

• U • C •

FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS
E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECÂNICA

Modelação do processo de secagem de lamas de ETAR por convecção natural

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia
Mecânica na Especialidade de Energia e Ambiente

WTP sewer sludge drying process modelling by natural convection

Autor

Samuel Tavares Costa

Orientadores

José Carlos Miranda Góis

Miguel Rosa Oliveira Panão

Júri

Presidente Professor Doutor José Joaquim da Costa
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

Professor Doutor José Carlos Miranda Góis
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

Vogais

Professor Doutor António Rui de Almeida Figueiredo
Professor Associado da Universidade de Coimbra

Coimbra, Setembro, 2018

Agradecimentos

Embora uma dissertação seja, pela sua finalidade académica, um trabalho individual, há contributos de natureza diversa que não podem, nem devem deixar de ser realçados. Por essa razão, desejo expressar os meus sinceros agradecimentos: à Universidade de Coimbra por me proporcionar a oportunidade de praticar e aprender e por me fornecer as ferramentas sem as quais não seria possível realizar este projeto. Aos meus orientadores, José Carlos Miranda Góis e Miguel Rosa Oliveira Panão, pela disponibilidade e o valioso acompanhamento durante o desenvolvimento deste trabalho, assim como a todos os professores pela incansável vontade de partilhar o saber. Ao Luciano de Andrade Gomes, pelo grande contributo na parte laboratorial deste projeto. Aos colegas de curso e amigos pelo companheirismo ao ajudarem-me a percorrer este muito proveitoso caminho. Aos meus dois irmãos, por tantas vezes me fazerem esquecer que estava longe de casa. Aos meus pais, por tudo.

Resumo

As lamas oriundas do tratamento dos efluentes de ETAR (Estação de tratamento de águas residuais) urbanas e/ou industriais apresentam, no final do tratamento, uma humidade acima de 80%, já depois de desidratadas por meios mecânicos. Atualmente, a maioria destas lamas podem ser valorizadas na agricultura, como corretor de solos ou encaminhadas para incineração para produção termoelétrica. Contudo, a elevada humidade das lamas dificulta e encarece a gestão por parte dos operadores deste tipo de resíduo. A secagem térmica permite baixar a humidade para valores da ordem de 20% ou menos, reduzir consideravelmente o volume, eliminar os agentes patogénicos e reduzir os maus odores.

Este estudo destina-se a desenvolver um modelo empírico que permita prever a cinética de secagem de lamas de ETAR em função da temperatura do ar para um regime de convecção natural e para lama sob a forma de cilindros longos. O modelo proposto tem a vantagem de considerar as três fases de secagem separadamente, o que se traduz numa melhor representatividade da cinética de secagem. O modelo foi desenvolvido com base em resultados experimentais de secagem realizados em estufa numa gama de temperaturas entre os 40 °C e 130 °C. As lamas utilizadas para o estudo experimental são provenientes da ETAR do Choupal, em Coimbra. Com base nos resultados experimentais foram estimadas a difusividade efetiva e o coeficiente de transferência de massa em função da temperatura de secagem. Os valores obtidos estão dentro dos valores que são típicos para este tipo de lamas e gama de temperaturas ensaiada.

As previsões obtidas pelo modelo proposto são comparadas com os resultados experimentais obtidos, através de métodos estatísticos como o R, o RMSE, o erro médio absoluto e o χ^2 . Para além da gama de temperaturas ensaiadas, conclui-se que o modelo empírico permite uma boa correlação com os resultados experimentais para a temperatura de secagem superior, no caso 150 °C.

Palavras-chave: Cinética de secagem, Fases de secagem, Difusividade efetiva, Transferência de massa, Temperatura, humidade.

Abstract

The wastewater treatment process in WTP, both in an industrial and/or urban plant, produces sewer sludge with a moisture above 80% although a mechanical dehydration treatment. Nowadays, the sewer sludge can be valorized in agriculture as a soil conditioner or, transformed in heat or electricity by incineration. However, the high quantity of moisture present in the sewer sludge is a constraint for the waste management operators and increase the costs. The thermal drying reduces the moisture content to about 20% or lower, allows to reduce its volume, destroys pathogens and reduces unpleasant odors.

The objective of this study is to develop an empirical model for the prediction of the drying kinetics of the WTP sewer sludge as a function of the drying air temperature, for a natural convection regime and for cylindrical sewer sludge samples. The proposed model describes the drying process in three stages, improving the accuracy of the prediction. This model was developed based on the experimental results of drying process of sewer sludge cylinder samples for a temperature range between 40 °C and 130 °C. The sludge used is originated from Choupal WTP in Coimbra. The values for the effective diffusion and mass transfer coefficient were estimated based on the experimental results and were similar to those found in the literature.

The prediction results based on the proposed model were compared with the experimental ones using statistical factors like the R, RMSE, mean absolute error and χ^2 . The proposed model was tested for drying air temperature until 150 °C showing a good approach with the experimental results.

Keywords Drying kinetics, Drying stage, Effective diffusion, Mass transfer, Temperature, Moisture.

Índice

Índice de Figuras	ix
Índice de Tabelas	xi
Simbologia.....	xiii
1. Introdução.....	1
1.1. Enquadramento do estudo e motivação	1
1.2. Objetivos.....	3
2. Estado da Arte	5
2.1. Constituintes das lamas de ETAR.....	5
2.2. Tecnologias de secagem	6
2.3. Adjuvantes ao processo de secagem.....	7
2.4. Fases de secagem.....	8
2.5. Evolução dos modelos teóricos de secagem de materiais porosos	10
2.6. Modelação da secagem com base empírica	11
3. Materiais e métodos.....	13
3.1. Metodologia experimental	13
3.2. Perfil de secagem	15
3.3. Determinação das propriedades das lamas	16
4. Resultados e discussão	19
4.1. Perfil de secagem	19
4.1.1. Caracterização das fases de secagem.....	20
4.1.2. Parâmetros da secagem.....	25
4.2. Determinação das propriedades de secagem das lamas.....	28
4.3. Previsões recorrendo ao modelo desenvolvido.....	32
5. Conclusões.....	37
Referências Bibliográficas.....	39
Apêndice.....	43

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1 - Distribuição da água livre em taxa de secagem constante, adaptado de Dalmaz et al., 2007	8
Figura 2-2 - Distribuição da água livre para o decaimento da taxa de secagem, adaptado de Dalmaz et al., 2007.....	9
Figura 3-1 - Geometria da lama antes da secagem a) materiais utilizados na construção dos cilindros b) conjunto cilindros/vidro-relógio c) Representação esquemática do fabrico das amostras	14
Figura 4-1 - Decaimento de humidade da lama para as diferentes temperaturas	19
Figura 4-2 - Variação da humidade das amostras no decaimento de humidade para a) 40 °C, b) 70 °C, c) 100 °C, d) 130 °C	20
Figura 4-3 - Fases de secagem a 40 °C, a) Fase de secagem constante, b) 1ª fase de decaimento, c) 2ª fase de decaimento.....	21
Figura 4-4 - Fases de secagem a 70 °C, a) Fase de secagem constante, b) 1ª fase de decaimento, c) 2ª fase de decaimento.....	22
Figura 4-5 - Fases de secagem a 100 °C, a) Fase de secagem constante, b) 1ª fase de decaimento, c) 2ª fase de decaimento.....	23
Figura 4-6 - Fases de secagem a 130 °C, a) Fase de secagem constante, b) 1ª fase de decaimento, c) 2ª fase de decaimento.....	24
Figura 4-7 - Variação dos instantes de mudança de fase com a temperatura a) 1ª mudança de fase, b) 2ª mudança de fase.....	26
Figura 4-8 - Comportamento dos coeficientes do modelo em função da temperatura, a) coeficiente a, b) coeficiente b, c) coeficiente c, d) coeficiente d, e) coeficiente e.....	28
Figura 4-9 – Determinação dos coeficientes para o cálculo das propriedades, a) 40 °C, b) 70 °C, c) 100 °C, d) 130 °C.....	30
Figura 4-10 - Variação da difusividade efetiva	31
Figura 4-11 - Variação do coeficiente de transferência de massa	31
Figura 4-12 - Comparação dos resultados previstos com os experimentais.....	34

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2-1 - Modelos de cinética de secagem empíricos	11
Tabela 4-1 - Coeficientes do modelo a diferentes temperaturas	25
Tabela 4-2 – Coeficientes k_0 e k	30
Tabela 4-3 – Propriedades da lama	30
Tabela 4-4 - Coeficientes previstos	32
Tabela 4-5 - Propriedades previstas.....	32
Tabela 4-6 - Comparação dos resultados previstos com os experimentais	33
Tabela 4-7 - Avaliação da fiabilidade do modelo.....	35

SIMBOLOGIA

a, \dots, e – Coeficientes do modelo

h_m – Coeficiente de transferência de massa [m/s]

D_{eff} – Difusividade efetiva [m²/s]

M_0 – Conteúdo de humidade inicial [g água/g lama/seca]

MR – Humidade adimensionalizada

\overline{MR} – Valor médio da humidade

MR_{exp} – Valor da humidade experimental

MR_{prev} – Valor da humidade previsto

M_e – Conteúdo de humidade no equilíbrio [g água/g lama/seca]

M_t – Conteúdo de humidade em qualquer instante [g água/g lama/seca]

m_e – Massa no equilíbrio [g]

m_f – Massa final [g]

m_i – Massa inicial [g]

m_t – Massa a qualquer instante [g]

N – Número de amostras

R – Coeficiente de correlação

r – Raio da amostra [m]

RMSE – Erro médio quadrático

t_1, t_2 – Instantes de mudança de fase [min]

χ^2 – Chi-quadrado

1. INTRODUÇÃO

1.1. Enquadramento do estudo e motivação

Nas últimas décadas o aumento da população mundial e o crescimento económico tem contribuído para uma crescente degradação ambiental do Planeta. A produção crescente de resíduos e a sua perigosidade são das maiores preocupações para a sociedade e um enorme desafio para os governantes e os executores das decisões governamentais. Dentro dos resíduos, os efluentes urbanos e industriais encaminhados para estações de tratamento de águas residuais (ETAR) atingiram 627 Mm³ em 2015 em Portugal, sendo expectável uma produção anual de lamas superior a 300 kt base seca (RARSAP, 2016).

Nas ETAR as águas residuais são submetidas a diversos processos físicos, químicos e biológicos que vão originar lamas com uma carga orgânica que representa cerca de 50% da sua matéria seca (Tavares, 2007), mas com um teor de humidade que pode chegar aos 99% da massa total (Chen et al., 2002). Segundo Danish et al. (2016) na Europa são produzidas cerca de 90 g/hab.dia de lamas de ETAR.

De modo a possibilitar um armazenamento mais fácil, transporte com custos reduzidos e a possibilidade de valorização deste resíduo, é interessante reduzir o teor de humidade da lama através de um processo de secagem, diminuindo assim a sua massa e volume. Devido à temperatura elevada deste tipo de processos é possível um melhor controlo nos odores emitidos e na eliminação de microrganismos patogénicos presentes nas lamas.

Após o processo de secagem as lamas passam a ter um interesse acrescido em diversas áreas, como por exemplo na agricultura, onde podem ser utilizadas como corretor de solos, devido à existência de nutrientes como azoto (N) o fósforo (P) e potássio (K) (Luo et al., 2016). A valorização das lamas na agricultura é regulamentada por diversos diplomas legais que impedem que lamas contendo metais pesados e microrganismos patogénicos sejam depositados em solos. Em Portugal os valores máximos para a concentração destes poluentes podem ser consultados no Decreto-Lei nº 276/2009 de 2 de outubro. A proximidade de lençóis freáticos, topografia do terreno e as características dos solos, como

por exemplo a sua composição e o seu pH condicionam a valorização das lamas de ETAR na agricultura.

Outro possível destino para a valorização da lama é incineração com produção de energia térmica, para aquecimento ou para produção de energia elétrica por ciclo de Rankine. Para esta valorização o teor de humidade e a concentração de agentes patogénicos não será tão crítico. A principal vantagem da secagem para efeito de valorização energética é o aumento do poder calorífico associado à diminuição da quantidade de água presente na lama. Para a valorização energética por incineração a secagem da lama não é fundamental, pois o próprio sistema de queima pode ser projetado de modo a pré secar as lamas antes de atingirem a zona de combustão. As altas temperaturas da incineração permitem a eliminação dos organismos patogénicos e uma grande redução do volume inicial. A existência de metais pesados na lama acima dos valores estabelecidos por lei impossibilita este tipo de tratamento, por algumas partículas perigosas poderem ser emitidas pelos produtos da combustão (Barbosa, 2008). As cinzas resultantes da combustão podem ser utilizadas, por exemplo, no fabrico de cimento e de materiais de construção (Gonçalves, 2017).

As lamas também poderão ser depositadas em aterro, mas esta possibilidade só deve ser considerada quando todas as outras formas de valorização forem excluídas. Havendo concentrações elevadas de substâncias tóxicas ou de metais pesados esta será a alternativa mais viável.

O destino a dar às lamas em termos de valorização depende das necessidades das populações e das indústrias. Num país onde as temperaturas são muito baixas ao longo do ano, é mais interessante encaminhar as lamas para uma valorização energética, a fim de utilizar a energia produzida para efeitos de aquecimento. No caso de Portugal, a valorização agrícola é uma opção mais interessante, visto que os solos tem défices de alguns nutrientes como fósforo e azoto (Gonçalves, 2017). O processo de secagem surge assim como uma mais-valia fundamentalmente para a valorização das lamas como corretor de solos na agricultura.

O fenómeno de secagem térmica das lamas de ETAR é um processo complexo e com várias fases distintas. De modo a compreendê-lo e possibilitar uma otimização dos processos de secagem torna-se importante defini-lo por meio de um modelo matemático, normalmente com um carácter experimental. Em termos de modelos de secagem as lamas são

consideradas com um material poroso, pelo qual se escoar a água durante o processo de remoção.

Segundo Chen e Pei (1988) existem quatro fases distintas na secagem de materiais porosos. A primeira fase é caracterizada por uma taxa de secagem crescente e não se verifica para secagens a baixas temperaturas, pelo que não será considerada no modelo proposto. Após a adaptação do material ao meio de secagem, a taxa de secagem estabiliza devido ao surgimento de uma camada de água livre contínua na superfície material. Nesta fase verifica-se uma taxa de secagem constante. Com o avançar do processo vão surgir descontinuidades na camada de água superficial, referida anteriormente e o material passa a apresentar uma taxa de decaimento de humidade exponencial. Esta fase é dividida em duas subfases que se distinguem pela presença, ou não, de água livre na superfície do material. A existência destas três fases distintas, cada uma regulada por fenómenos físicos diferentes, é a principal dificuldade na modelação teórica do processo de secagem de lamas de ETAR.

A modelação de um fenómeno de secagem pode ser baseada em fenómenos físicos como a transferência de calor e massa ou por meio de uma aproximação empírica feita a partir de dados experimentais.

1.2. Objetivos

Neste estudo pretende-se desenvolver um modelo empírico de cinética de secagem, que permita prever o decaimento de humidade de lamas de ETAR em função da temperatura de secagem, em regime de convecção natural. O modelo será baseado em estudos experimentais de cinética de secagem de lamas de ETAR em estufa com circulação natural e visa diferenciar as três fases, atrás referidas, que caracterizam o processo de secagem de materiais porosos. Serão determinadas algumas das propriedades associadas à cinética de secagem, como a difusividade efetiva e o coeficiente de transferência de massa.

O modelo cinético de secagem deverá permitir prever o decaimento de humidade de lamas de ETAR, com propriedades física e químicas semelhantes às da amostra de lamas estudadas, em regime de convecção natural e disposta sob a forma de cilindros longos.

O modelo cinético deverá permitir prever o decaimento de humidade de lamas de ETAR, para uma gama de temperaturas de secagem compreendida 40 e 130 °C, com um erro inferior 1 °C.

