternativa à filtragem seria a

exclusão de uma quantidade massiva de dados. Apesar de ainda ser possível obter informações sobre a cinética de secagem desse modo, há perda de informação desnecessariamente. No contexto apresentado, espera-se que o desempenho do programa desenvolvido possa contribuir com as atividades de estudantes e pesquisadores do Centro de Secagem do DEQ-UFSCar, tanto dos que trabalham com produtos minerais, como os que desenvolvem atividades em outras linhas.

#### 4.4 FILTRAGEM E JANELAS.

A figura 20 demonstra os valores de umidade em função do tempo para o ensaio em 90°C e com esfera de 21mm de diâmetro.

**Figura 20.** Umidade em base seca em função do tempo para o ensaio em 90°C e 21mm.

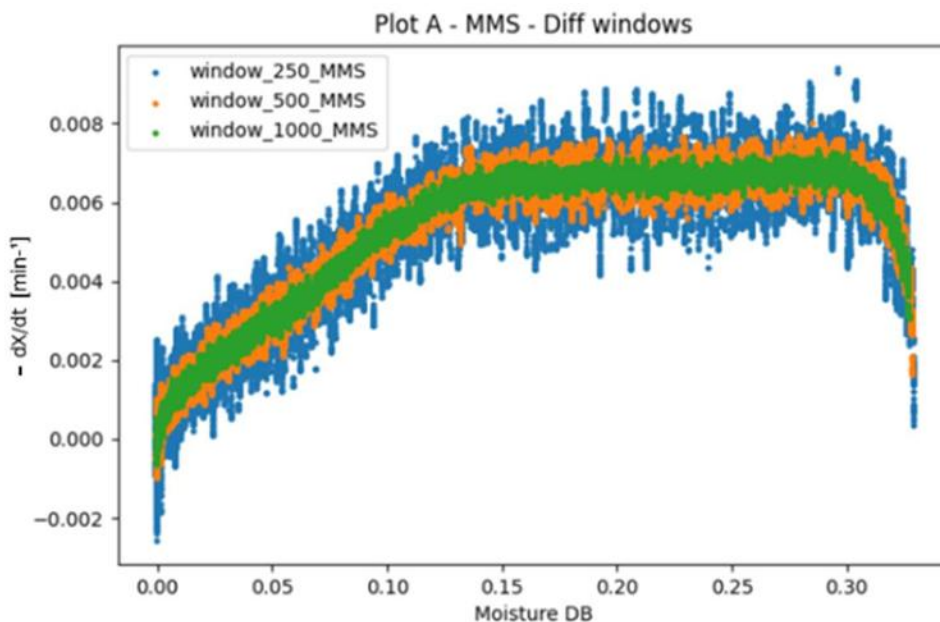


Fonte: Autoria Própria

Como observado na figura 5, a curva de taxa de secagem em função da umidade em base seca com cálculos a partir de dados não filtrados não mostram tendência, impossibilitando uma análise visual. Dessa forma o uso de um método de filtragem dos dados se mostra necessário ao trabalhar com cálculos da derivada  $-dX/dt$ .

A Figura 21 mostra as curvas de secagem agora aplicando a média móvel simples, com janela de 250, 500 e 1000 para o ensaio com esfera de 21mm e temperatura de 90°C.

**Figura 21.**  $-dX/dt$  em função do tempo com filtro de média móvel simples com janelas de 250, 500 e 1000.

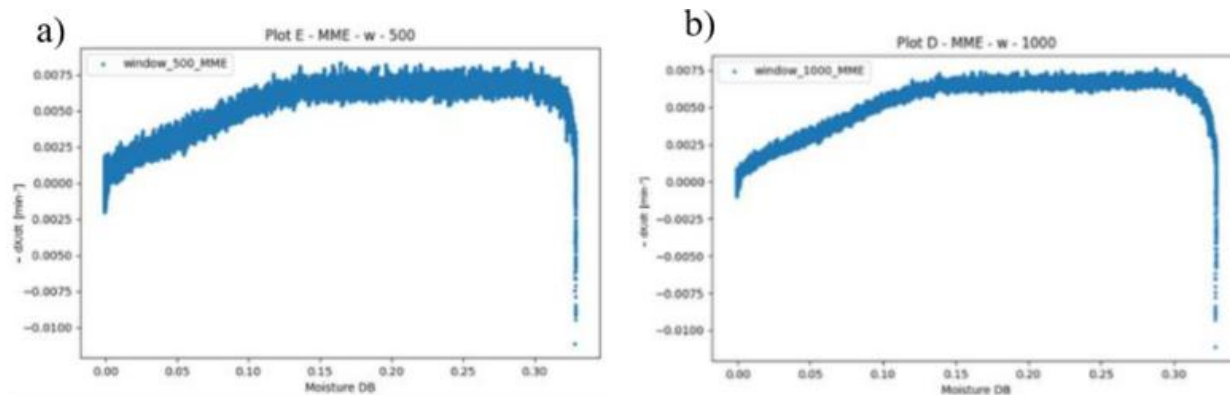


Fonte: Autorial Própria

É notório que a média móvel simples se mostra eficiente para janelas acima de 250 para os dados processados. Na janela 250, já é possível perceber os dois períodos de taxa de secagem, constante e taxa decrescente, característicos do processo para produtos minerais. Quanto mais se aumenta a janela, mais afunilado se torna a tendência. A janela de 1000 se mostrou ideal para a análise do minério de manganês nas condições experimentais praticadas, não alterando o direcionamento dos pontos (como ocorre em janelas muito altas, que será discutido adiante) e dando uma boa precisão para a análise. Além disso, a janela de 1000 pontos representa em tempo cerca 1,44 minutos. O ensaio em questão durou cerca de 120 minutos, o que faz com que a janela seja cerca de 1,2% do tempo total percorrido. Nesse aspecto, é importante destacar que a secagem é um processo relativamente lento, por isso as várias janelas testadas (Figura 21) levam a um conjunto de dados filtrados que apresentam a mesma tendência. Portanto, trata de uma janela relativamente pequena e que se enquadra bem para a filtragem dos dados, não perdendo muitos pontos iniciais para o caso da média móvel simples, e nem alterando a tendência observada nos dados, tornando viável sua aplicação. A mesma análise sobre a janela é válida para a média móvel

exponencial. A Figura 22 mostra a comparação entre a janela 500 e 1000 utilizando a média móvel exponencial.