2. ESTADO DA ARTE

A secagem de um material poroso, como são as lamas de ETAR é um processo complexo e com várias fases diferentes. No decorrer deste capítulo serão apresentadas os sistemas e tecnologias de secagem mais comuns, as características físico-químicas mais relevantes das lamas de ETAR e de possíveis adjuvantes que permitam aumentar a eficiência do processo de secagem e qualidade final das lamas, e por fim serão explicitadas as diferentes fases da secagem de materiais porosos e da evolução dos modelos teóricos de secagem

2.1. Constituintes das lamas de ETAR

Dependendo do tipo de efluentes encaminhados para a ETAR e dos tratamentos que as águas residuais são submetidas, as lamas podem apresentar variações na sua composição. Em ETAR urbanas, o principal constituinte da matéria seca das lamas é material orgânico (cerca de 50%), nomeadamente hidratos de carbono, aminoácidos, proteínas e lípidos, sendo também encontradas lenhina e celulose em pequenas quantidades (Tavares, 2007). Do carbono existente nas lamas, cerca de 60% está associado à matéria orgânica. Em termos de nutrientes, as lamas contêm fósforo (P), azoto (N) e potássio (K), que são de elevada importância quando se pretende a sua valorização na agricultura. Podem também existir contaminantes tóxicos como as dioxinas, os compostos bifenilos policlorados (PCB) e os hidrocarbonetos aromáticos polinucleares (PAH) (Gonçalves, 2017). Se, por infiltração nos solos, estes compostos entrarem na cadeia alimentar, deverão ser considerados um risco para a saúde pública. Assim, uma concentração elevada destes contaminantes impossibilita a valorização agrícola.

A deposição nos solos de lamas em que haja presença de microrganismos patogénicos é, obviamente, um problema, já que pode levar à poluição dos cursos de água com consequências graves para a saúde pública. Devido ao carácter biológico do tratamento a que as lamas são submetidas nas ETAR, a concentração de organismos como bactérias, vírus, fungos, protozoários e vermes pode aumentar (Metcalf e Eddy, 2003). O facto de os microrganismos patogénicos terem elevada capacidade de sobrevivência em diversas

condições torna a sua eliminação problemática (Carvalho, 2002). Este problema pode ser resolvido através da secagem a altas temperaturas.

Em ETAR industriais, a presença de metais pesados nas lamas também podem ser um problema para a sua valorização na agricultura ou por incineração. Os metais mais comuns são o cobre (Cu), o chumbo (Pb), o mercúrio (Hg), o níquel (Ni), o zinco (Zn), cádmio (Cd) e o crómio (Cr) (Gonçalves, 2017).

Sendo a lama um material poroso é de esperar que exista água armazenada nos poros e capilares das lamas. Esta é designada água livre por ser a mais fácil de extrair no processo de secagem. O mecanismo físico responsável pelo movimento da designada água livre para fora do material é o gradiente de pressão (Chen e Pei, 1988).

Nos capilares muito finos a extração da água será mais difícil devido à dificuldade da entrada de ar (Chen e Pei, 1988). A água nestes capilares muito finos é designada de água ligada, conceito que também é usado para definir a água quimicamente ligada no interior do material. O movimento desta água durante o processo de secagem só é considerado se, numa determinada zona do material, não existir água livre, pois a ordem de grandeza do fenómeno posterior é muito superior. Não existindo água livre este mecanismo de transferência de massa passa a ser considerado. Para ocorrer movimento de água ligada no interior do material é necessário que a energia fornecida pelo secador seja suficiente para romper as ligações entre as moléculas e a água.

2.2. Tecnologias de secagem

A desidratação das lamas por meios mecânicos realizados na ETAR reduz ligeiramente o teor de humidade para valores da ordem de 80 %. Para se baixar desse valor, as lamas terão de ser submetidas a um processo de secagem térmica.

Os sistemas para a secagem de lamas, podem ser agrupados em três grandes grupos. Os sistemas diretos, que se caracterizam por o fluido quente e a lama estarem em contacto, enquanto nos sistemas indiretos estes dois fluidos são separados por uma superfície intermédia. Existem ainda os sistemas combinados que, como o próprio nome indica, são a combinação dos dois anteriores.

Os sistemas de secagem direta correspondem aproximadamente a 85% dos secadores industriais (Ficza, 2010), sendo os mais comuns: o secador de tambor rotativo, secador por atomização, secador por leito fluidizado e secador por tapete. Estes sistemas de

secagem têm a vantagem de apresentarem uma eficiência elevada e de trabalharem a temperaturas baixas quando comparados aos sistemas de secagem indireta. Nos exemplos de sistemas de secagem indireta incluem-se os secadores de pás rotativas, secadores de disco rotativo e secadores de camada fina. A principal vantagem do sistema de secagem indireta está num melhor controlo das emissões de vapores com mau odor, resultando um menor impacto nas populações na vizinhança da unidade de secagem (Chen et al., 2002). Liz (2017) fez uma revisão dos vários tipos de secadores e concluiu que existem uma grande quantidade de fatores que, independentemente do tipo de tecnologia, podem influenciar a sua eficiência como o grau de agitação das lamas e o fluxo de ar quente de secagem.

2.3. Adjuvantes ao processo de secagem

De modo a melhorar o processo de secagem das lamas são por vezes misturados adjuvantes. A seleção dos adjuvantes a utilizar deve ser feita com base na sua disponibilidade, nas propriedades da lama que se pretende melhorar, procurando baixar a intensidade dos maus odores e procurando alcançar uma economia circular, em que sejam usados como adjuvantes os resíduos de outras indústrias. Alguns exemplos de adjuvantes que podem ser utilizados na secagem de lamas são: casca de ovo, pó de carvão, palha de arroz, dregs (resíduos da indústria do papel), casca de avelã e lama de ETAR seca.

Quando misturados na lama, os adjuvantes podem alterar as propriedades físicas e químicas das lamas, como por exemplo aumentar a sua porosidade, o que se traduz num mais transporte da água do interior do material para exterior superfície. Este efeito produz um aumento da difusividade da lama, com conseqüente alteração da cinética de secagem, manifestada por um menor tempo de secagem. A presença de um adjuvante pode permitir também reduzir a quantidade de energia necessária para romper as ligações entre a água ligada e a matéria orgânica presente na lama.

O adjuvante pode permitir contrariar a formação de uma camada compacta na superfície da lama, associada à contração de volume da lama decorrente da secagem à superfície. Esta camada representa um problema para a secagem da água do interior da lama. Gomes (2017) fez uma revisão da literatura sobre os efeitos de alguns adjuvantes (ex. CaO, NaClO, NaHCO₃) na secagem de lamas, tendo verificado haver ligeiras melhorias, manifestadas pela aceleração do processo de secagem e redução do consumo de energia para o processo de secagem.

2.4. Fases de secagem

Existem dois tipos de transporte que podem ocorrer durante a secagem de lammas: transferência de calor por convecção do ambiente externo à superfície da lama combinada com a transmissão de calor do interior do material por condução; e a transferência de massa do interior para a superfície do material a secar seguida por transporte da humidade para o ambiente externo (Brennan, 2006).

No início do processo de secagem a baixas temperaturas, as lammas têm uma quantidade muito elevada de humidade na forma de água livre. Será então expectável que, do movimento dessa água livre do seu interior para o exterior, se forme uma camada de água continua na superfície do material. Verifica-se então uma evaporação de água maioritariamente na superfície. Esta fase é caracterizada por uma taxa de secagem constante e termina quando a camada de água livre na superfície deixa de ser contínua, ou seja, quando for atingida a humidade crítica. Esta grandeza depende apenas das características do ar de secagem e das lammas.

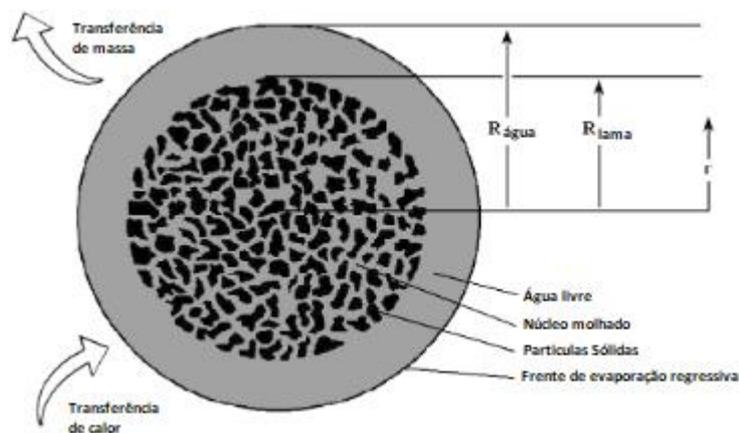


Figura 2-1 - Distribuição da água livre em taxa de secagem constante, adaptado de Dalmaz et al., 2007

Atingida a humidade crítica, inicia-se então a primeira fase de decaimento da taxa de secagem. Esta é caracterizada por um decréscimo da transferência de massa associada à diminuição da quantidade de água livre na superfície. Com esta mudança de regime o decaimento da humidade da lama com o tempo apresenta uma tendência exponencial decrescente.

A fase final numa secagem deste tipo é denominada de segunda fase de decaimento. Esta é definida pela inexistência de água livre na superfície do material e, por consequência, pelo aparecimento de uma frente de evaporação regressiva. Esta divide o material em duas regiões distintas. Na região exterior à frente de evaporação não existe água

livre e os mecanismos de transferência prevalentes são o movimento de vapor e de água ligada. Na região interior à frente de evaporação ainda existe água livre. Esta região interior vai diminuir com o passar do tempo devido à deslocação da frente de evaporação no sentido do interior do material. Ao contrário do primeiro período de decaimento, cuja velocidade é linear, esta fase de decaimento da humidade é caracterizada por uma função exponencial, mas com um decaimento não linear da velocidade, ao contrário do primeiro período de decaimento.

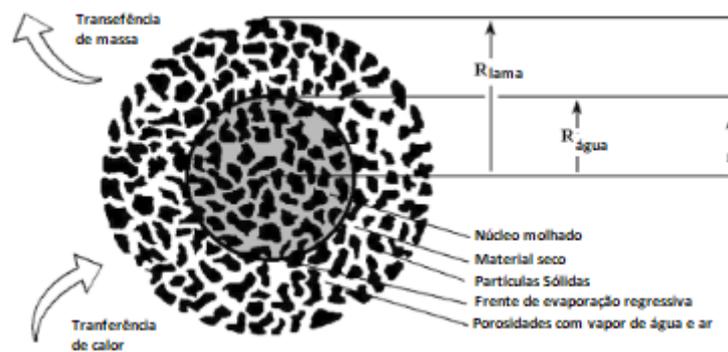


Figura 2-2 - Distribuição da água livre para o decaimento da taxa de secagem, adaptado de Dalmaz et al., 2007

Nestes últimos dois períodos do processo de secagem, as camadas superficiais tendem a secar mais rapidamente do que o interior, sendo comum o desenvolvimento de uma “carapaça” de material seco impermeável ao fluxo de água ou vapor de água. Este fenómeno é indesejável e pode ser controlado através das condições do ar de secagem (MacCabe et al., 1993).

Pode existir também uma fase inicial que ocorre imediatamente após o contacto da lama com o ar de secagem. Esta fase só ocorre se a temperatura do material é muito inferior à do ar de secagem. Esta fase, denominada de período de adaptação ou de pré-aquecimento, é caracterizada por uma transferência de calor sensível do ar para o produto e por uma taxa de secagem crescente, terminando com o equilíbrio da temperatura dos dois meios.

2.5. Evolução dos modelos teóricos de secagem de materiais porosos

A modelação matemática do processo de secagem tem evoluído substancialmente ao longo dos tempos. No modelo clássico da difusão líquida proposto por Sherwood (1929), a lei de Fick é considerada válida, e considera que o principal mecanismo de transferência de massa é o gradiente do conteúdo de líquido no material. No entanto, foi verificado por Ceaglske e Hougen (1937) que a correlação entre as curvas teóricas e experimentais não era satisfatória. Tendo como base exclusivamente a difusão de vapor, King (1971) propôs um modelo com o intuito de descrever a secagem de alimentos. Baseado na teoria de evaporação-condensação, Harmathy (1969) propôs um modelo que considera simultaneamente a transferências de calor e de massa. Na secagem de um material poroso, a humidade é transportada maioritariamente através dos capilares. Considerando que a água pode ser transportada através de fluxo capilar e da difusão de vapor, foi proposto por Krischer e Kast (1978) um modelo com base nestes dois mecanismos em simultâneo.

Uma abordagem diferente foi proposta por Luikov (1975), considerando um modelo com duas zonas, tendo o objetivo de descrever simultaneamente a transferência de calor e de massa. Em modelos anteriores os diferentes mecanismos de transporte de humidade não eram evidenciados por ser apenas considerada uma zona, sendo impossível avaliar quais os mais influentes nos diferentes estágios da secagem. Baseando-se na teoria da difusão, Szentgyorgyi e Molnar (1978) propuseram também um modelo com duas zonas distintas, assumindo uma distribuição de humidade uniforme no material. Este modelo obteve boas correlações com os resultados experimentais.

Na maioria dos modelos mencionados anteriormente não é possível prever as taxas de secagem, a distribuição de temperatura e o conteúdo de humidade para materiais higroscópicos e não higroscópicos em simultâneo, ou seja, cada tipo de material necessita de um modelo diferente. Isto acontece devido há presença de múltiplos mecanismos de transferência de humidade, cada um favorecido por determinadas condições de temperatura, de higroscopia e do próprio conteúdo de humidade. O modelo proposto por Van Brakel e Heertjes (1978) tem em conta este fenómeno e toma as seguintes considerações: para uma superfície com uma camada de água contínua, as transferências de calor e massa são iguais; quando a superfície passa a estar parcialmente coberta de água a transferência de massa diminui com a humidade superficial.

Em 1988 foi proposto por Chen e Pei um modelo com o objetivo de evidenciar cada uma das fases de secagem individualmente, bem como os mecanismos de transporte de humidade mais relevantes em cada fase da secagem. Os mecanismos evidenciados neste modelo são o fluxo capilar da água livre, o movimento da água ligada e o fluxo de vapor no material.

Nas últimas décadas, com o avanço da capacidade de processamento dos computadores, os modelos de secagem têm tido um caráter cada vez mais empírico. O objetivo deste tipo de abordagem passa pela aproximação de uma ou várias equações a resultados experimentais.

2.6. Modelação da secagem com base empírica

A abordagem que considera apenas uma curva para o domínio inteiro do tempo de secagem, apesar de válida, não é a mais realista devido às diferentes fases de secagem que ocorrem em materiais porosos, conforme foi atrás referido.

A metodologia que é normalmente utilizada para obter os perfis de secagem passa pela medição contínua da massa ao longo do período de secagem. A partir destes resultados é possível obter um perfil do decaimento de humidade em função do tempo de secagem.

Ao longo dos anos foram propostos uma grande variedade de curvas que descrevem este tipo de perfis.

Tabela 2-1 - Modelos de cinética de secagem empíricos

Modelo	Expressão Analítica	Referência
Lewis	$MR = \exp(-kt)$	Bruce (1985)
Page	$MR = \exp(-kt^{\gamma})$	Page (1949)
Page modificado	$MR = \exp(-kt)^{\gamma}$	White et al. (1981)
Henderson e Pabis	$MR = a * \exp(-kt)$	Henderson and Pabis (1961)
Wang e Singh	$MR = 1 + at + bt^2$	Wang and Singh (1978)
Logaritmico	$MR = a * \exp(-kt) + c$	Togrul and Pehlivan (2002)
Midilli	$MR = a * \exp(-kt^n) + bt$	Midilli and Kucuk (2002)

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Metodologia experimental

Amostras de lamas provenientes da ETAR do Choupal (Coimbra), foram sujeitas a diferentes temperaturas de secagem por convecção natural em estufa. As temperaturas de secagem foram de 40, 70, 100 e 130 °C.

De modo a uniformizar o processo de secagem para permitir a comparação de resultados foi utilizada a seguinte metodologia. Primeiramente a lama foi misturada de modo a uniformizar a humidade da amostra. De seguida, recorrendo a uma seringa em plástico, foram fabricados cilindros de lama com 30 mm de comprimento por 5 mm de diâmetro. Os cilindros foram então colocados num vidro relógio, cuja massa havia sido previamente pesada em balança digital semi-analítica com precisão de 0,01 g, e em grupos de 5 cilindros foram submetidos ao processo de secagem (**Figura 3-1**). Durante o processo de secagem é medida a massa total do conjunto lama/vidro em diferentes instantes por meio da balança semi-analítica. De modo a minimizar deficiências do processo experimental, como a homogeneização das amostras e das condições de temperatura e humidade no laboratório, procedeu-se à secagem de 16 conjuntos para cada temperatura.



a)



b)

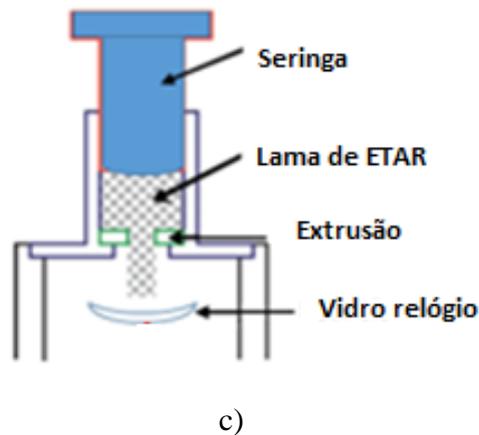


Figura 3-1 - Geometria da lama antes da secagem a) materiais utilizados na construção dos cilindros b) conjunto cilindros/vidro-relógio c) Representação esquemática do fabrico das amostras

Para facilitar as comparações os resultados do decaimento da massa em função do tempo, os valores do decaimento de massa foram manipulados de modo a representarem um valor de humidade adimensionalizada. Este foi calculado da seguinte forma (Danish et al., 2016).

$$MR = \frac{(M_t - M_e)}{(M_0 - M_e)} \quad (3-1)$$

$$M_0 = \frac{(m_i - m_f)}{m_f} \quad (3-2)$$

$$M_t = \frac{(m_t - m_f)}{m_f} \quad (3-3)$$

$$M_e = \frac{(m_e - m_f)}{m_f} \quad (3-4)$$

Onde:

M_0 – Conteúdo de humidade inicial [g água/g lama/seca]

M_e – Conteúdo de humidade no equilíbrio [g água/g lama/seca]

M_t – Conteúdo de humidade em qualquer instante [g água/g lama/seca]

m_e – Massa no equilíbrio [g]

m_f – Massa final [g]

m_i - Massa inicial [g]

m_t – Massa a qualquer instante [g]

MR – Humidade adimensionalizada

Como o sistema atinge o equilíbrio no final da secagem, os valores de m_f e de m_e vão ser muito próximos, sendo possível a simplificação $M_e = 0$. Todos estes valores referentes às quatro temperaturas podem ser consultados em apêndice.

3.2. Perfil de secagem

Para prever o comportamento da cinética de secagem da lama é proposto um modelo que contempla as três fases de secagem, descritas em função dos intervalos de tempo, pelas equações seguintes:

$$MR = \begin{cases} -a * t + 1, & t < t_1 \\ b * \exp(-c * t), & t_1 < t < t_2 \\ d * \exp(-e * t), & t > t_2 \end{cases} \quad (3-5)$$

Onde:

a, ..., e – Coeficientes do modelo

t_1 , t_2 – Instantes de mudança de fase [min]

De modo a obter os coeficientes das equações que caracterizam as diversas fases de secagem, a curva experimental foi dividida em três partes: uma primeira uma equação linear, correspondente à taxa de secagem constante e em duas seguintes, equações exponenciais, que traduzem a primeira e segunda fase de decaimento da taxa de secagem. A cada fase fez-se aproximar uma linha de tendência sendo sucessivamente testados vários instantes de mudança de fase, de modo a maximizar o coeficiente de correlação (r). Os coeficientes das equações são então retirados a partir das equações que descrevem a tendência dos resultados experimentais. Após a determinação desses coeficientes para as várias temperaturas ensaiadas será possível avaliar a variação dos mesmos em função da temperatura. O mesmo raciocínio pode ser aplicado aos instantes de mudança de fase de secagem, sendo estes determinados em função do melhor coeficiente de correlação para as duas fases vizinhas.

Obtidas as relações dos diferentes coeficientes em função da temperatura de secagem será possível fazer uma previsão do perfil de secagem da lama nas condições de

temperatura pretendida. Foram feitas previsões para as temperaturas de 115 °C e para 150 °C de modo a avaliar a capacidade de resposta do modelo para interpolações e extrapolações.

Posteriormente, procedeu-se a ensaios experimentais de secagem de amostras nas condições atrás referidas para as duas temperaturas referidas acima com o objetivo de avaliar a proximidade com os resultados obtidos pelo modelo empírico. Utilizaram-se as seguintes equações para esta comparação:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - \overline{MR}_{exp})(MR_{prev,i} - \overline{MR}_{prev})}{\sqrt{[\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - \overline{MR}_{exp})^2][\sum_{i=1}^N (MR_{prev,i} - \overline{MR}_{prev})^2]}} \quad (3-6)$$

$$Erro\ médio\ absoluto = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |MR_{exp,i} - MR_{prev,i}| \quad (3-7)$$

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{prev,i})^2 \right] \quad (3-8)$$

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^N \frac{(MR_{exp,i} - MR_{prev,i})^2}{MR_{prev,i}} \quad (3-9)$$

Onde:

\overline{MR} – Valor médio da humidade

MR_{exp} – Valor da humidade experimental

MR_{prev} – Valor da humidade previsto

N – Número de amostras

R – Coeficiente de correlação

RMSE – Erro médio quadrático

χ^2 – Chi-quadrado

3.3. Determinação das propriedades das lamas

Com a obtenção de uma curva de cinética de secagem experimental torna-se possível determinar os valores de algumas propriedades da lama. Esses resultados permitem estabelecer comparações com os obtidos por outros investigadores.

De modo a determinar os coeficientes de transferência de massa e a difusividade efetiva da lama com a variação da temperatura foi adotada a seguinte metodologia.

A partir dos resultados experimentais é traçada uma linha de tendência expressa pela seguinte equação (Tripathy, 2009):

$$MR = k_0 * \exp(-kt) \quad (3-10)$$

Onde:

k e k_0 – Coeficientes para a determinação de propriedades

Utilizando o valor k_0 proveniente da equação anterior é possível determinar o número de Biot referente à transferência de massa, para uma geometria cilíndrica, recorrendo à seguinte relação (Pflug e Blaisdell, 1963):

$$Bi_m = \frac{3,356 * \ln(k_0)}{1 - 1,974 * \ln(k_0)} \quad (3-11)$$

Onde:

Bi_m – Número de Biot associado à transferência de massa

De modo a calcular a difusividade efetiva da lama será também preciso determinar o fator μ_1^2 . Este pode ser calculado através da expressão abaixo (Luikov, 1968), em que as constantes $(\mu_1)^2_\infty$, A_1 e p tomam os valores 2,4048, 2,45 e 1,04 respetivamente, para uma geometria cilíndrica (Tripathy, 2009).

$$\mu_1^2 = (\mu_1)^2_\infty * \frac{1}{1 + \frac{A_1}{Bi_m^p}} \quad (3-12)$$

Com estes valores será então possível determinar a difusividade efetiva (D_{eff}) e o coeficiente de transferência de massa (h_m), para a temperatura em questão, a partir das relações:

$$D_{eff} = k \frac{r^2}{\mu_1^2} \quad (3-13)$$

$$h_m = Bi_m \frac{D_{eff}}{r} \quad (3-14)$$

Onde:

D_{eff} – Difusividade efetiva [m²/s]

h_m – Coeficiente de transferência de massa [m/s]

r – Raio da amostra [m]

Tendo os valores de D_{eff} e de h_m para as diferentes temperaturas experimentais será possível avaliar, por um processo análogo ao da secção anterior, a sua variação em função da temperatura. Note-se que, para efeitos de simplificação, estas grandezas foram consideradas constantes ao longo da secagem.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

De acordo com a metodologia descrita na secção anterior foram realizados ensaios laboratoriais de secagem de lamas de ETAR para diferentes temperaturas. Verifica-se que, conforme o esperado, o aumento da temperatura do ar de secagem traduz-se numa diminuição do tempo de secagem, ou seja, num maior fluxo de água a sair do material num dado intervalo de tempo (Figura 4-1).

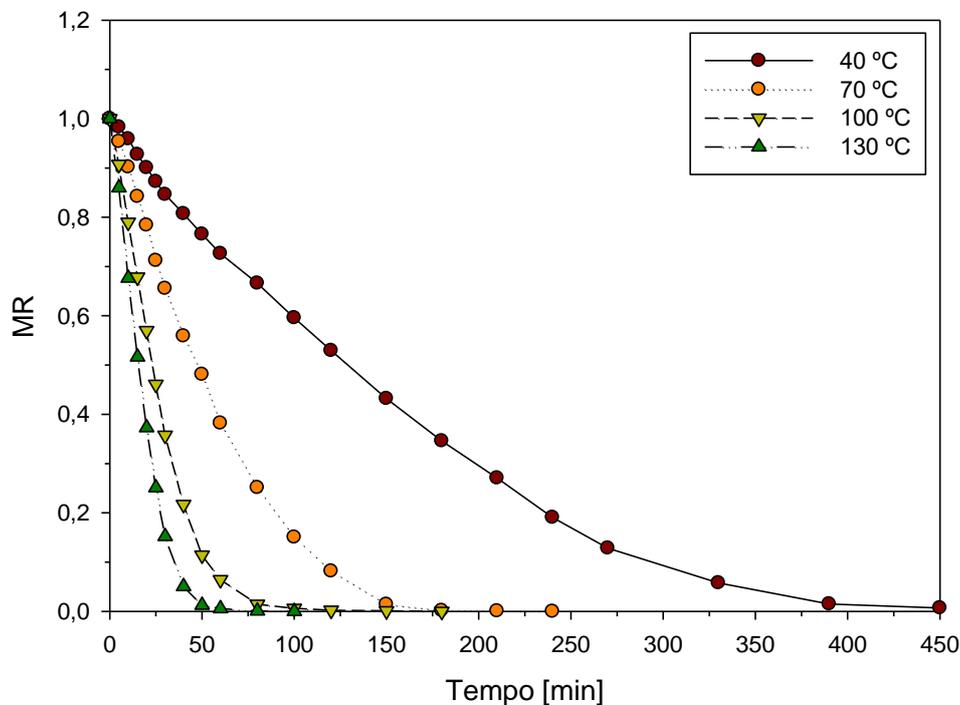


Figura 4-1 - Decaimento de umidade da lama para as diferentes temperaturas

4.1. Perfil de secagem

Utilizaram-se 16 amostras de lamas da mesma ETAR (Choupal) para cada temperatura de secagem (40, 70, 100 e 130 °C) tendo cada uma delas um decaimento de massa ligeiramente diferente. Os gráficos que se seguem mostram, para cada temperatura de secagem, o decaimento de umidade com o tempo, através do parâmetro adimensional MR, considerando os desvios padrão.

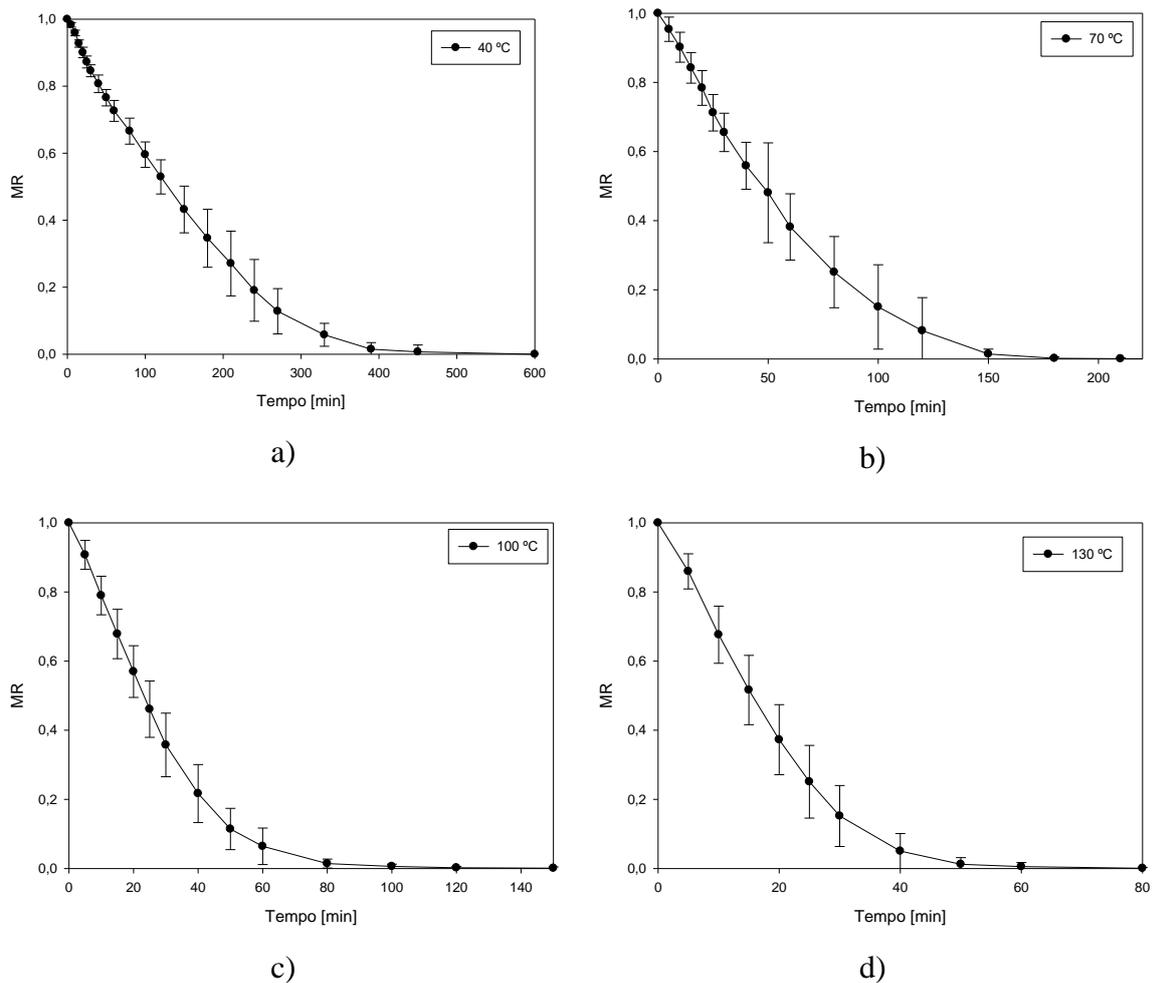
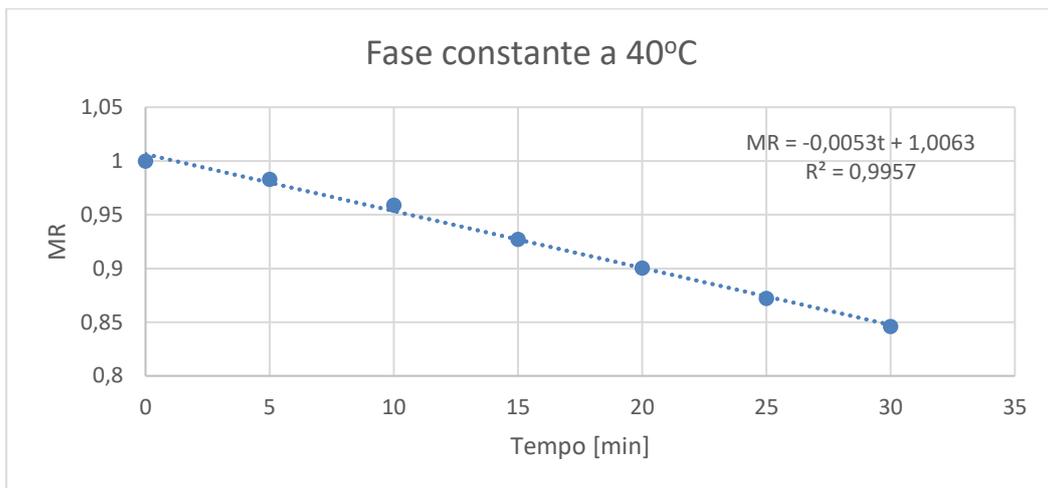