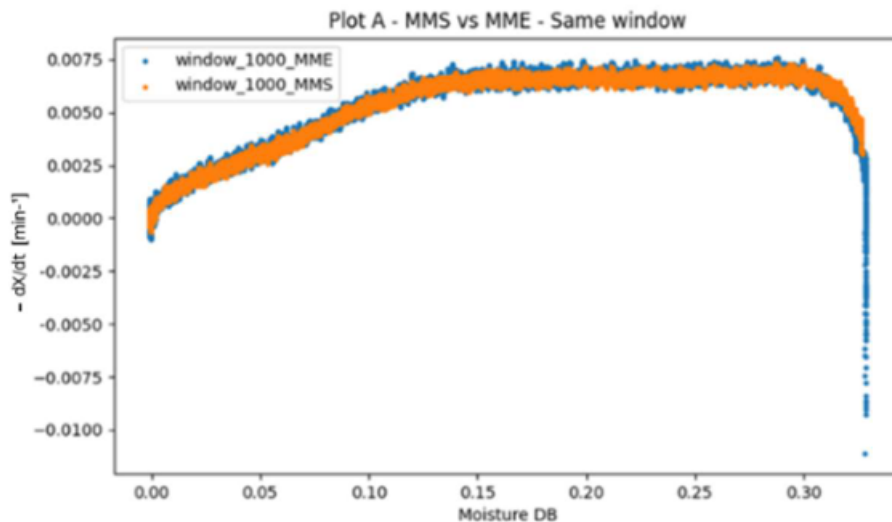
**Figura 22.** Comparação entre (a) janela 500 e (b) janela 1000 utilizando a média móvel exponencial.



Fonte: Autoria Própria

É possível comparar os dois métodos de filtragem na Figura 23, em que as tendências são bem semelhantes. Apesar da média móvel simples apresentar oscilação menor, a variação entre os dois métodos é pequena para justificar o uso de uma em detrimento à outra. Por outro lado, a média móvel exponencial se destaca por não perder nenhum de seus pontos, o que deixa ainda mais evidente a região de aquecimento (Figura 23 para maiores valores de umidade, no início do processo), mostrando que há um aumento da taxa de secagem até chegar na parte da taxa de secagem constante, indo da maior para menor umidade, no início do processo.

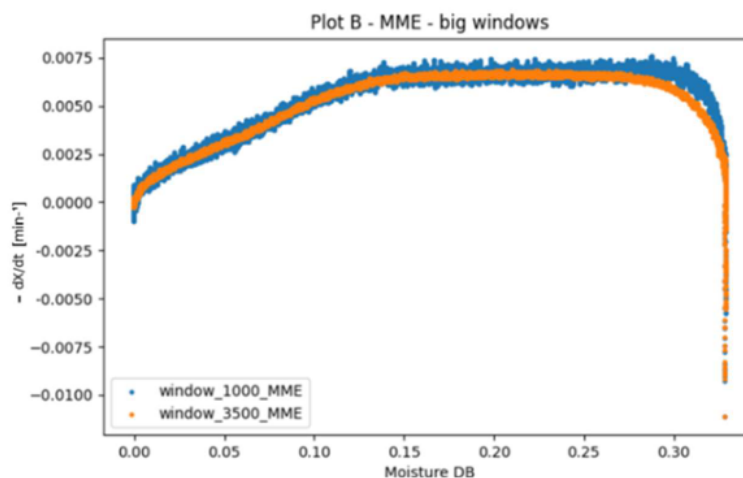
**Figura 23.** Comparação entre os filtros com a mesma janela.



Fonte: Autoria Própria

Para janelas grandes (acima de 1000) a média móvel simples vai se tornando menos útil devido a retirada dos primeiros dados. Para a média móvel exponencial, embora não se perca esses dados, quando utilizadas janelas muito grandes, há uma tendência gerada nos dados mais próximos ao início do ensaio (umidade alta) devido a seu caráter de ponderação. A Figura 24 exemplifica isso, comparando os mesmos dados em janela de 1000 e de 3500. Como é possível observar, a curva de maior janela se separa, principalmente na fase de aquecimento e início do período de taxa constante. Além disso, a diferença de oscilação dos dados se torna cada vez menos relevante, indicando que de fato o aumento de janela deixa de beneficiar a análise do ensaio.

**Figura 24.** Comparação entre janelas de 1000 e 3500 com o filtro de média móvel exponencial.



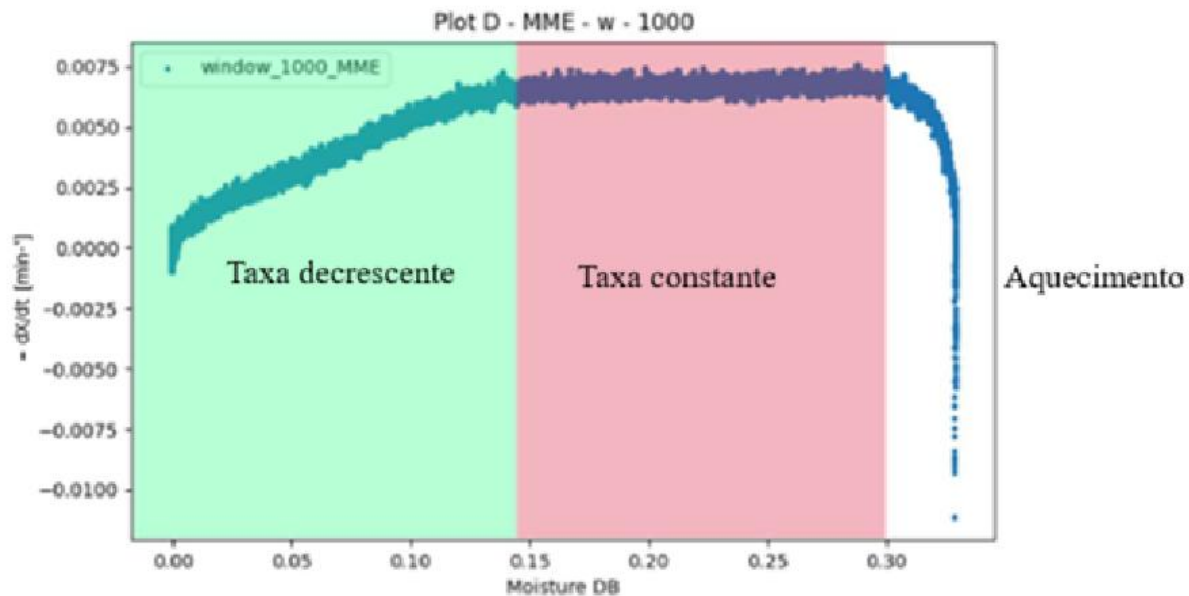
Fonte: Autoria Própria

## 4.5 ANÁLISE DOS PARÂMETROS DE SECAGEM.

### 4.5.1 Etapas do Processo

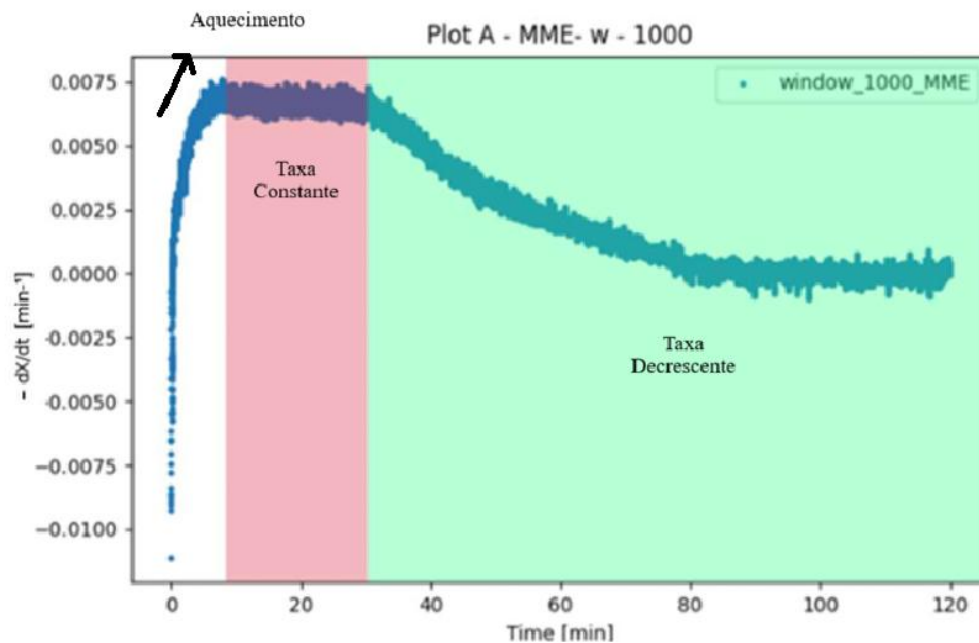
Através de análises visuais, é possível observar as três etapas da secagem: a etapa de aquecimento (destacada em branco na Figura 25); a etapa da taxa de secagem constante (destacada em vermelho); e de taxa de secagem decrescente (destacada em verde). As figuras 25 e 26 representam isso, mostrando tanto a taxa em função da umidade em base seca e em função do tempo para o ensaio de com amostra em 21mm e 90° C de temperatura, respectivamente.

**Figura 25.** Destaque das etapas de secagem no plote  $-dX/dt$  em função da umidade em base seca.



Fonte: Autoria Própria

**Figura 26.** Destaque das etapas de secagem no plote  $-dX/dt$  em função do tempo.



Fonte: Autoria Própria

Primeiro ponto interessante a se notar é que as umidades mais altas estão à direita na Figura 25, mas elas estão nos instantes iniciais da secagem. Observa-se que os instantes iniciais da secagem foram assim destacados em branco, no extremo à direita da figura. Já a Figura 26 apresenta essa mesma região em destaque no extremo esquerdo. As demais regiões (verde e vermelho) seguem na sequência, em ambas as figuras.

A amostra de manganês entra mais fria que o ambiente da estufa e o tempo de processo de aquecimento decorre até que se atinja condição de estado estacionário em termos de temperatura, de forma que aos poucos a taxa de secagem vai aumentando até atingir o ponto em que a taxa se mantém constante. Os valores negativos para a taxa podem ser justificados pelos ruídos dos dados experimentais, significando apenas que a taxa nesses pontos está muito próxima de zero. Essa etapa durou cerca de 10 minutos e teve sua umidade em base seca variando de aproximadamente 0,35 a 0,3 kg água/ kg sólido seco.

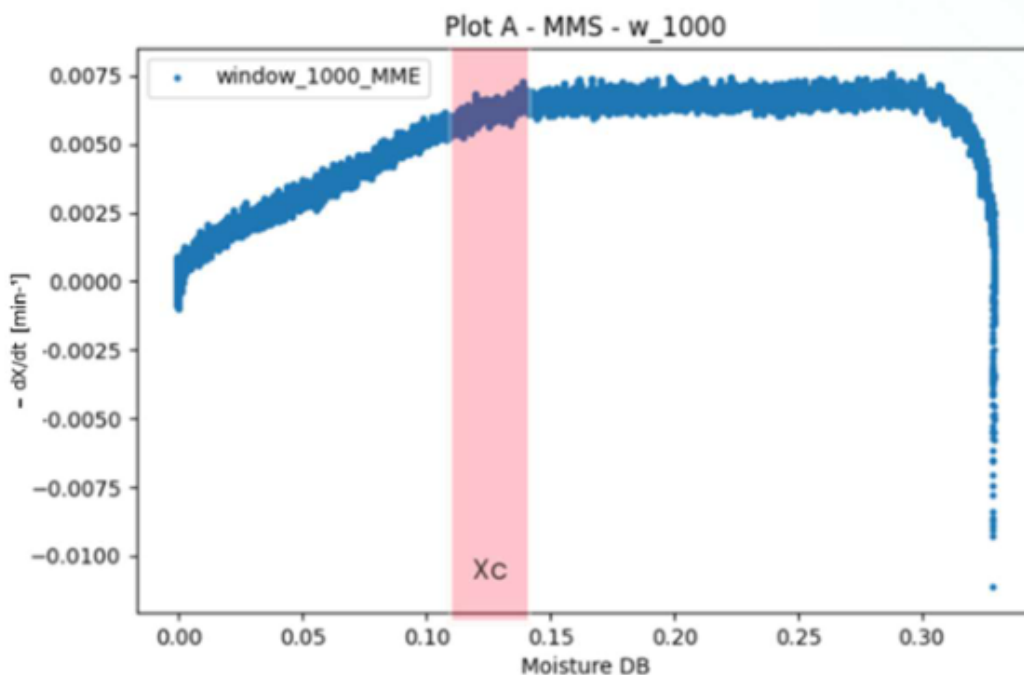
A segunda etapa é referente a taxa de secagem constante, destacada em vermelho. Nessa etapa da secagem a umidade superficial é removida, em que está presente a maior taxa de secagem, pois os efeitos resistivos de transporte interno ao *pellet* ainda não são relevantes. Essa etapa ocorreu entre os 10 e 30 minutos do ensaio, além disso, a umidade em base seca foi de aproximadamente 0,3 a 0,14 kg água/ kg sólido seco.

A terceira etapa é àquela que ocorre com taxa de secagem decrescente. Como pôde-se observar, vai se tornando cada vez mais difícil remover a água presente no material, demorando mais tempo para evaporar uma menor quantidade de água. Nesse período, umidade ligada está sendo removida, que prossegue sendo removida até a condição de equilíbrio da água no sólido com o ar de secagem. Essa etapa foi de 30 até 120 minutos de ensaio, se iniciando com umidade em base seca de aproximadamente 0,14 até aproximadamente 0 kg água/ kg sólido seco no encerramento. Como o material é não higroscópico, a umidade de equilíbrio é aproximadamente nula, assim, a taxa de secagem cai a zero para umidade próxima a zero.