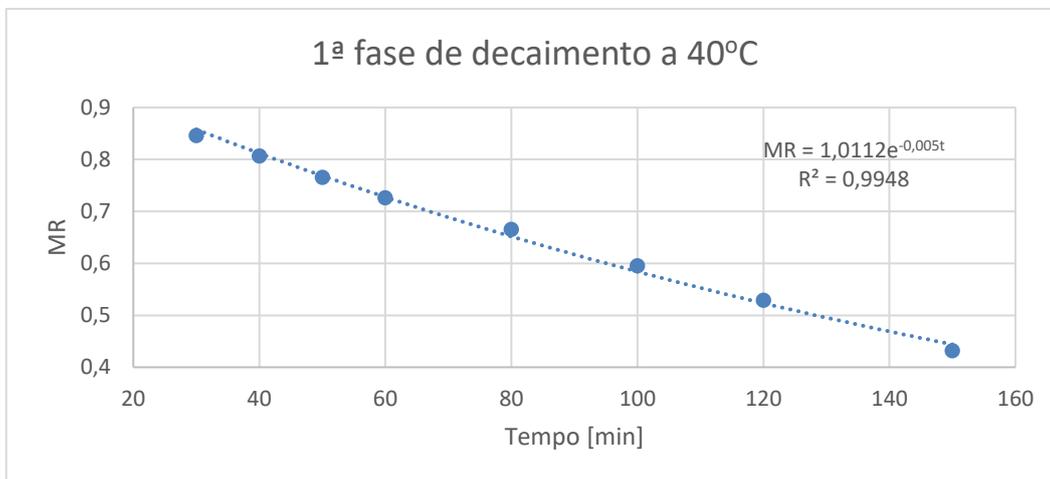
Figura 4-2 - Variação da humidade das amostras no decaimento de humidade para a) 40 °C, b) 70 °C, c) 100 °C, d) 130 °C

4.1.1. Caracterização das fases de secagem

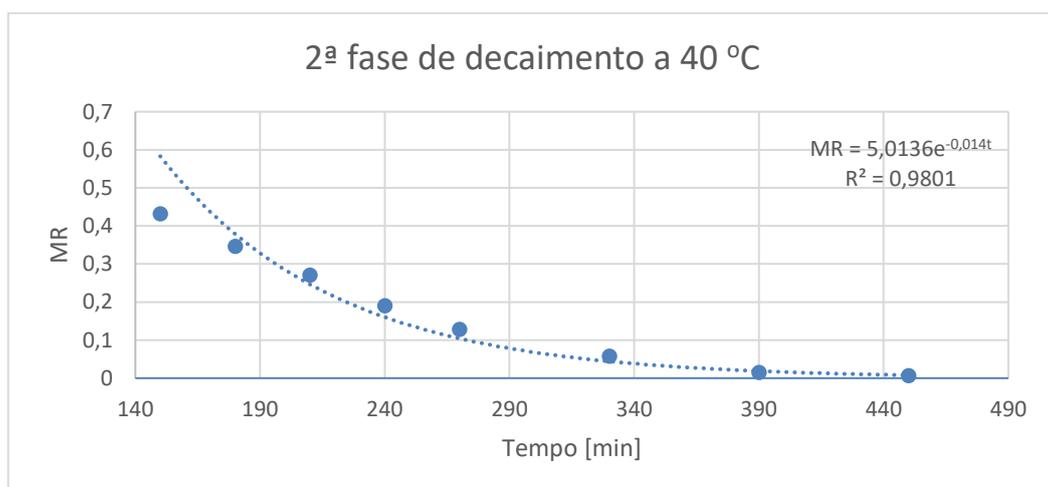
A partir dos resultados de decaimento de humidade apresentados anteriormente e recorrendo ao *software Microsoft Excel*[®], determinaram-se os instantes de tempo da mudança de fase do processo de secagem e os coeficientes das equações relevantes à construção do modelo, para cada temperatura (Figura 4-2 a Figura 4-6). A evolução dos instantes de tempo de mudança de fase com a temperatura foi como o esperado, ou seja, estes valores diminuem com o aumento da temperatura.



a)

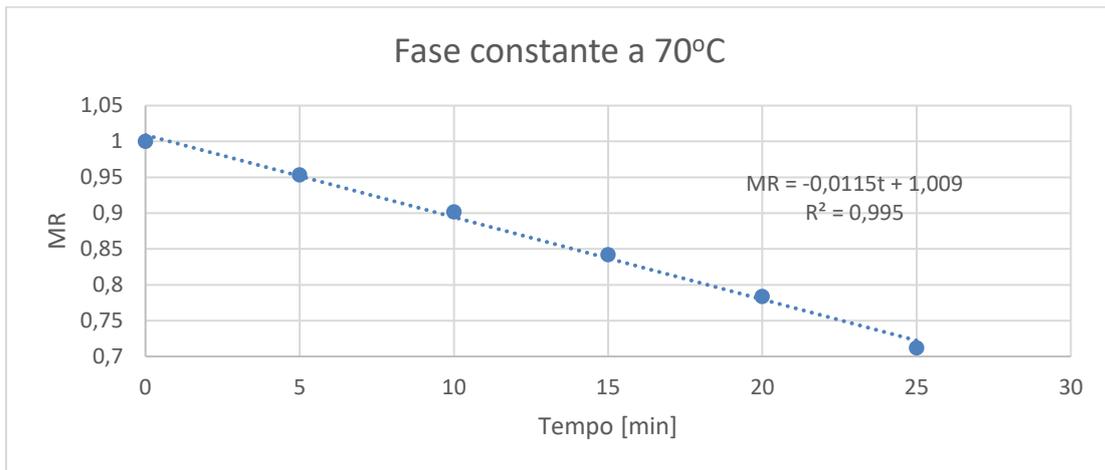


b)

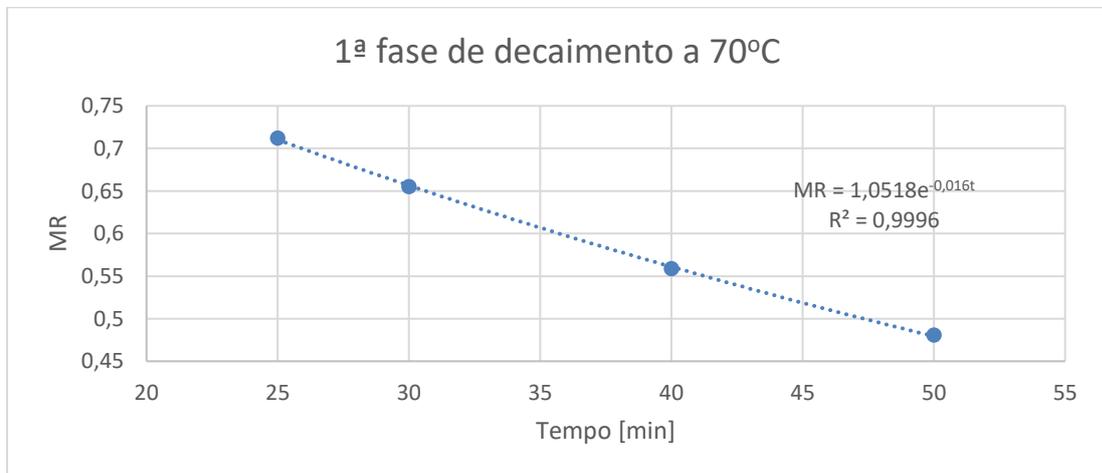


c)

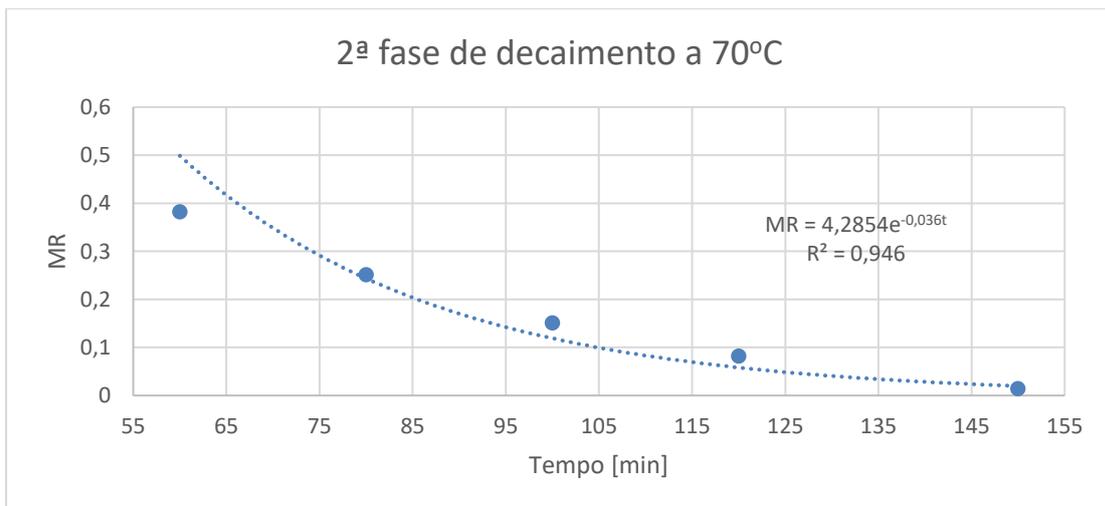
Figura 4-3 - Fases de secagem a 40 °C, a) Fase de secagem constante, b) 1ª fase de decaimento, c) 2ª fase de decaimento



a)

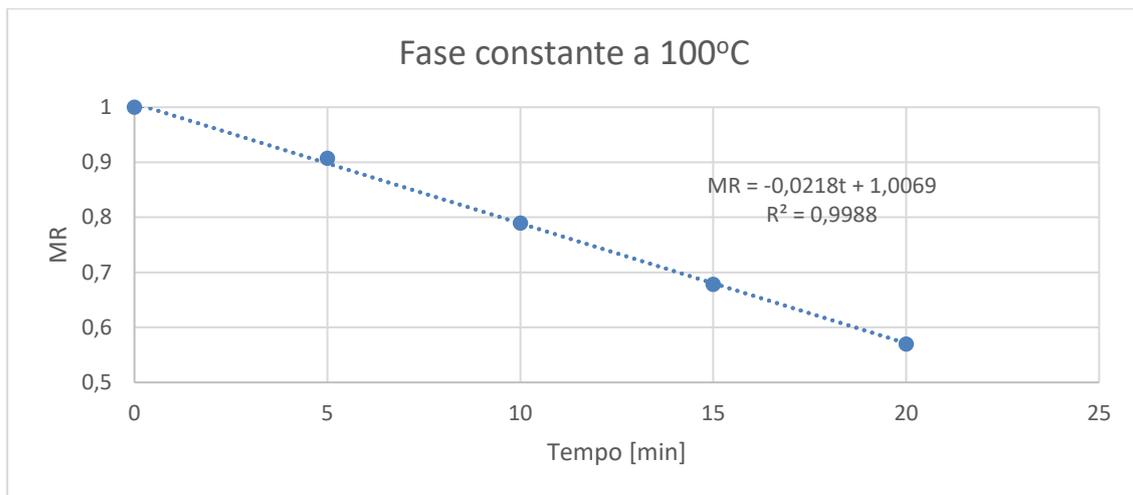


b)

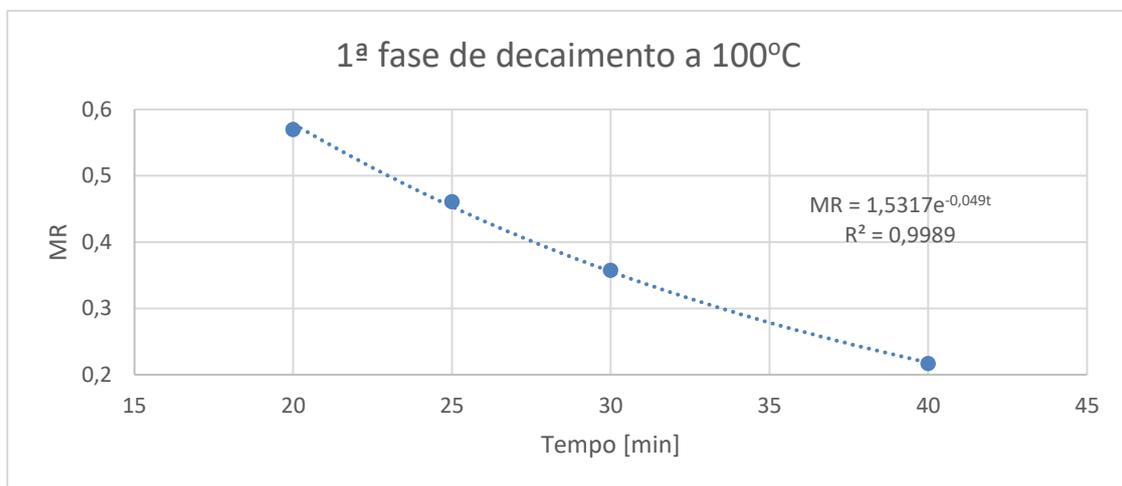


c)

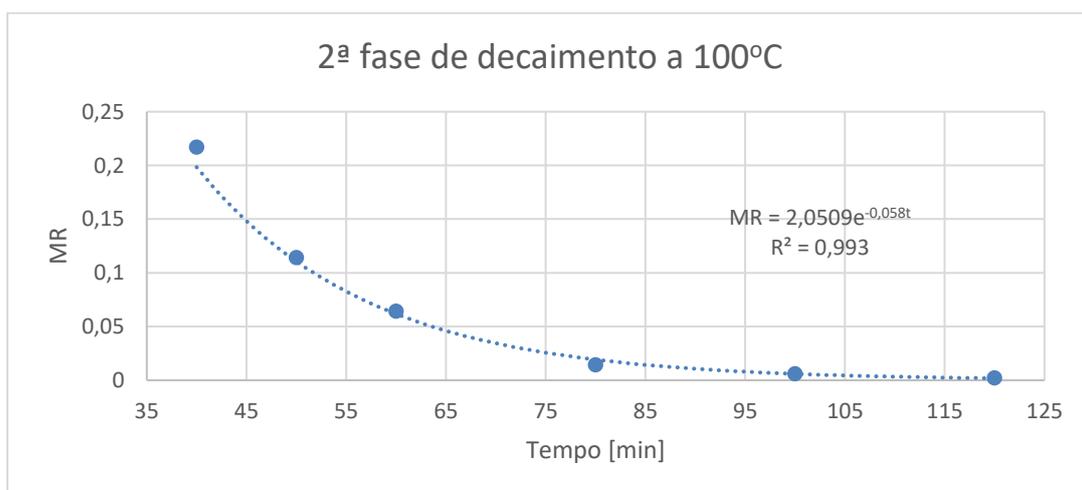
Figura 4-4 - Fases de secagem a 70 °C, a) Fase de secagem constante, b) 1ª fase de decaimento, c) 2ª fase de decaimento



a)

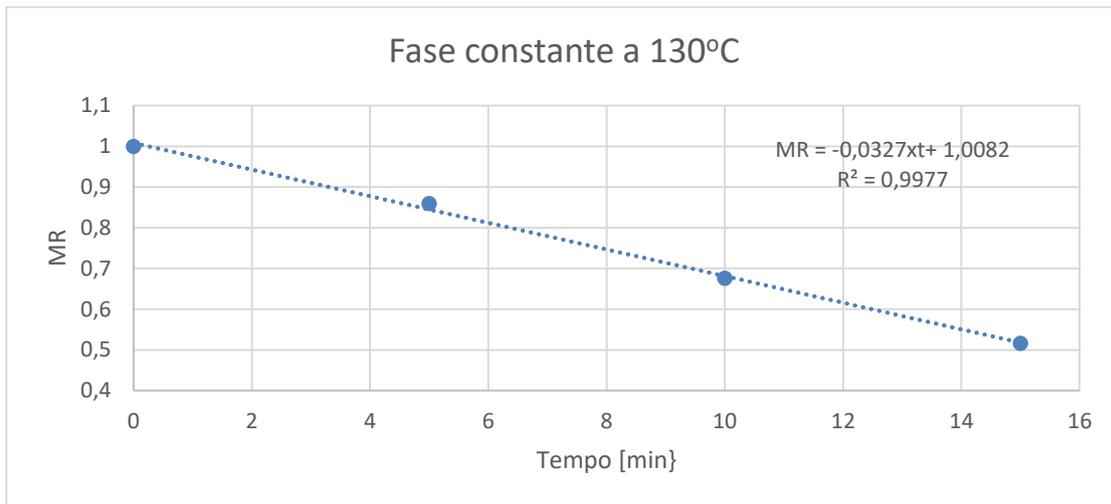


b)

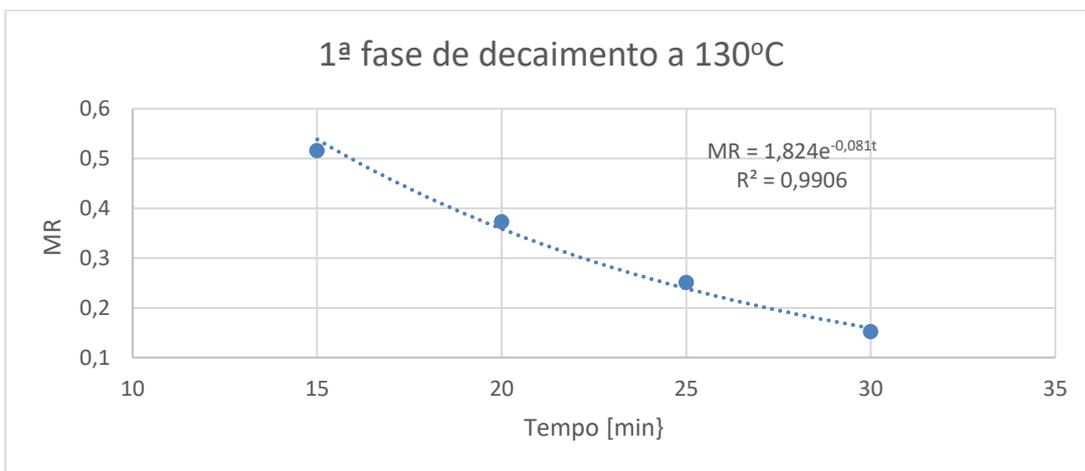


c)

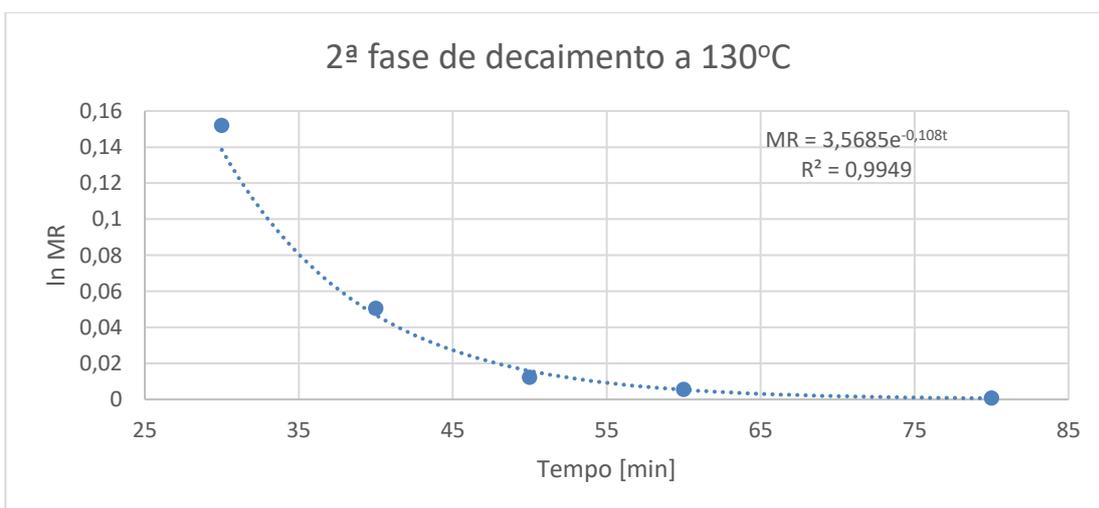
Figura 4-5 - Fases de secagem a 100 °C, a) Fase de secagem constante, b) 1ª fase de decaimento, c) 2ª fase de decaimento



a)



b)



c)

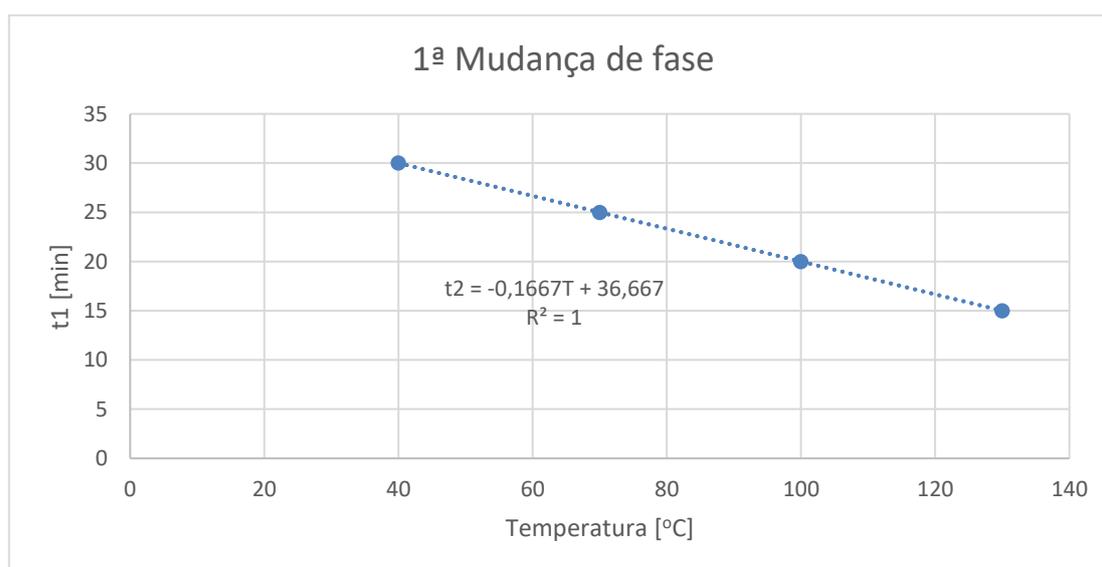
Figura 4-6 - Fases de secagem a 130 °C, a) Fase de secagem constante, b) 1ª fase de decaimento, c) 2ª fase de decaimento

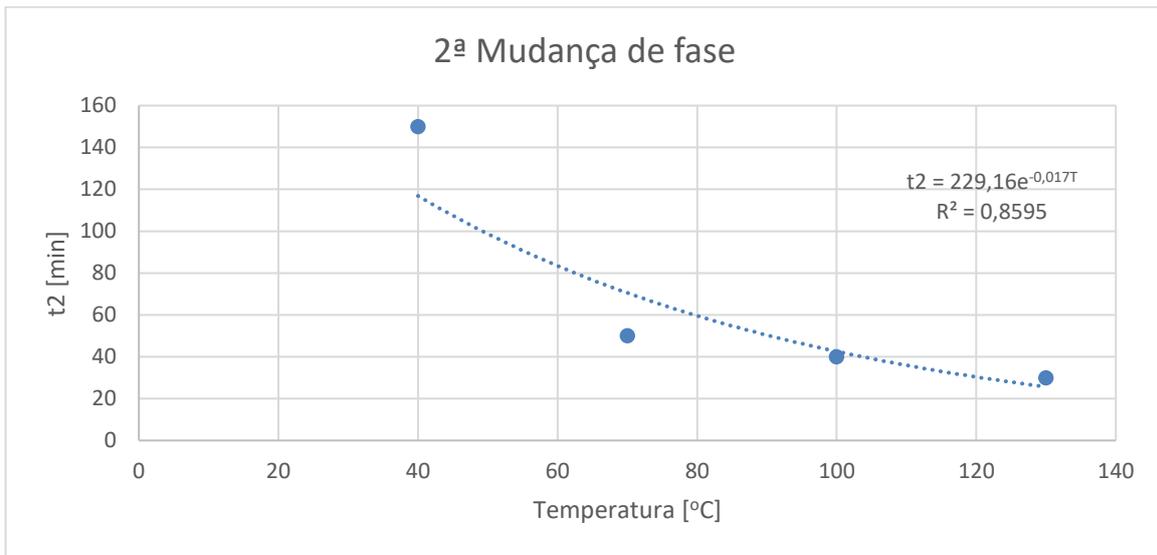
4.1.2. Parâmetros da secagem

Os resultados experimentais com as fases de secagem, bem definidas, permitiram obter, para cada temperatura, os coeficientes das equações para a utilização do modelo proposto (Tabela 2-1). Avaliando a variação destes coeficientes em função da temperatura é possível fazer uma previsão do perfil de secagem para uma temperatura arbitrária (Figura 4-8).

Tabela 4-1 - Coeficientes do modelo a diferentes temperaturas

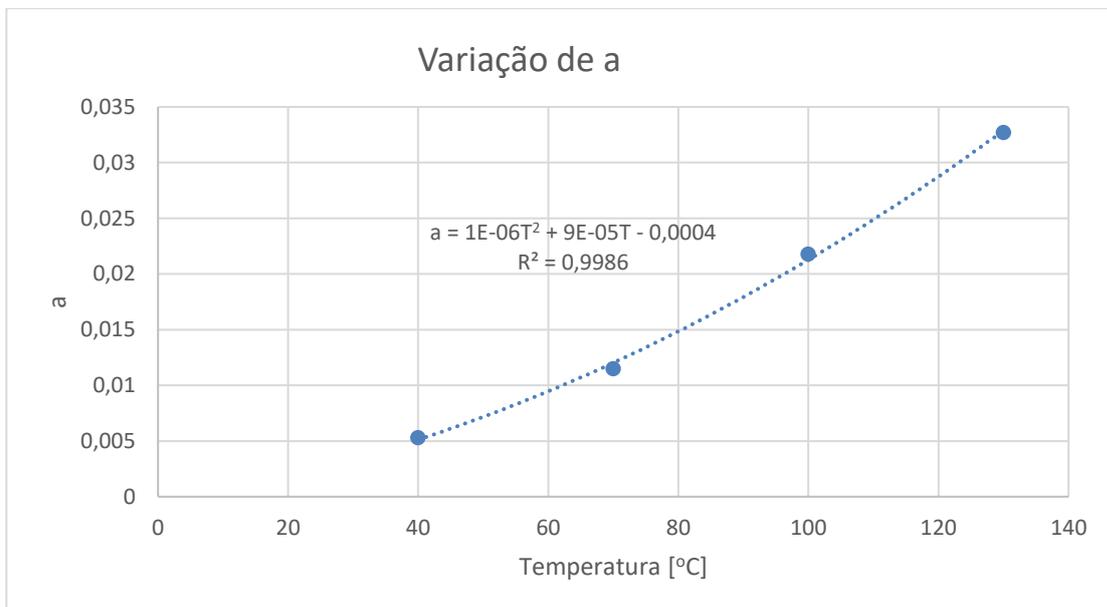
Parâmetros	Temperatura (°C)			
	40	70	100	130
t1 [min]	30	25	20	15
t2 [min]	150	60	40	30
a	0,0053	0,0115	0,0218	0,0327
b	1,0112	1,0518	1,5317	1,824
c	0,005	0,016	0,049	0,081
d	5,014	4,2854	2,051	3,5685
e	0,014	0,036	0,058	0,108



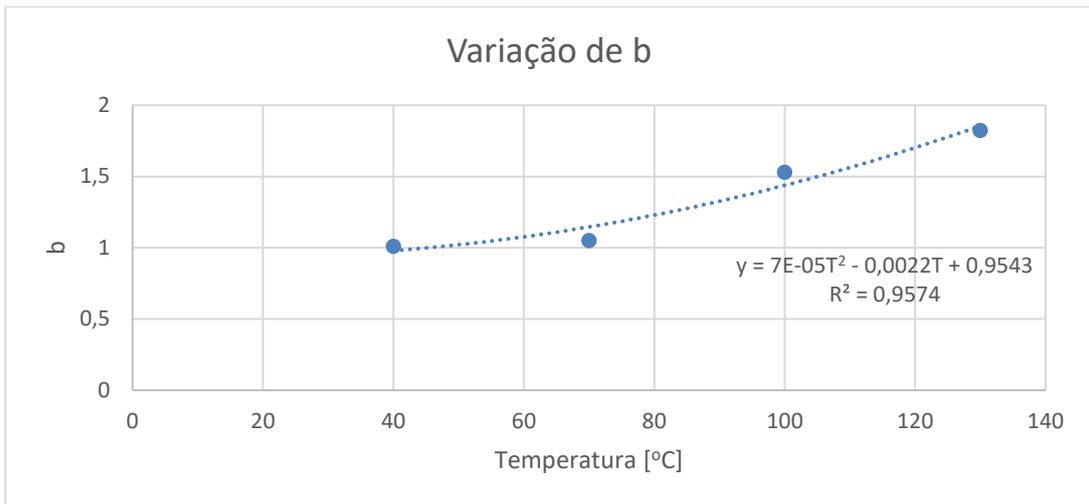


b)

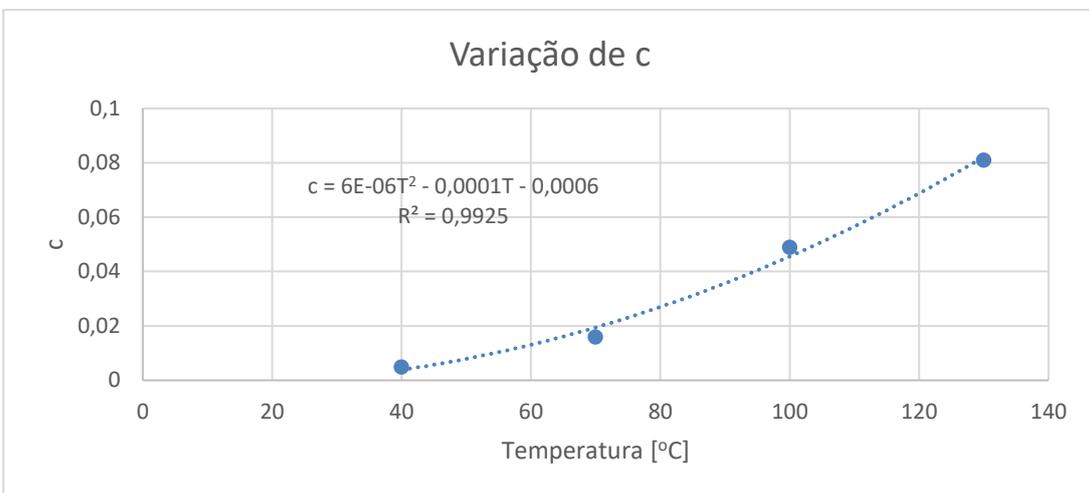
Figura 4-7 - Variação dos instantes de mudança de fase com a temperatura a) 1ª mudança de fase, b) 2ª mudança de fase



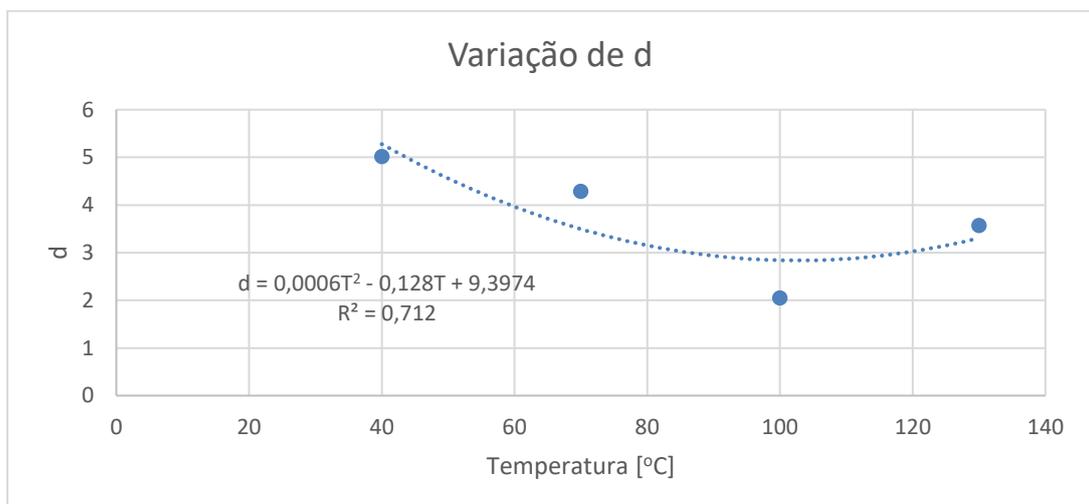
a)