#### 4.5.2 Umidade Crítica

O ponto crítico é o valor da umidade do sólido em que termina o período de taxa constante ( $X_c$ ). Através de métodos gráficos, é possível determinar visualmente uma aproximação para o  $X_c$ . Na Figura 27, é possível visualizar que o ponto em questão se encontra em um  $X_c$  entre 0,11 e 0,14 para o ensaio de 21mm e 90°C de temperatura.

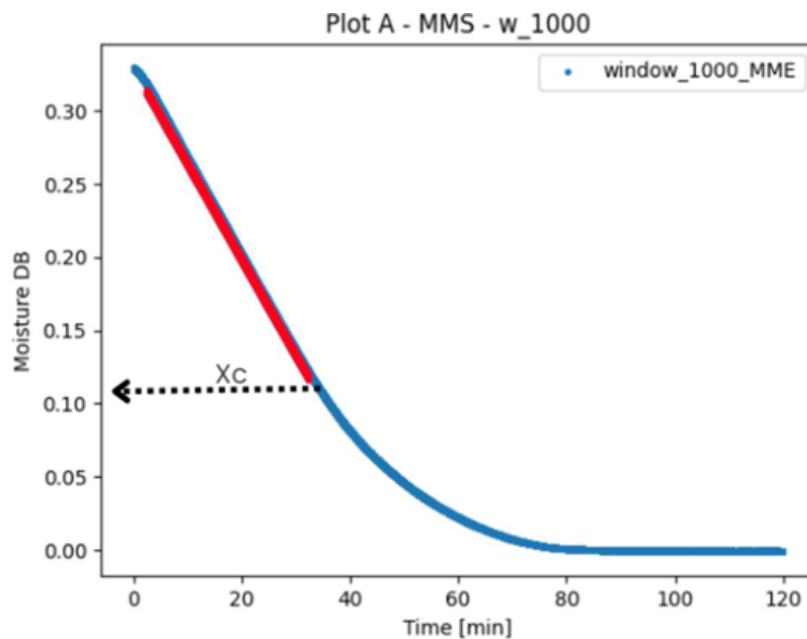
**Figura 27.** Região da Umidade Crítica ( $X_c$ ) através do gráfico  $-dX/dt$  em função da Umidade em base



Fonte: Autoria Própria

Outro método de determinação de  $X_c$  é através da análise da umidade em base seca em função do tempo. Enquanto os primeiros pontos da tendência formarem uma reta, os dados em série pertenceriam à região de taxa constante. Portanto, o último ponto da reta seria o ponto crítico, podendo localizar o  $X_c$ . Através da Figura 28, observa-se um valor de  $X_c$  entre 0,11 e 0,12, de acordo também com a análise anterior.

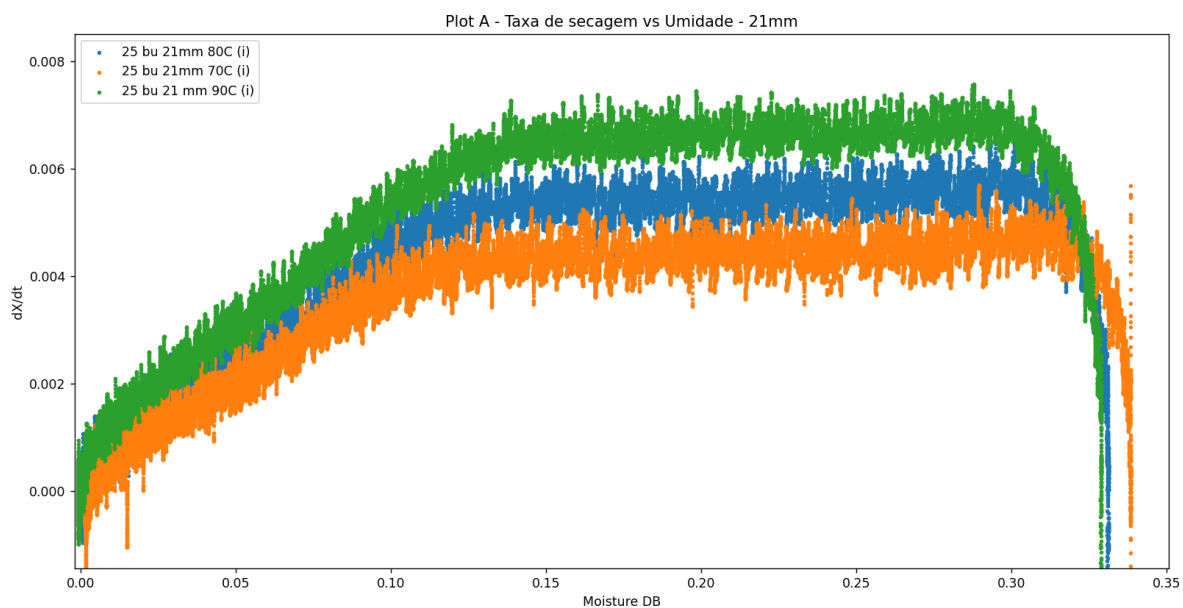
**Figura 28.** Região da Umidade Crítica ( $X_c$ ) através do gráfico de Umidade em base seca em função do tempo



Fonte: Autoria Própria

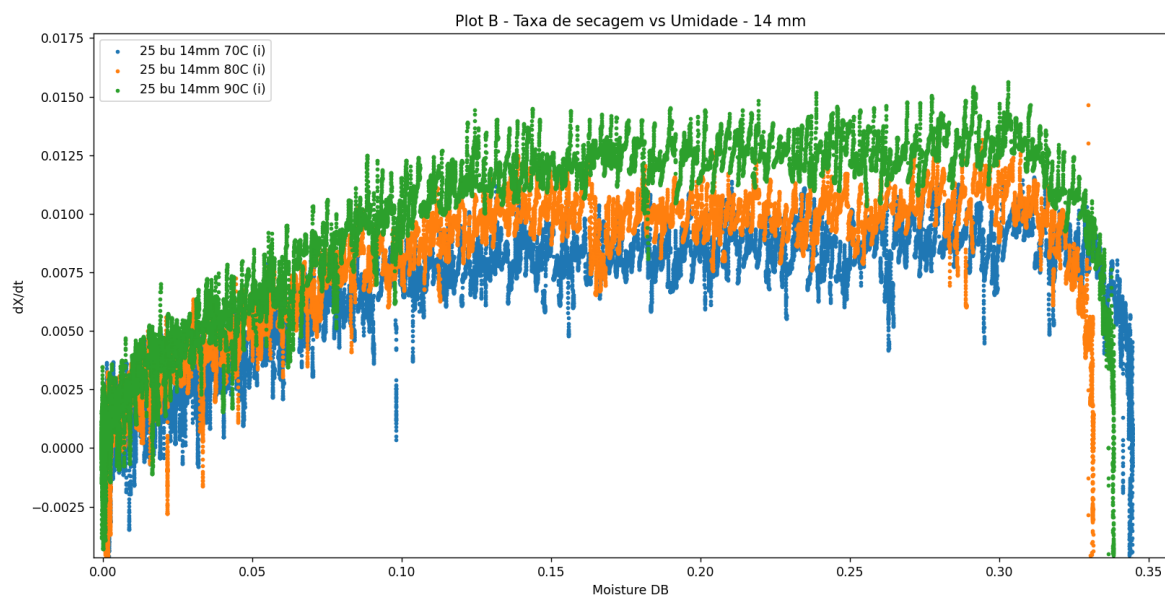
A Figura 29 e 30 trazem os ensaios com diâmetro de 21 mm e 14 mm, respectivamente, com a taxa de secagem em função da umidade, em um mesmo gráfico. Mais de um ensaio em uma mesma figura como essas também são opções de saída disponíveis no programa. A Tabela 2 traz um resumo dos resultados dos ensaios.