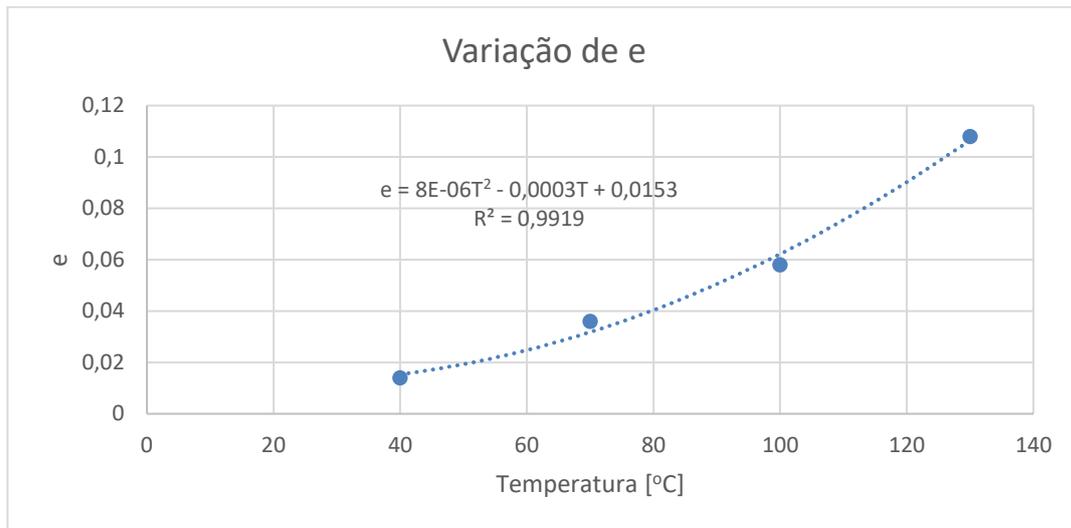
b)



c)



d)

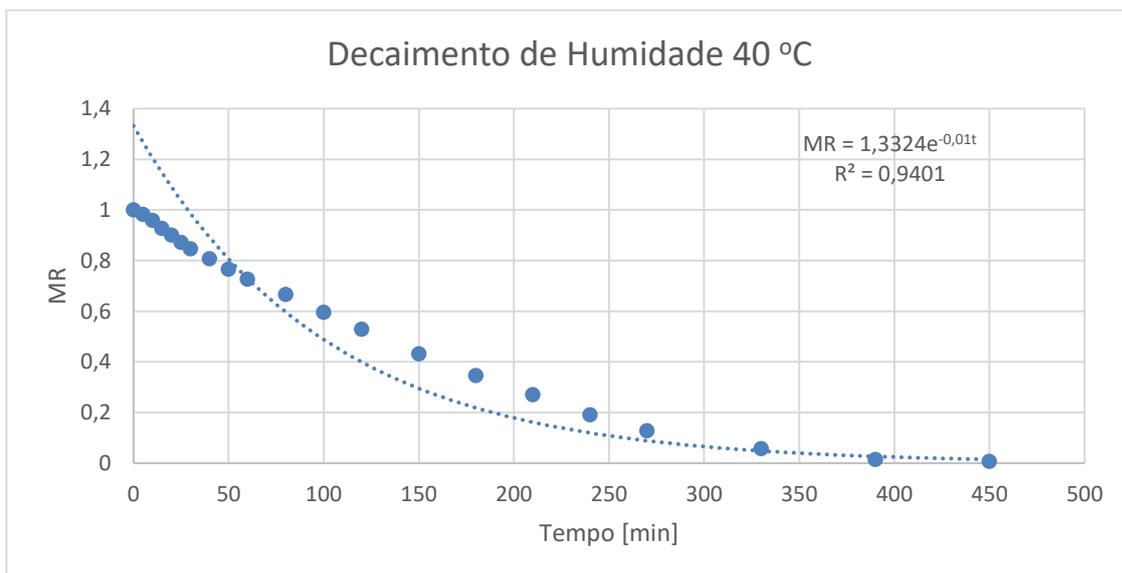


e)

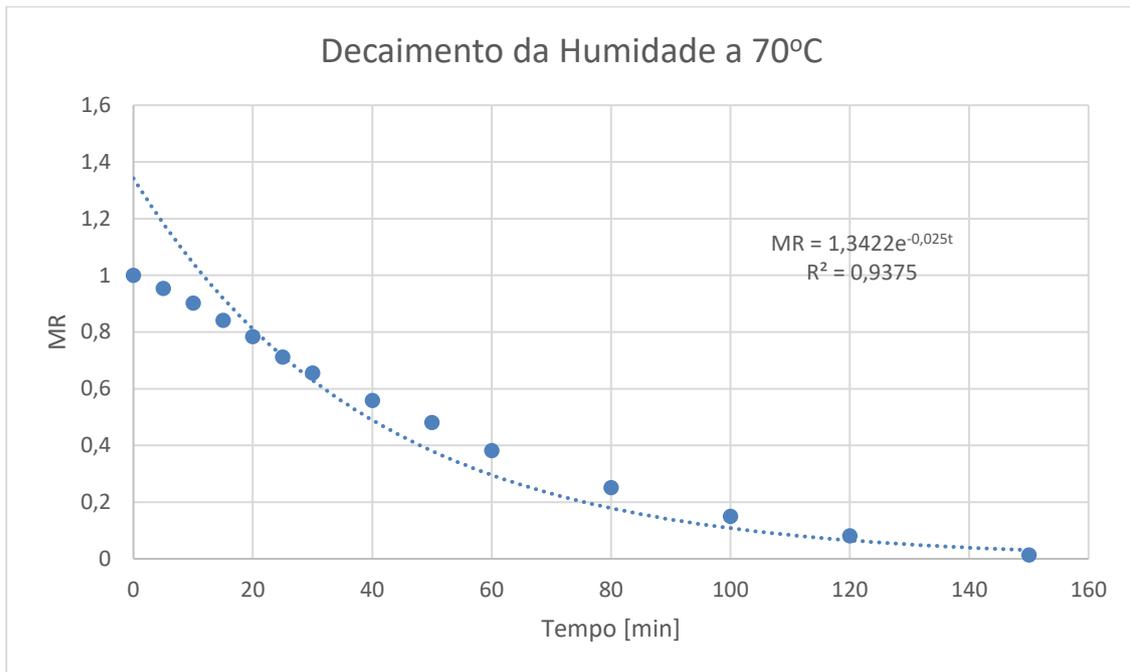
Figura 4-8 - Comportamento dos coeficientes do modelo em função da temperatura, a) coeficiente a, b) coeficiente b, c) coeficiente c, d) coeficiente d, e) coeficiente e.

4.2. Determinação das propriedades de secagem das lamas

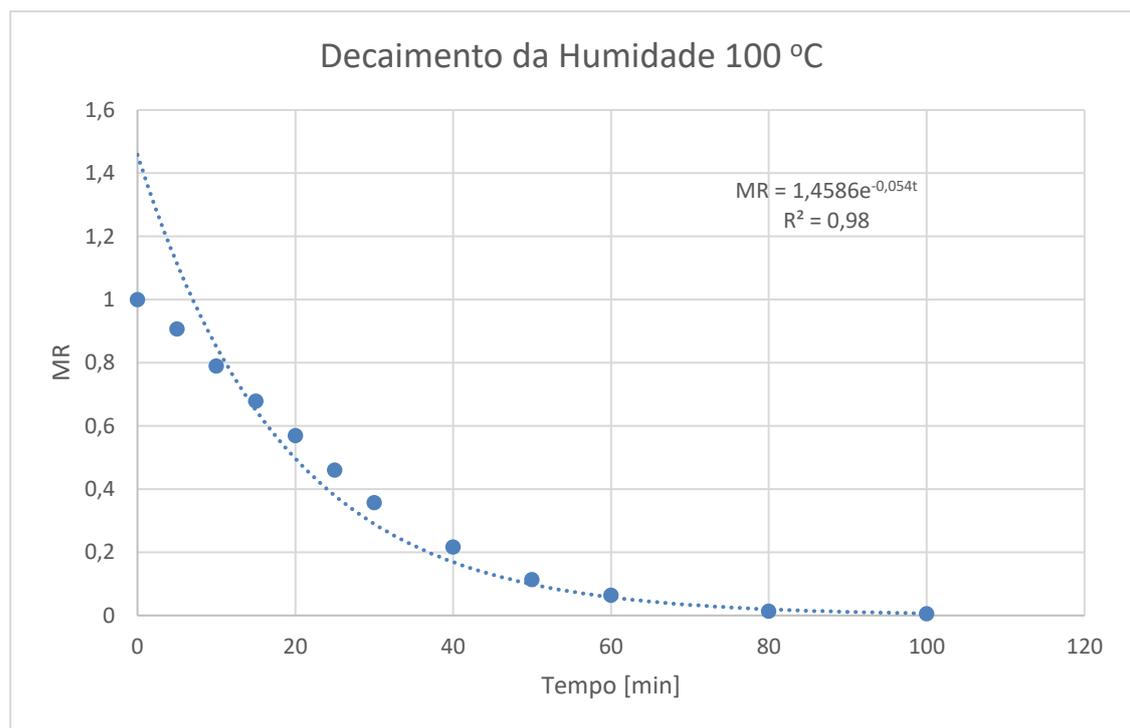
Recorrendo aos gráficos do decaimento de humidade foram determinados o coeficiente de transferência de massa e a difusividade efetiva da lama (Figura 4-9). Estes valores apresentaram uma evolução de acordo com o esperado, ou seja, ambos aumentaram com a subida de temperatura (Tabela 4-2).



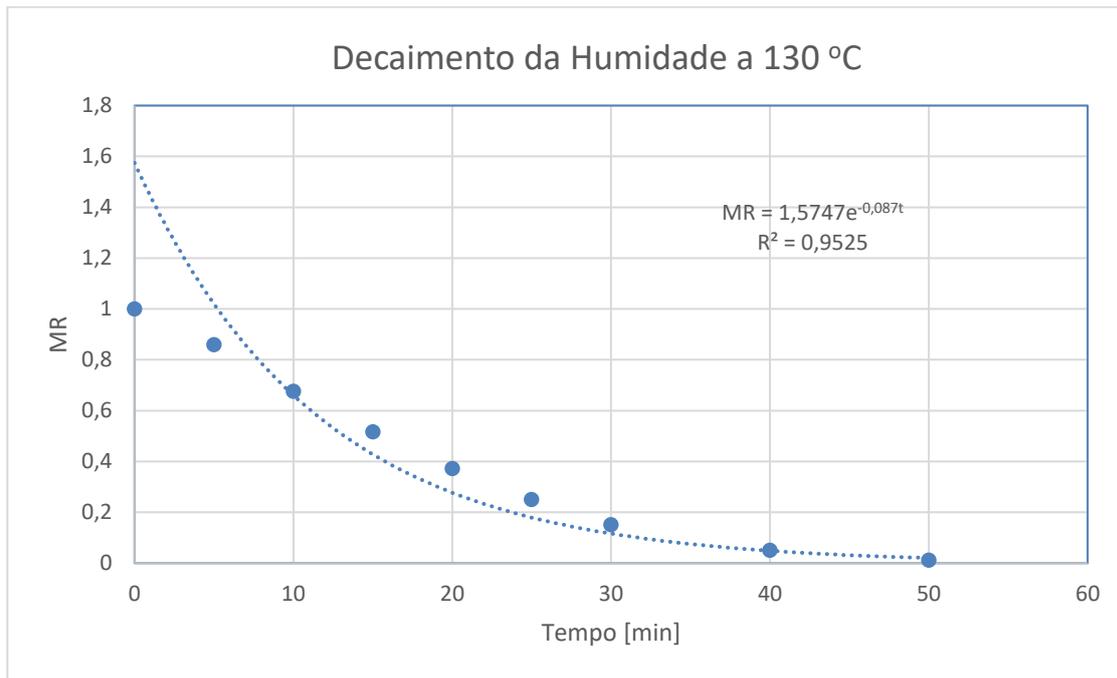
a)



b)



c)



d)

Figura 4-9 – Determinação dos coeficientes para o cálculo das propriedades, a) 40 °C, b) 70 °C, c) 100 °C, d) 130 °C

Tabela 4-2 – Coeficientes k_0 e k

Parâmetros	Temperatura (°C)			
	40	70	100	130
k_0	1,3324	1,3422	1,4586	1,5747
k	0,01	0,025	0,054	0,087

Com estes valores e recorrendo das equações 3-11 a 3-14 foram determinados os valores de D_{eff} e h_m (Tabela 4-3).

Tabela 4-3 – Propriedades da lama

Temperatura	Bi_m	μ_1^2	D_{eff}		h_m	
			[m ² /min]	[m ² /s]	[m/min]	[m/s]
40 °C	2,2217	2,7947	2,2363E-08	3,7273E-10	1,9874E-05	3,3124E-07
70 °C	2,3571	2,8836	5,4186E-08	9,0310E-10	5,1089E-05	8,5149E-07
100 °C	4,9706	3,9525	8,5388E-08	1,4231E-09	1,6977E-04	2,8295E-06
130 °C	14,698	5,0271	1,0816E-07	1,8027E-09	6,3591E-04	1,0598E-05

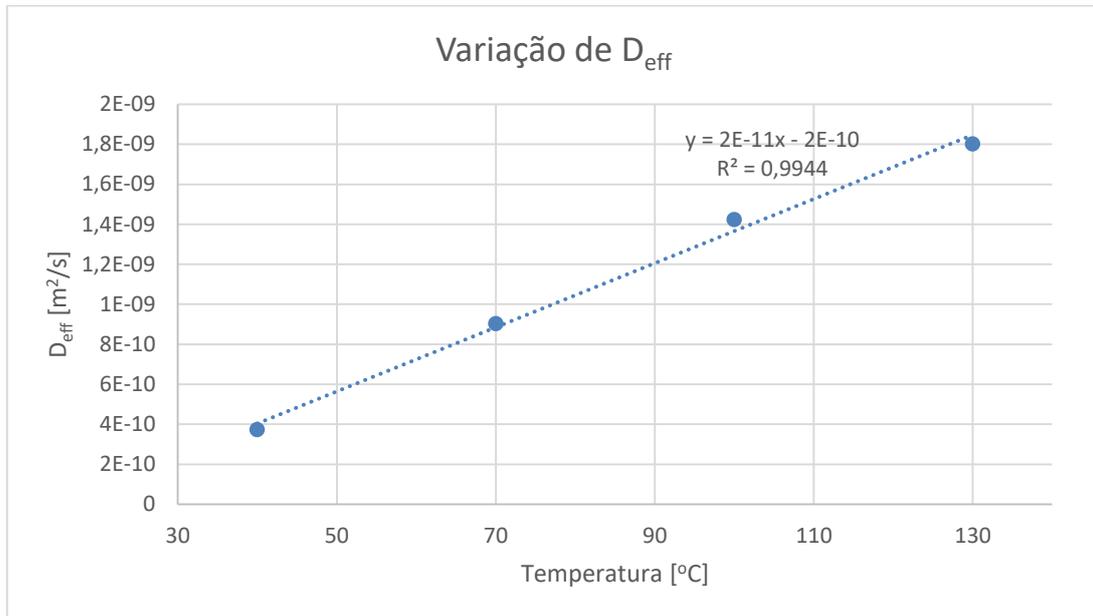


Figura 4-10 - Variação da difusividade efetiva

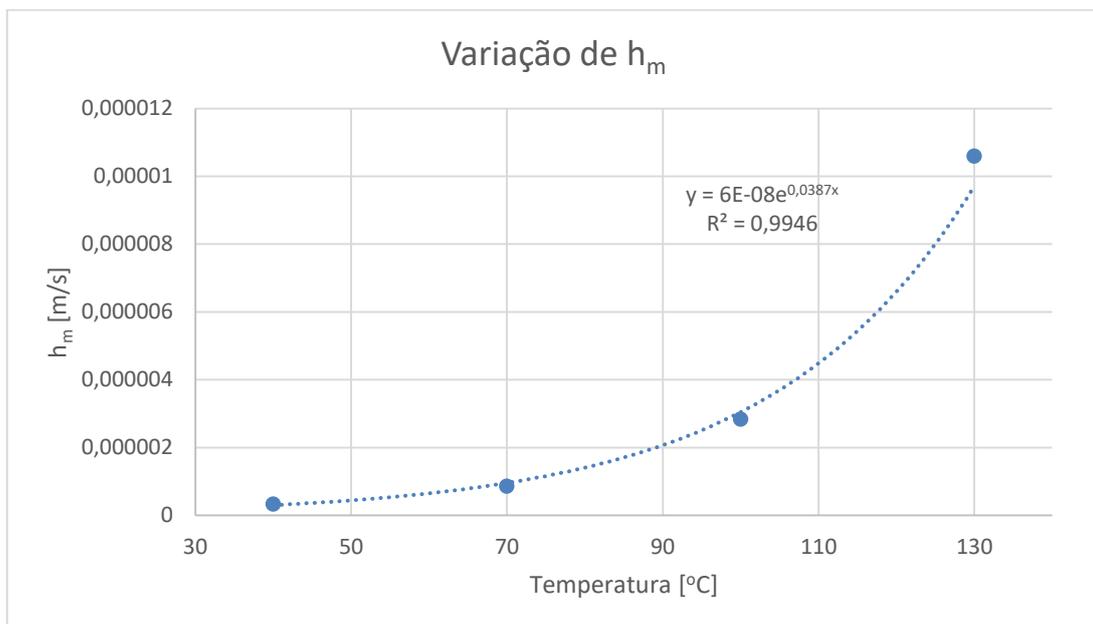


Figura 4-11 - Variação do coeficiente de transferência de massa

4.3. Previsões recorrendo ao modelo desenvolvido

Com base nas variações dos parâmetros apresentados na secção anterior é possível prever o comportamento do perfil de secagem e os valores de D_{eff} e h_m para uma determinada temperatura arbitrária. Devido à natureza do modelo proposto, os melhores resultados vão surgir para temperaturas entre os 40 °C e os 130 °C.

Foram feitas previsões para duas temperaturas, a 115 °C e 150 °C, as quais foram comparadas com resultados experimentais obtidos posteriormente. Os parâmetros do modelo correspondentes a cada temperatura podem ser vistos na Tabela 4-4 e as propriedades físicas calculadas na Tabela 4-5.

Tabela 4-4 - Coeficientes previstos

Temperatura	a	b	c	d	e
115 °C	0,0231	1,6271	0,0673	2,6124	0,0866
150 °C	0,0356	2,1993	0,1194	3,6974	0,1503

Temperatura	t1 [min]	t2 [min]	k_0	k
115 °C	17,5	32,5	1,5010	0,0679
150 °C	11,5	18	1,6042	0,1584

Tabela 4-5 - Propriedades previstas

Temperatura	Bi_m	μ_1^2	D_{eff}		h_m	
			[m ² /min]	[m ² /s]	[m/min]	[m/s]
115 °C	6,8734	4,3482	9,7598E-08	1,6266E-09	2,6833E-04	4,4722E-06
150 °C	20,3314	5,2249	1,8946E-07	3,1558E-09	1,5408E-03	2,5681E-05

A partir destes resultados podem ser calculados os valores de MR para a respetiva temperatura. Utilizando os coeficientes no modelo proposto obtém-se, para 115 °C e 150 °C, respetivamente:

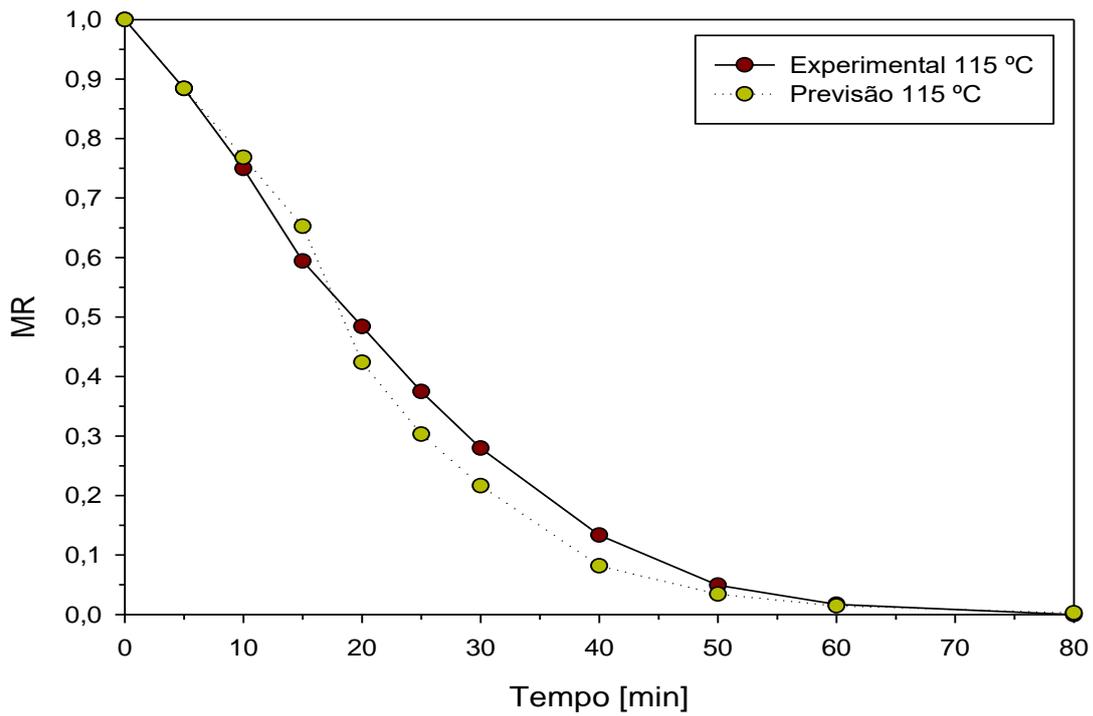
$$MR = \begin{cases} -0,0231 * t + 1, & t < 17,5 \\ 1,9271 * \exp(-0,0673 * t), & 17,5 < t < 32,5 \\ 2,6124 * \exp(-0,0866 * t), & t > 32,5 \end{cases} \quad (4-1)$$

$$MR = \begin{cases} -0,0356 * t + 1, & t < 11,5 \\ 2,1993 * \exp(-0,1194 * t), & 11,5 < t < 18 \\ 3,6974 * \exp(-0,1503 * t), & t > 18 \end{cases} \quad (4-2)$$

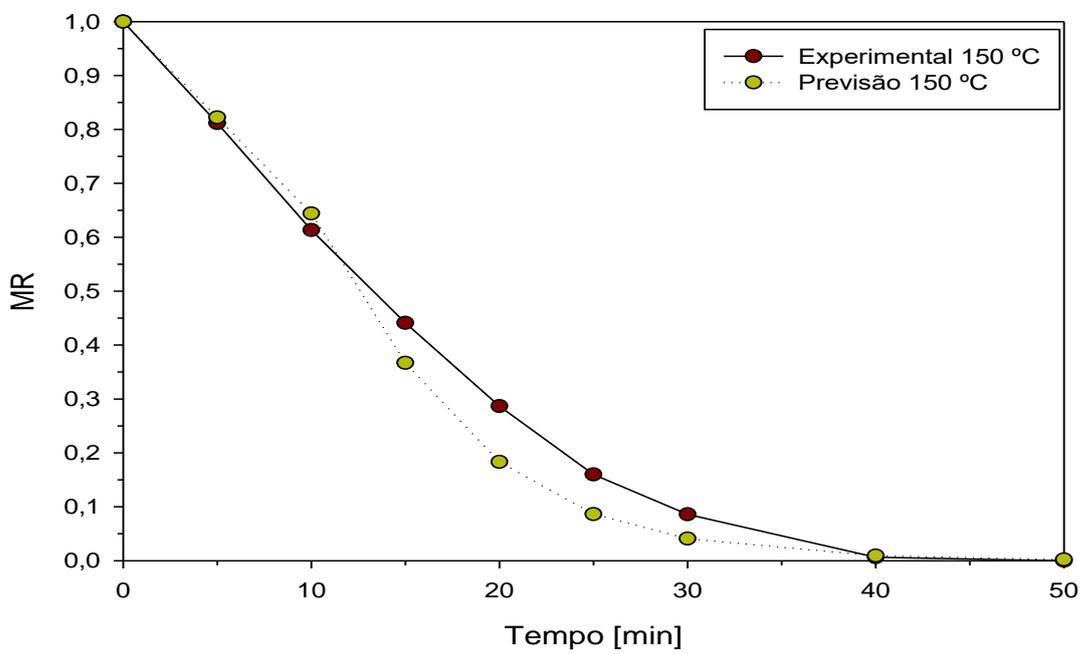
As comparações entre os resultados obtidos através do modelo e os resultados experimentais estão representadas na Tabela 4-6 e na Figura 4-12.

Tabela 4-6 - Comparação dos resultados previstos com os experimentais

Tempo [min]	Temperatura do ar de secagem			
	115 °C		150 °C	
	MR experimental	MR previsto	MR experimental	MR previsto
0	1	1	1	1
5	0,8839	0,8841	0,8116	0,8220
10	0,7493	0,7682	0,6133	0,6440
15	0,5939	0,6523	0,4411	0,3668
20	0,4839	0,4239	0,2866	0,1829
25	0,3748	0,3028	0,1597	0,0863
30	0,2794	0,2163	0,0860	0,0407
40	0,1333	0,0817	0,0062	0,0091
50	0,04919	0,0817	0	0
60	0,0171	0,0343	0	0
80	0	0	0	0



a)



b)

Figura 4-12 - Comparação dos resultados previstos com os experimentais

Comparando os resultados obtidos pode-se observar que o modelo é representativo da realidade na gama de temperatura proposta. Na Tabela 4-7 podem ser vistos os coeficientes estatísticos que comprovam a fiabilidade do modelo.

Tabela 4-7 - Avaliação da fiabilidade do modelo

Temperatura	115 °C	150 °C
R	0,9946	0,9931
Erro médio absoluto	0,03129	0,03807
RMSE	0,0420	0,05248
X ²	1	0,9999

5. CONCLUSÕES

Com o aumento da produção de resíduos associado ao crescimento da população mundial e das atividades económicas é fundamental conceber formas de valorizar os resíduos, indo de encontro as políticas de economia circular, que estabeleceram o fim do estatuto do resíduo. O tratamento de águas residuais na Europa gera cerca de 90 g/hab.dia de lamas de ETAR, a qual precisa ser seca para possibilitar melhores condições de armazenamento, transporte e valorização.

Neste trabalho foi desenvolvido um modelo empírico para previsão da secagem de lamas de ETAR a diferentes temperaturas do ar de secagem em regime de convecção natural, tendo por base resultados experimentais obtidos em condições laboratoriais. As previsões feitas através do modelo para as temperaturas de 115 °C e 150 °C proporcionaram uma boa correlação com os resultados experimentais. O modelo descreve o processo de secagem em três fases: primeira, de decaimento linear da humidade com o tempo, correspondente a uma taxa de secagem constante, seguida por duas fases de decaimento da humidade de forma exponencial, em que a taxa de secagem varia com o tempo. Enquanto o instante de transição da 1ª para a 2ª fase de secagem em função da temperatura do ar de secagem foi obtida um coeficiente de correlação simples $R^2=1$, para a transição da 2ª para a 3ª fase esse instante foi obtido com $R^2=0,86$. O coeficiente de transferência de massa e da difusividade efetiva foram considerados constantes durante o processo de secagem, e aumentam com a temperatura de secagem. A evolução dos coeficientes do modelo foi aproximada recorrendo a linhas de tendência, com valores de R^2 acima de 0,95 com a exceção do coeficiente d ($R^2=0,71$).

Este trabalho focou-se na influência da variação da temperatura no perfil de secagem, sendo, contudo interessante, para estudos futuros, analisar a influência de outros parâmetros. Em termos experimentais interessa avaliar a influência da variação de fatores como a velocidade do ar de secagem (regime de convecção forçada), a composição química da lama (com possível incorporação de adjuvantes), a alteração da geometria das amostras de lamas poderá produzir variações significativas na cinética de secagem das lamas. Em

trabalhos futuros a medição da perda de massa deveria ser feita continuamente, através de uma balança no interior do secador a fim de minimizar os erros experimentais.

Em estudos futuros o problema poderá também, ser abordado numa perspectiva mais teórica, optando por se desenvolver um modelo com base nas leis de transferência de calor e de massa, por meio de balanços energéticos e de massa. Esta abordagem terá a vantagem de considerar todos os fenómenos de transferência que ocorrem no sistema em simultâneo, mas implicará uma complexidade muito superior para a sua implementação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Barbosa, J. (2008). *Valorização de lamas provenientes do tratamento de água residuais*. Universidade Nova de Lisboa: Dissertação de Mestrado em Engenharia Sanitária.
- Brennan, J. G. (2006). Em *Food processing Handbook* (pp. 85-124). Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
- Bruce, D. M. (1985). Exposed-layer barley drying: Three models fitted to new data up to 150 °C. *Journal of Agricultural Engineering Research, Volume 32*, 337-348.
- Carvalho, M., & Antas, A. (2002). Valorização Agrícola de Lamas de ETAR - Potencial dos Solos Portugueses. *Gestão e Valorização de Lamas de ETA's e ETAR's em Portugal*. Lisboa.
- Ceaglske, N. H., & Hougen, O. A. (1937). Drying Granular Solids. *Industrial & Engineering Chemistry, Volume 29*, 805-813.
- Chen, G., Yue, P., & Mujumdar, A. (2002). Sludge Dewatering and Drying. *Drying Technology, Volume 20*, 883-916.
- Chen, P., & Pei, D. (1988). A Mathematical Model of Drying Processes. *Internal Journal of Heat and Mass Transfer* (pp. 297-310). Ontario, Canada: University of Waterloo.
- Dalmaz, N., Ozbelge, H. O., Eraslan, A. N., & Uludag, Y. (2007). Heat and Mass Transfer in Dryind of a Suspension Droplet: A New Computational Model. *Drying Technology, Volume 25*, 391-400.
- Danish, M., Pin, Z., Ziyang, L., & Pansheng, Q. (2016). A New Kinetic Drying Model for Sewage Sludge Drying in Presence of CaO and NaClO. *Applied Thermal Engineering, Volume 106*, 141-152.
- Decreto-Lei n° 276/2009 de 2 de Outubro, alínea c) do n° 1 do artigo 12°.*
- Eddy, M. e. (2003). *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse*. Nova Iorque: McGraw-Hill.
- Ficza, I. (2010). *Mathematical Model of Solar Drying of Sewage Sludge*. Bruno University of Technology, Republica Checa: Masters Thesis.
- Gomes, L. A. (2017). *Studies on Sewage Sludge Drying Procces for Afronomic Applications*. Universidade de Coimbra: Thesis Project in Doctoral Program in Environmental Engineering.
- Gonçalves, J. (2017). *Análise das Tecnologias Correntes para o Tratamento e Secagem de Lamas de ETAR*. Universidade de Coimbra: Dissertação de Mestrado em Engenharia do Ambiente.

- Harmathy, T. Z. (1969). Simultaneous Moisture and Heat Transfer in Pours Systems with Particular reference to Drying. *Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals, Volume 8*, 92-103.
- Henderson, S. M., & Pabis, S. (1961). Grain Drying Theory. Temperature Effects os Drying Coefficients. *Journal of Agricultural Engineering Research, Volume 6*, 169-174.
- King, C. J. (1971). *Freeze Drying of Foods*. Londres: Butterworth.
- Krischer, O., & Kast, W. (1978). *Die Wissenschaftlichen Grundlagen der Trocknungstechnik 3rd Edn*. Berlin: Springer.
- Liz, J. V. (2017). *Contribuição para o Estudo de Sistemas de Secagem de Lamas de ETAR*. Universidade de Coimbra: Dissertação de Mestrado em Engenharia do Ambiente.
- Luikov, A. V. (1966). *Heat and Mass Transfer in Capillary-Porous Bodies*. Pergamon Press: Londres.
- Luikov, A. V. (1975). Systems of Differential Equations of Heat and Mass Transfer in Capillary-Porous Bodies. *Internal Journal of Heat and Mass Transfer, Volume 18*, 1-14.
- Luo, J., Li, A., Huang, D., Ma, J., Tang, J., & Shukla, S. K. (2006). Behaviour of Solid Matters and Heavy Metals During Convective Drying Porecess of Sewage Sludge. *Cogent Wngineering, Volume 3*, 50-62.
- MacCabe, W. L. (1993). *Unit Operations of Chemical Engineering, 5th Edition*. Nova Iorque: McGraw-Hill.
- Midilli, A., & Kucuk, H. (2003). Mathematical Modeling of Thin Layer Drying of Pistachio by Using Solar Energy. *Energy Conversion and Management*, 1111-1122.
- Page, G. E. (1949). *Factors Influencing the Maximum Rates of Air Drying of Shelled Corn in Thin Layer*. Purdue University, Indiana: Masters Thesis.
- Pflug, L. J., & Blaisdell, J. L. (1963). Methods of analisis of procooling data. *ASHRAE Journal, Volume 5*, 33-40.
- RARSAP. (2016). *Relatório Anual dos Serviços de Águas e Resíduos em Portugal*. Portugal: Entidade Reguladora dos Serviços de águas e Resíduos.
- Sherwood, T. K. (1929). The Drying of Solids. *Industrial & Engineering Chemistry, Volume 21*, 12-16.
- Szentgyorgyi, & Molnar. (1978). *Calculation of Drying Parameters for the Penetrating Evaporating Front*. Nova Jersey: Science Press.
- Tavares, P. (2007). *Otimização da Gestão de Lamas de ETAR numa Perspectiva Regional*. Universidade de Coimbra: Tese de Doutoramento em Engenharia Civil.