**Figura 29.** Taxa de secagem em função da umidade em base seca para ensaio de 21mm a 70°C, 80°C e 90°C.



Fonte: Autoria Própria

**Figura 30.** Taxa de secagem em função da umidade em base seca para ensaio de 14mm a 70°C, 80°C e 90°C.



Fonte: Autoria Própria

**Tabela 2.** Umidade crítica dos ensaios de secagem do minério de manganês em 21mm e 14mm de diâmetro e temperaturas de 70°C, 80°C e 90°C

Diâmetro [mm]	Temperatura [°C]	Xc b.s. [kg água/ kg sólido seco]
21	70	0,11 – 0,13
	80	0,10 – 0,12
	90	0,10 – 0,12
14	70	0,10 – 0,12
	80	0,12 – 0,14
	90	0,10 – 0,12

Fonte: Autoria Própria

Como pode-se observar pela tabela, todos os ensaios obtiveram Xc por métodos visuais muito próximos, variando de 0.10 a 0.14 kg água/ kg sólido seco.

Analisando o estilo da curva geradas nas figuras 29 e 30, pode-se compará-las com as curvas de secagem de Oliver e Ashworth (1982), destacado na Figura 3, em que é possível observar que os ensaios de manganês apresentaram um comportamento típico de materiais parcialmente higroscópicos, como uma tendencia de curva levemente voltada mais a materiais não higroscópios do que higroscópios. Conforme esperado, a taxa de secagem em período constante é maior quanto maior a temperatura e para os menores *pellets*. O comportamento com a temperatura é adequado já que a força motriz da transferência de calor é maior em maiores temperaturas. O comportamento com o tamanho do *pellet* ocorre devido à fluidodinâmica do ar que se move em torno do corpo, proporcionando maiores coeficientes de transporte para partículas menores. Podemos observar ainda que as Figuras 29 e 30 mostram alguns poucos pontos deslocados da curva mais à direita no gráfico. Esses pontos são desvios do próprio ensaio experimental, considerados normais e que não influenciam nas análises dos resultados. A Tabela 3 traz os valores de taxa de secagem dos períodos constante para cada ensaio, obtidos visualmente através das Figuras 29 e 30.

**Tabela 3.** Taxa de secagem no período constante dos ensaios de secagem do minério de manganês em 21mm e 14mm de diâmetro e temperaturas de 70°C, 80°C e 90°C.

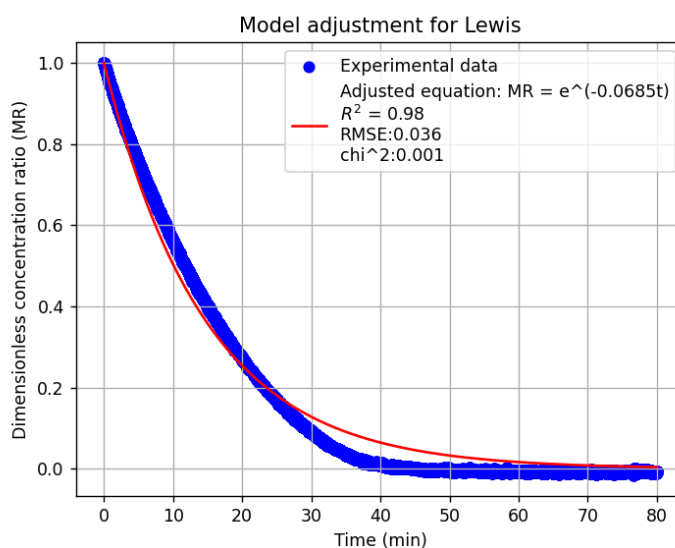
Diâmetro [mm]	Temperatura [°C]	-dX/dt (Parte constante) [ $min^{-1}$ ]
21	70	0,0044 – 0,0046
	80	0,0054 – 0,0056
	90	0,0065 – 0,0067
14	70	0,0084 – 0,0086
	80	0,0099 – 0,0101
	90	0,0122 – 0,0124

Fonte: Autoria Própria

#### 4.5.3 Ajustes com Equações Empíricas de Cinética de Secagem

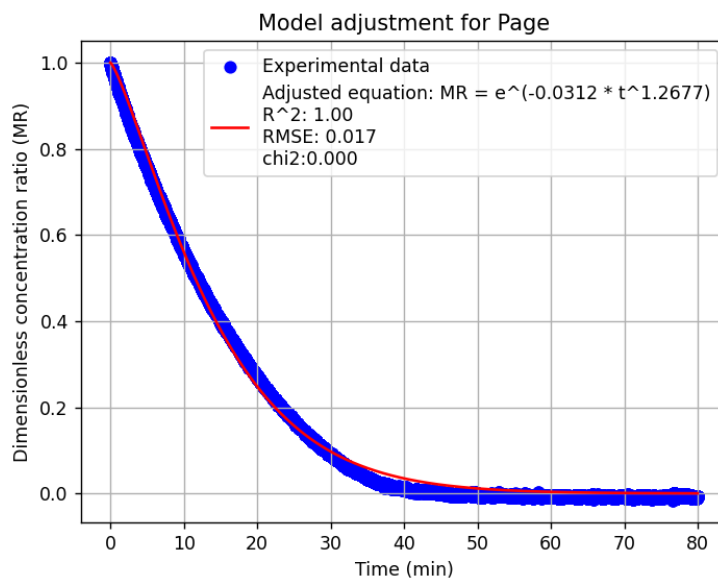
Os ensaios foram modelados no programa, gerando como saída: os gráficos, os valores das variáveis ajustáveis, a curva da equação ajustada, o valor  $R^2$  do ajuste em relação aos dados experimentais, o RMSE e o Qui-quadrado. As figuras 31, 32 e 33 exemplificam os resultados para o ensaio de 21 mm e 90 °C, para o modelo de Lewis, Page e Henderson e Pabis, respectivamente.