- Thripathy, P. P., & Kumar, S. (2009). A Methodology for Determination of Temperature Dependent Mass Transfer Coefficients from Drying Kinetics: Applications to Solar Drying. *Journal of Food Engineering, Volume 90*, 212-218.
- Togrul, I. T., & Pehlivan, D. (2002). Mathematical Modelling of Solar Drying of Apricots in Thin Layers. *Journal of Food Engineering, Volume 55*, 209-216.
- VanBrakel, J., & Heertjes, P. M. (1978). On the Period of Constant Drying Rate. *Science Press*, 7-18.
- Wang, C. Y., & Singh, R. P. (1978). Use of Variable Equilibrium Moisture Content in Modeling Rice Drying. *American Society of Agricultural Engineers*.
- White, G. M., & Ross, I. J. (1981). Fully Exposed Drying of Popcorn. *Transactions of ASAE, Volume 24*, 466-468.

Tempo (min)	MR - 40 °C																			MR média	
0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
5	0,981884	0,98513	0,996197719	0,97859779	0,982206	0,981343	0,98155	0,989011	0,985401	0,996337	0,973783	0,978261	0,977941	0,989323843	0,978417266	0,974074	0,98304504				
10	0,95471	0,966543	0,965779468	0,955719557	0,957295	0,958955	0,97048	0,978022	0,948905	0,96337	0,951311	0,960145	0,948529	0,957295374	0,956834532	0,948148	0,95887766				
15	0,932971	0,94052	0,935361217	0,904059041	0,928826	0,925373	0,933579	0,937729	0,919708	0,934066	0,917603	0,931159	0,926471	0,939501779	0,920863309	0,907407	0,92719989				
20	0,913043	0,925651	0,912547529	0,904059041	0,903915	0,895522	0,911439	0,923077	0,894161	0,912088	0,888895	0,873188	0,900735	0,896797153	0,881294964	0,877778	0,90057443				
25	0,894928	0,895911	0,866920152	0,856088561	0,88968	0,865672	0,892989	0,893773	0,864964	0,886447	0,857678	0,855072	0,867647	0,87544484	0,845323741	0,848148	0,8722928				
30	0,865942	0,869888	0,825095057	0,830258303	0,854093	0,850746	0,863469	0,868132	0,832117	0,857143	0,835206	0,811594	0,852941	0,857651246	0,834532374	0,82963	0,84615234				
40	0,82971	0,85316	0,802281369	0,79704797	0,825623	0,798507	0,837638	0,85348	0,791971	0,813187	0,782772	0,764493	0,797794	0,800711744	0,791366906	0,774074	0,80711353				
50	0,793478	0,797398	0,764258555	0,782287823	0,772242	0,742537	0,785978	0,798535	0,751825	0,783883	0,726592	0,728261	0,764706	0,775800712	0,748201439	0,733333	0,76558225				
60	0,744565	0,769517	0,74904943	0,752767528	0,743772	0,69403	0,741697	0,769231	0,715328	0,74359	0,696629	0,663043	0,709559	0,736654804	0,705035971	0,685185	0,72622843				
80	0,699275	0,715613	0,711026616	0,715867159	0,651246	0,619403	0,693727	0,717949	0,645985	0,681319	0,632959	0,605072	0,647059	0,661921708	0,629496403	0,625926	0,66586531				
100	0,619565	0,639405	0,63878327	0,660516605	0,580071	0,563433	0,612546	0,641026	0,583942	0,604396	0,558052	0,525362	0,573529	0,601423488	0,575539568	0,551852	0,59559015				
120	0,570652	0,579926	0,585551331	0,608856089	0,523132	0,470149	0,564576	0,582418	0,49635	0,538462	0,483146	0,427536	0,511029	0,544483986	0,503597122	0,477778	0,52922762				
150	0,48072	0,490706	0,539923954	0,564575646	0,398577	0,350746	0,477325	0,494505	0,383212	0,432234	0,370787	0,318841	0,400735	0,441281139	0,402877698	0,37037	0,43198557				
180	0,400362	0,407063	0,498098859	0,52398524	0,295374	0,242537	0,391144	0,413919	0,291971	0,340659	0,269663	0,228261	0,297794	0,34519573	0,31294964	0,277778	0,34604719				
210	0,338768	0,340149	0,44486692	0,472324723	0,234875	0,171642	0,328413	0,347985	0,20073	0,230769	0,187266	0,155797	0,209559	0,256227758	0,21942446	0,192593	0,27071188				
240	0,235507	0,27881	0,33460076	0,394833948	0,11032	0,085821	0,221402	0,285714	0,131387	0,164835	0,11236	0,101449	0,150735	0,181494662	0,14028777	0,118519	0,19050482				
270	0,17029	0,200743	0,220532319	0,269372694	0,081851	0,059701	0,154982	0,208791	0,080292	0,10989	0,074906	0,043478	0,084559	0,128113879	0,09952518	0,07037	0,12821238				
330	0,065217	0,066914	0,11026616	0,147601476	0,042705	0,029851	0,04797	0,076923	0,036496	0,065934	0,022472	0,01087	0,033088	0,074733096	0,057553957	0,037037	0,05785204				
390	0,016304	0	0,034220532	0,077490775	0,010676	0	0	0,010989	0,010949	0,018315	0,003745	0	0	0,03202847	0,014388489	0,007407	0,01478215				
450	0	0	0,034220532	0,077490775	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00698196				
600	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				

Tempo (min)	MR - 70 °C																		MR média
	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
0	0,975265	0,964789	0,974359	0,97153	0,98524	0,95203	0,868421	0,868613	0,985663	0,972318	0,962687	0,968421	0,957597	0,951852	0,946237	0,953069	0,95363061	1	
5	0,929329	0,931338	0,912088	0,914591	0,885609	0,885609	0,804511	0,810219	0,928315	0,930796	0,895522	0,919298	0,908127	0,9	0,896057	0,978339	0,901859317		
10	0,865724	0,885563	0,882784	0,86121	0,830258	0,819188	0,740602	0,737226	0,870968	0,868512	0,847015	0,880702	0,840989	0,851852	0,845878	0,844765	0,842077322		
15	0,816254	0,834507	0,831502	0,80427	0,763838	0,760148	0,672932	0,660584	0,817204	0,813149	0,802239	0,810526	0,787986	0,788889	0,792115	0,787004	0,783946659		
20	0,766784	0,792254	0,776557	0,754448	0,701107	0,708487	0,586466	0,616788	0,731183	0,726644	0,716418	0,719298	0,706714	0,692593	0,695341	0,703971	0,712190767		
25	0,720848	0,739437	0,728938	0,711744	0,627306	0,649446	0,56391	0,551095	0,584229	0,678201	0,652985	0,677193	0,657244	0,644444	0,645161	0,65343	0,655350681		
30	0,621908	0,658451	0,681319	0,661922	0,520295	0,535055	0,484962	0,50365	0,491039	0,487889	0,567164	0,585965	0,565371	0,548148	0,562724	0,465704	0,558847923		
40	0,530035	0,580986	0,6337	0,608541	0,416974	0,446494	0,432331	0,445255	0,741935	0,062284	0,473881	0,505263	0,484099	0,462963	0,473118	0,393502	0,480710107		
50	0,385159	0,461268	0,571429	0,551601	0,317343	0,361624	0,383459	0,394161	0,247312	0,245675	0,384328	0,417544	0,388693	0,381481	0,390681	0,227437	0,381824582		
60	0,250883	0,31338	0,468864	0,451957	0,166052	0,199262	0,293233	0,310219	0,129032	0,117647	0,227612	0,270175	0,236749	0,218519	0,243728	0,119134	0,251027916		
80	0,137809	0,183099	0,527473	0,316726	0,073801	0,070111	0,180451	0,171533	0,050179	0,048443	0,104478	0,150877	0,120141	0,111111	0,125448	0,036101	0,150486262		
100	0,067138	0,09507	0,326007	0,313167	0,02214	0,02214	0,071429	0,069343	0,046595	0,017301	0,041045	0,070175	0,038869	0,044444	0,053763	0,00722	0,081615531		
120	0,021201	0,03169	0,047619	0,017794	0	0	0,011278	0,014599	0	0	0,011194	0,031579	0,017668	0	0,021505	0	0,014132946		
150	0,010601	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,014035	0	0,003584	0	0,001763751			
180	0,010601	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,000662544		
210	0,010601	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
300	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		

Tempo (min)	Decaimento de massa (g) - 100 eC																				Média
0	3,67	3,68	3,71	3,52	3,56	3,47	3,69	3,66	3,72	3,65	3,63	3,70	3,65	3,61	3,64	3,59	3,634375				
5	3,55	3,48	3,65	3,42	3,4	3,15	3,46	3,45	3,5	3,38	3,31	3,33	3,25	3,24	3,24	3,15	3,3725				
10	3,29	3,24	3,38	3,13	3,04	2,83	3,21	3,10	3,11	3,00	2,9	3,01	2,9	2,90	2,85	2,76	3,040625				
15	3,08	3,00	3,11	2,85	2,69	2,50	2,91	2,83	2,78	2,68	2,58	2,67	2,49	2,57	2,48	2,4	2,72625				
20	2,83	2,77	2,77	2,53	2,42	2,26	2,61	2,23	2,46	2,40	2,3	2,37	2,23	2,27	2,16	2,09	2,41875				
25	2,53	2,48	2,46	2,27	2,07	1,97	2,39	1,95	2,15	2,08	1,95	2,05	1,89	1,96	1,83	1,75	2,11125				
30	2,28	2,23	2,23	2,03	1,85	1,57	2	1,50	1,88	1,53	1,72	1,79	1,64	1,82	1,56	1,48	1,819375				
40	1,92	1,83	1,76	1,57	1,45	1,25	1,58	1,18	1,42	1,38	1,28	1,36	1,21	1,30	1,16	1,1	1,421875				
50	1,49	1,44	1,39	1,25	1,12	1,05	1,22	0,97	1,14	1,12	1,03	0,99	0,96	1,03	0,97	0,93	1,13125				
60	1,27	1,20	1,3	1,15	0,95	0,85	1,05	0,82	0,99	0,94	0,89	0,95	0,86	0,91	0,87	0,84	0,99				
80	0,97	0,87	0,97	0,84	0,78	0,84	0,82	0,81	0,86	0,83	0,84	0,85	0,83	0,83	0,84	0,8	0,84875				
100	0,91	0,85	0,84	0,77	0,78	0,85	0,8	0,80	0,82	0,84	0,82	0,84	0,82	0,86	0,8	0,8	0,825				
120	0,895	0,84	0,83	0,80	0,78	0,83	0,8	0,80	0,82	0,81	0,81	0,80	0,8	0,81	0,8	0,8	0,8140625				
150	0,9	0,83	0,83	0,78	0,76	0,83	0,8	0,80	0,82	0,81	0,81	0,80	0,8	0,81	0,8	0,8	0,81125				
200	0,86	0,82	0,83	0,78	0,76	0,83	0,8	0,80	0,82	0,81	0,81	0,80	0,8	0,81	0,8	0,8	0,808125				
M0	3,2674419	3,487804878	3,46988	3,512821	3,684211	3,180723	3,6125	3,575	3,536585	3,506173	3,481481	3,625	3,5625	3,45679	3,55	3,4875					
Tempo (min)	MT																				Média
0	3,2674419	3,487804878	3,46988	3,512821	3,684211	3,180723	3,6125	3,575	3,536585	3,506173	3,481481	3,625	3,5625	3,45679	3,55	3,4875	3,499775625				
5	3,127907	3,243902439	3,39759	3,384615	3,473684	2,795181	3,325	3,3125	3,268293	3,17284	3,08642	3,1625	3,0625	3	3,05	2,9375	3,175027002				
10	2,8255814	2,951219512	3,072289	3,012821	3	2,409639	3,0125	2,875	2,792683	2,703704	2,580247	2,7625	2,625	2,580247	2,5625	2,45	2,763495599				
15	2,5813953	2,658536585	2,746988	2,653846	2,539474	2,012048	2,6375	2,5375	2,390244	2,308642	2,185185	2,3375	2,1125	2,17284	2,1	2	2,373387405				
20	2,2906977	2,37804878	2,337349	2,243359	2,184211	1,722892	2,2625	1,7875	2	1,962963	1,839506	1,9625	1,7875	1,802469	1,7	1,6125	1,992139123				
25	1,9418605	2,024390244	1,963855	1,910256	1,723684	1,373494	1,9875	1,4375	1,621951	1,567901	1,407407	1,5625	1,3625	1,419753	1,2875	1,1875	1,611222105				
30	1,6511628	1,719512195	1,686747	1,602564	1,434211	0,891566	1,5	0,875	1,292683	0,888889	1,123457	1,2375	1,05	1,246914	0,95	0,85	1,250012816				
40	1,2325581	1,231707317	1,120482	1,012821	0,907895	0,506024	0,975	0,475	0,731707	0,703704	0,580247	0,7	0,5125	0,604938	0,45	0,375	0,757473934				
50	0,7325581	0,756097561	0,674699	0,602564	0,473684	0,26506	0,525	0,2125	0,390244	0,382716	0,271605	0,2375	0,2	0,271605	0,1225	0,1625	0,398177055				
60	0,4767442	0,463414634	0,566265	0,474339	0,25	0,024096	0,3125	0,025	0,207317	0,160494	0,098765	0,1875	0,075	0,123457	0,0875	0,05	0,223900773				
80	0,127907	0,06097561	0,168675	0,076933	0,026316	0,012048	0,025	0,0125	0,04878	0,024691	0,037037	0,0625	0,0375	0,024691	0,05	0	0,0497171537				
100	0,0581395	0,036583366	0,012048	-0,01282	0,026316	0,024096	0	0	0	0,037037	0,012346	0,05	0,025	0,061728	0	0	0,020654742				
120	0,0406977	0,024390244	0	0,0255641	0,026316	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,007315296				
150	0,0465116	0,012195122	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,003669172				
200	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				

		MR - 130 °C																		MR média	
Tempo (min)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
0	0,930605	0,914485166	0,895105	0,933555	0,898649	0,871429	0,860927	0,841549	0,88172	0,874101	0,847015	0,843066	0,814035	0,756757	0,796296	0,794007	0,859581308				
5	0,807829	0,781849913	0,755245	0,79402	0,739865	0,689286	0,665563	0,665493	0,688172	0,669065	0,626866	0,653285	0,603509	0,545045	0,562963	0,573034	0,676317991				
10	0,658363	0,663176265	0,636364	0,674419	0,564189	0,525	0,5	0,489437	0,523297	0,5	0,462687	0,489051	0,424561	0,36036	0,388889	0,400749	0,516283886				
15	0,537367	0,541012216	0,451049	0,528239	0,418919	0,392857	0,337748	0,334507	0,387097	0,352518	0,313433	0,350365	0,294737	0,225225	0,244444	0,254682	0,372762443				
20	0,427046	0,429319372	0,370629	0,408638	0,27027	0,246429	0,178808	0,176056	0,265233	0,241007	0,19403	0,233577	0,178947	0,108108	0,140741	0,146067	0,250931644				
25	0,322064	0,329842932	0,199301	0,255814	0,172297	0,128571	0,096026	0,098592	0,164875	0,136691	0,115672	0,153285	0,094737	0,013514	0,077778	0,071161	0,151888694				
30	0,149466	0,153577661	0,083916	0,122924	0,067568	0,035714	0,019868	0,021127	0,035842	0,039568	0,014925	0,032847	0,014035	0	0,003704	0,011236	0,050394823				
40	0,053381	0,059336824	0,003497	0,0299	0,016892	0	0,007042	0,003584	0	0,003731	0,014599	0	0	0	0,003745	0,012231751					
50	0,024911	0,029668412	0	0,033223	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,005487627				
60	0,010676	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00066726				
80	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				