**Figura 31.** Ajuste para modelo de Lewis no ensaio da amostra com 21mm e em 90°C.



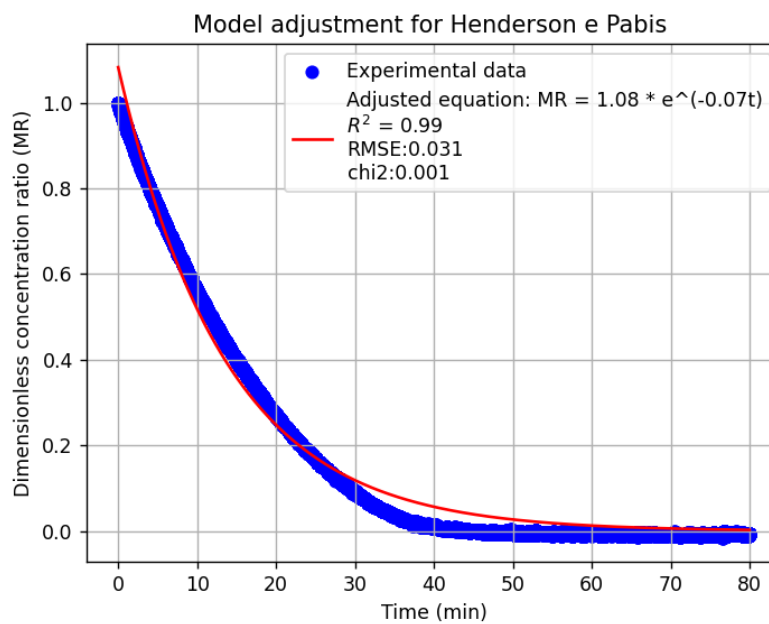
Fonte: Autoria Própria

**Figura 32.** Ajuste para modelo de Page no ensaio da amostra com 21mm e em 90°C.



Fonte: Autoria Própria

**Figura 33.** Ajuste para modelo de Henderson e Pabis no ensaio da amostra com 21mm e em 90°C.



Fonte: Autoria Própria

A Tabela 4, 5 e 6 reúne os resultados e parâmetros ajustados para cada modelo e ensaio com ajuste de Lewis, Page e Henderson e Pabis, respectivamente.

**Tabela 4.** Resultados do modelo de Lewis.

Diâmetro [mm]	Temperatura [°C]	Lewis			
		k	R <sup>2</sup>	RMSE	$\chi^2$
21	70	0,0364	0,99	0,018	0,000
	80	0,0493	0,99	0,018	0,000
	90	0,0685	0,98	0,036	0,001
14	70	0,0793	0,99	0,024	0,001
	80	0,1134	0,99	0,023	0,001
	90	0,1652	0,98	0,034	0,001

Fonte: Autoria Própria

**Tabela 5.** Resultados do modelo de Page.

Diâmetro [mm]	Temperatura [°C]	Page				
		k	n	R <sup>2</sup>	RMSE	$\chi^2$
21	70	0,0206	1,1604	1,00	0,008	0,000
	80	0,0308	1,1455	1,00	0,010	0,000
	90	0,0312	1,2677	1,00	0,017	0,000
14	70	0,0504	1,1643	1,00	0,011	0,000
	80	0,0660	1,2187	0,99	0,017	0,000
	90	0,0858	1,3214	1,00	0,017	0,000

Fonte: Autoria Própria

**Tabela 6.** Resultados do modelo de Henderson e Pabis.

Diâmetro [mm]	Temperatura [°C]	Henderson e Pabis				
		k	a	R <sup>2</sup>	RMSE	$\chi^2$
21	70	0,0386	1,0642	1,00	0,014	0,000
	80	0,0516	1,0485	1,00	0,016	0,000
	90	0,0736	1,0827	1,00	0,031	0,001
14	70	0,0837	1,0578	0,99	0,020	0,000
	80	0,1191	1,0692	0,99	0,022	0,000
	90	0,1804	1,1052	0,99	0,028	0,001

Fonte: Autoria Própria

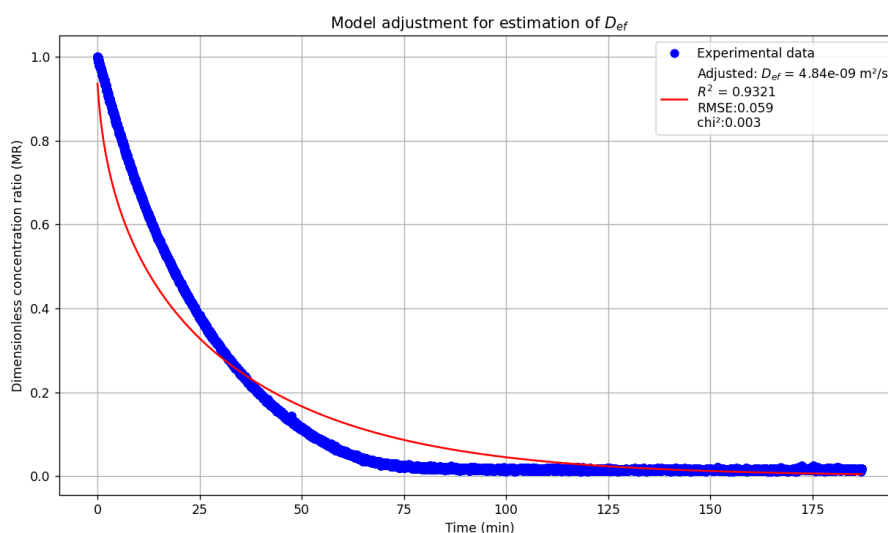
Como é possível observar, os dados se adequam muito bem aos modelos com R<sup>2</sup> de 0,98 a 1,00 e RMSE e qui-quadrados pequenos. Quanto mais próximo o R<sup>2</sup> está de 1 e menor o valor de RMSE e  $\chi^2$ , mais os dados se enquadram ao determinado modelo.

Os valores foram conferidos através de cálculos realizados em planilha de Excel utilizando as funções e montagens necessárias e com o uso da ferramenta *solver*. Hidalgo (2024) realizou tal análise com o Manganês em camadas finas sobre placas de Petri, alcançando resultados bem semelhantes, também com R<sup>2</sup> bem próximos de um e RMSE e  $\chi^2$  bem próximos de zero.

#### 4.5.4 Ajustes Com Modelo De Difusividade Efetiva Com Geometria Esférica

De modo análogo aos ajustes para as equações empíricas, o modelo difusivo também foi ajustado aos dados experimentais, permitindo a estimativa dos coeficientes de difusividade mássica efetiva ( $D_{ef}$ ) para cada condição de temperatura e diâmetro de amostra. A figura 34 exemplifica a saída gráfico que resultada do programa para o ensaio de 21mm e 70°C.

**Figura 34.** Ajuste dos dados experimentais com modelo de difusividade efetiva de geometria esférica para ensaio de 21mm de diâmetro e em 70°C.



Fonte: Autoria Própria

A Tabela 7 reúne os ajustes e cálculos do modelo de difusividade esférica para todos os ensaios.

**Tabela 7.** Resultados dos ajustes em modelo de difusividade efetiva para cada ensaio.

Diâmetro [mm]	Temperatura [°C]	$D_{ef}$ [m <sup>2</sup> /s]	R <sup>2</sup>	RMSE	$\chi^2$
21	70	$4,84 \times 10^{-9}$	0,9321	0,059	0,003
	80	$6,14 \times 10^{-9}$	0,9241	0,063	0,004
	90	$7,53 \times 10^{-9}$	0,8996	0,084	0,007
14	70	$4,54 \times 10^{-9}$	0,9104	0,078	0,006
	80	$5,88 \times 10^{-9}$	0,9195	0,058	0,003
	90	$6,64 \times 10^{-9}$	0,9053	0,076	0,006

Fonte: Autoria Própria

Os valores ajustados apresentaram coeficientes de determinação (R<sup>2</sup>) variando entre 0,8996 e 0,9321, erros quadráticos médios (RMSE) de 0,058 a 0,084 e qui-quadrados ( $\chi^2$ ) entre 0,003 e 0,007, indicando uma qualidade de ajuste satisfatória. Embora os resultados sejam relativamente

inferiores aos obtidos com os modelos empíricos (que apresentaram  $R^2 > 0,98$ ), o modelo difusivo ainda representa de forma adequada o comportamento experimental, considerando sua natureza mais complexa e fundamentação teórica.

Os valores de difusividade efetiva encontrados estão na faixa de  $4,54 \times 10^{-9}$  a  $7,53 \times 10^{-9}$   $m^2/s$ , grandezas coerentes com as reportadas na literatura para minérios nas condições parecidas, assim como os valores de  $R^2$ , RMSE e  $\chi^2$  também foram condizentes (HIDALGO, 2025). Esses valores refletem o transporte de umidade no interior do material durante o processo de secagem, estando diretamente relacionados à resistência interna à difusão. Observa-se ainda que, para um mesmo diâmetro de partícula, o valor de  $D_{ef}$  aumenta com o acréscimo da temperatura do ar de secagem. Esse comportamento é esperado, uma vez que o aumento da temperatura promove maior mobilidade das moléculas de água no interior, aumentando, portanto, sua difusividade efetiva.

## 5 CONCLUSÃO

O programa foi desenvolvido com sucesso. O executável é capaz de realizar o processamento dos dados de secagem, construir gráficos para análise do processo, avaliação da reprodutibilidade e comparação de diferentes condições operacionais, além de aplicar métodos de filtragem e efetuar os cálculos associados à cinética de secagem. O programa também permite a modelagem dos dados experimentais por meio das equações empíricas de Lewis, Page e Henderson e Pabis, bem como a estimativa da difusividade mássica efetiva a partir do ajuste de modelos difusivos com geometria esférica. Adicionalmente, a qualidade dos ajustes é avaliada por meio de representações gráficas e de critérios estatísticos, como o coeficiente de determinação ( $R^2$ ), o erro quadrático médio (RMSE) e o teste do qui-quadrado. A interface do usuário com a rotina se dá de maneira simples e eficiente através de planilhas de cálculo. Os vídeos e texto de apoio se mostraram úteis e eficazes. Espera-se que o programa auxilie em futuros trabalhos da equipe de secagem, não só envolvendo o minério de manganês, mas qualquer secagem cuja aquisição de massa a partir de uma balança em linha gere dados brutos no formato de texto.

Através das análises gráficas dos resultados envolvendo o ensaio da secagem do manganês em formato esférico de 21 mm e 14 mm a 70°C, 80°C e 90°C, foi possível observar as etapas do processo de secagem, encontrar um bom valor de janela de filtragem em 1000 pontos e encontrar valores valor de  $X_c$  pelos métodos gráficos visuais entre 0,10 – 0,14. Além disso, foi possível encontrar valores de ajustes dos parâmetros dos modelos de secagem empíricos, aos quais se ajustaram muito bem aos dados experimentais, em especial o modelo de Page com  $R^2$  todos muito próximos de 1 e RMSE entre 0,008 e 0,017. Embora os ajustes do modelo difusivo tenham apresentado ajuste um pouco piores, ainda representam uma boa correlação com os dados experimentais, com  $R^2$  de 0,899 a 0,932, e retornaram valores de difusividade efetiva bem condizentes em ordem de grandeza e próximos do encontrado na literatura, variando de  $4,84 \times 10^{-9} \left[ \frac{m^2}{s} \right]$  a  $7,53 \times 10^{-9} \left[ \frac{m^2}{s} \right]$ , aumentando conforme a temperatura para um mesmo diâmetro, como o esperado. Todos esses tratamentos indicaram caminhos de análise e a aplicabilidade do programa desenvolvido.

## 6 REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO; **Anuário Mineral Brasileiro Principais Substância**. Brasília, 2022. 16, 19 p. Disponível em: <<https://www.gov.br/anm/pt-br/assuntos/economia-mineral/publicacoes/anuariomineral/anuario-mineral-brasileiro/PreviaAMB2022.pdf>>. Acesso em: mai. de 2024.

BEVINGTON, P. R.; ROBINSON, D. K. **Data Reduction and Error Analysis for the Physical Sciences**. 3. ed. New York: McGraw-Hill, 2003.

CHAVES, A. P. et al. Noções básicas. In: \_\_\_\_\_. **Teoria e Prática do Tratamento de Minérios: Bombeamento de Polpa e Classificação**. 4 ed. São Paulo, Oficina de Textos, Vol. 1, Cap. 1, p. 9–92, 2012.

COSTA, M. R. M; SILVA, J. P. A.; SILVA, R. D.; **Manganês**. Sumário Brasileiro Mineral, Ministério das Minas Energia: Brasília, 2018. 1-2 p. Disponível em: <<https://www.gov.br/anm/pt-br/assuntos/economia-mineral/publicacoes/sumario/mineral/pasta-sumario-brasileiro-mineral-2018/manganes/view>>. Acesso em: mai. de 2024.

COSTA, Ennio Cruz da. **Secagem industrial**. 1. ed. São Paulo: Blucher, 2007. E-book. Disponível em: <<https://plataforma.bvirtual.com.br>. Acesso em: 28 nov 2025>. Acesso em: nov. de 2025.

CRANK, J. **The mathematics of diffusion**, 2nd ed. Oxford University Press, London, 1975.

CREMASCO, M. A. **Fundamentos de Transferência de Massa**. 2. ed. Campinas: Editora Átomo, 2002.

DIAS, T. G.; CAXITO, F. **Manganês. Recursos Minerais de Minas Gerais**. Ministério das Minas e Energia: Brasília, 2018. 16 p. Disponível em: <<http://recursomineralmg.codemge.com.br/wp-content/uploads/2018/10/Manganes.pdf>> Acesso em: abr. 2025

DUMAS, A. J.; LAMBERT, G.; HOCK, R.T..J; VICENSE, V.C.; **Filtros ativos**. Disponível em: <<https://pt.slideshare.net/slideshow/filtros-ativos/14549654> > Acesso: mai. de 2024.

FIGUEIRA, H. V. O.; LUZ, A. B.; ALMEIDA, S. L. M. **Britagem E Moagem**. In: LUZ, A. B.; SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A. Tratamento De Minérios. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010. Cap. 4, p. 143–210.

FOUST, A. S.; WENZEL, L. A.; CLUMP, C. W.; MAUS, L.; ANDERSEN, L. B. **Princípios das operações unitárias**. 2a ed. Rio de Janeiro: LTC, 1982. 670 p.

GEANKOPLIS, C. J. **Transport Processes and Separation Process Principles**. 4. ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2003.

GOUD, M. et al. A novel indirect solar dryer with inlet fans powered by solar PV panels: Drying kinetics of *Capsicum annum* and *Abelmoschus esculentus* with dryer performance. **Solar Energy**, 2020. DOI: 10.1016/j.solener.2019.11.031.

HIDALGO, Letícia Ferraresi. **Secagem convectiva de minério de manganês**. 2025. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2025. Disponível em: <<https://repositorio.ufscar.br/handle/20.500.14289/21608>>. Acesso em: nov. de 2025.

HIDALGO, L. F. **Avaliação de processo em secador solar direto assistido por módulo fotovoltaico: aplicação para secagem de alimentos**. 2021, 95 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2021.

HYNDMAN, R.J. (2011). **Moving Averages**. In: Lovric, M. (eds) International Encyclopedia Statistical Science. Disponível em: <[https://doi.org/10.1007/978-3-642-04898-2\\_380](https://doi.org/10.1007/978-3-642-04898-2_380)>. Acesso em nov. de 2025.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO (IBRAM); **A Importância do Limite de Umidade para Transporte Marítimo de Minério**. 2021. Disponível em: <<https://ibram.org.br/noticia/a-importancia-do-limite-de-umidade-para-transportemaritimo-de-minerio/>> Acesso em: maio. 2024.

INYANG, U. E.; OBOH, I. O.; ETUK, B. R. **Kinetic Models for Drying Techniques—Food Materials**. *Advances in Chemical Engineering and Science*, v. 8, n. 2, p. 27–48, 2018.

J. D. LEE. **Química inorgânica não tão concisa**. 5º Edição, 371 p. Editora Blucher, São Paulo, 1999.

KOUHILA, M. et al. **Drying characteristics and kinetics solar drying of Mediterranean mussel (*mytilus galloprovincilis*) type under forced convection.** *Renewable Energy*, v. 147, n. 1, p. 833-844, 2020. DOI: 10.1016/j.renene.2019.09.055..

MARQUARDT, D. W. **An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters.** *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics*, v. 11, n. 2, p. 431–441, 1963.

MARTINS, F. P. Bosch Neto, J. C. ., Silva, A. J. O., & Siqueira, A. M. de O. **.Drying: a review. The Journal of Engineering and Exact Sciences**, 2020. Disponível em:<<https://doi.org/10.18540/jcecvl6iss4pp0600-0607i>>. Acesso: mai. de 2025.

MCCABE, W. L.; SMITH, J. C.; HARRIOTT, P. **Drying of solids. In: Unit Operations of Chemical Engineering.** 5. ed., McGraw-Hill, Inc., 1991. Cap. 24.

MARINOS-KOURIS, D.; MAROULIS, Z. B. Transport properties in the drying of solids. In: MUJUMDAR, A. S. (editor) **Handbook of Industrial Drying.** Nova York (EUA): Marcel Dekker, 1995.

OLIVER, D. R.; ASHWORTH, J. C. **Industrial Solids Drying, Course Notes.** Drying Research Limited, Merry Hill/Wolverhampton, England, 1982.

REYES, A. et al. **Mushroom dehydration in a hybrid-solar dryer. Energy Conversion and Management**, v. 70, p. 31-39, 2013. DOI: 10.1016/j.enconman.2013.01.032.

SAMPAIO, J. A. et al. Manganês. In: **Rochas e Minerais Industriais no Brasil: usos e especificações.** 2.ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2008. Cap. 28, p. 633–648.

SARTORELLI, E. **Média Móvel Simples, Exponencial e Ponderada: Fórmulas e Exemplos.** 2024. Disponível em: <[https://www.rankia.pt/acoes/medias-moveis-simples-sma e-exponenciais-ema/#a](https://www.rankia.pt/acoes/medias-moveis-simples-sma-e-exponenciais-ema/#a)> Acesso em: maio. 2024.

ŞEVIK, S. et al. **Performance analysis of solar and solar-infrared dryer of mint and apple slices using energy-exergy methodology. Solar Energy**, v. 180, p. 537-549, 2019. DOI: 10.1016/j.solener.2019.01.049.

SOUZA PINTO, T. C. et al. **Characterization and drying kinetics of iron ore pellet feed and sinter feed.** *Drying Technology*. p. 1–12, 2020. DOI: 10.1080/07373937.2020.1747073.

SUHERMAN, S. et al. **Energy–exergy analysis and mathematical modeling of cassava starch drying using a hybrid solar dryer.** *Cogent Engineering*, v. 7, n. 1, 1771819, 2020. DOI: 10.1080/23311916.2020.1771819.

TANGSTAD, M. Manganese Ferroalloys Technology. In: GASIK, M. (ed.). **Handbook of Ferroalloys: Theory and Technology.** Elsevier Ltd., 2013. Cap. 7, p. 221–266. DOI: 10.1016/b978-0-08-097753-9.00007-1.

ZOGZAS, N. P., MAROULIS, Z. B. **Effective Moisture Diffusivity Estimation from Drying Data. A Comparison Between Various Methods of Analysis,** *Drying Technology: An International Journal*, 14:7-8 (1996) 1543 – 1573.