


Otimização de parâmetros de secagem em *spray-dryer* do lodo de estação de tratamento de água convencional por meio de planejamento fatorial de experimentos

Optimization of parameters for spray-drying sludge from conventional water treatment plant by a factorial design of experiments


- **Data de entrada:**
03/05/2024
- **Data de aprovação:**
05/02/2025


Arnaldo Sarti^{1*} | Bruna Sampaio de Mello¹ | Maria Rosa das Neves Nunes Muci¹ | Rodrigo Braga Moruzzi¹ | Samuel Conceição de Oliveira¹


DOI: <https://doi.org/10.36659/dae.2025.084>

Sarti A  <https://orcid.org/0000-0001-7288-8553>

Moruzzi RB  <https://orcid.org/0000-0002-1573-3747>

Mello BS  <https://orcid.org/0000-0003-3480-5475>

Oliveira SC  <https://orcid.org/0000-0003-4997-081X>

Muci MRNN  <https://orcid.org/0000-0001-5717-0973>

Resumo

O trabalho teve como objetivo analisar a secagem por atomização via *spray-dryer* em escala laboratorial, a fim de definir, por meio de técnicas estatísticas de planejamento fatorial, as melhores condições operacionais para a secagem de lodo de estação de tratamento de água (ETA) convencional. Nesse contexto, foram desenvolvidos experimentos de secagem do resíduo considerando as principais variáveis que podem intervir no processo, tais como concentração de sólidos, temperatura e vazão do ar de secagem, as quais podem influenciar na umidade final do produto em pó. Na secagem do lodo com teor de sólidos na faixa de 0,80 a 4,20% obteve-se a umidade final do pó seco entre 5,20 e 18,89%, ou seja, 94,80 e 81,11% de teor de sólidos totais. Esses dados demonstram a eficiência do processo, o que viabilizou a secagem do lodo em função da otimização de parâmetros resultando nos valores ótimos de temperatura (142°C) e vazão do ar de secagem (82 m³.h⁻¹) e teor de sólidos (2,13%), bem como determinou-se a umidade final nas condições otimizadas (7,39%). Tais resultados mostraram que essas variáveis tiveram efeito positivo no teor de umidade final, sendo que a proposta apresentada se mostrou efetiva para a redução de volume, sendo possível o reaproveitamento desse resíduo ou disposição final mais adequada do produto final em pó.

Palavras-chave: *Spray-drying*. Resíduo de ETAs. Destinação final. Produto em pó.

Abstract

This study aimed to analyze atomization drying via spray-dryer on a laboratory scale to define the best operating conditions to dry conventional DWTP sludge by statistical factorial planning techniques. Drying experiments were developed considering the main variables that can intervene in the process, such as solid concentration, temperature, and drying air flow, which can influence the final humidity of products. Drying the sludge with solids content of 0.80 at 4.20% resulted in final dry powder moisture content of 5.20 at 18.89%, i.e., 94.80 at 81.11% total solid content. These data show the efficiency of the process, which made sludge drying feasible by optimizing its parameters, resulting in the optimum values for temperature (142°C), flow rate of the drying air

¹ Universidade Estadual Paulista (UNESP) – Araraquara – São Paulo – Brasil.

* **Autor correspondente:** arnaldo.sarti@unesp.br

($82 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$), and solid content (2.13%) and determined the final humidity under the optimized conditions (7.39%). These results showed that these variables significantly and positively affected the final moisture content and that the proposal effectively reduced the volume and increased the possibilities of reusing this residue or final disposal (powered product).

Keywords: *Spray-drying. DWTPs waste. Final destination. Powdered product.*

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, o *spray-dryer* é amplamente aplicado em três principais áreas. Na indústria alimentícia, com a produção de leite em pó, café, cereais, especiarias, aromatizantes, amido, vitaminas, enzimas, corantes, ração animal etc. Na indústria farmacêutica, com a produção de antibióticos, vacinas e aditivos. Na indústria química, com a produção de pigmentos de tintas, materiais cerâmicos e suportes de catalisadores (Çelik *et al.*, 2021).

A água ou diferentes solventes podem ser removidos de sólidos mecanicamente, por centrífugas, prensas; ou termicamente, por meio de calor. A secagem de líquidos por pulverização (atomização), conhecida como *spray-drying*, trata-se da operação unitária de secagem térmica que permite a transformação de uma alimentação em estado fluido para um produto seco com uso de *spray-dryer*. A referida alimentação do processo pode ser uma pasta, emulsão, suspensão ou solução. Já o produto final seco pode ter forma de grânulos, aglomerados ou pó (McCabe; Smith; Harriott, 1993; Nath; Satpathy, 1998).

A secagem via *spray-dryer* definida como padrão pode ser composta por quatro estágios específicos: (a) atomização pela dispersão de sólidos; (b) evaporação de solvente; (c) formação de pequenas partículas; e (d) recuperação e separação do pó (Masters, 2002).

Salienta-se que diversos fatores podem afetar o desempenho do processo de secagem via *spray-dryer*, tais como: temperatura do ar de entrada, vazão de ar, vazão de alimentação, teor de sólidos, propriedades reológicas e termodinâmicas do

fluido (Keshani *et al.*, 2015). No entanto, na maioria dos estudos, monitora-se a influência de um fator por vez a cada resposta, impossibilitando a análise dos efeitos da interação entre duas ou mais variáveis. Logo, a aplicação de ferramentas estatísticas multivariadas está ganhando cada vez mais destaque, pois permite avaliar o efeito de múltiplas variáveis e otimizar a resposta, economizando recursos financeiros e tempo (Politis *et al.*, 2017).

A técnica de planejamento fatorial de experimentos é uma ferramenta estatística muito aplicada à análise de sistemas multivariados, nos quais se deseja avaliar os efeitos principais e de interação de vários fatores sobre uma determinada resposta do sistema, extraindo-se o máximo de informação paramétrica com um menor esforço experimental (menor número de experimentos). A execução do planejamento experimental pela realização dos ensaios nas diferentes condições programadas permitirá desenvolver, testar, validar e calibrar o *spray-dryer* para a secagem. De modo geral, planejamentos ou delineamentos experimentais são procedimentos por meio dos quais fatores são selecionados e deliberadamente variados de maneira controlada, a fim de avaliar os efeitos desses fatores em dada resposta de interesse do sistema em estudo, sendo muitas vezes acompanhados por análises estatísticas dos resultados experimentais obtidos (Calado; Montgomery, 2003).

O lodo de ETA é classificado como um material não perigoso e não inerte pertencente à Classe II A, conforme a norma NBR 10.004/2004 (ABNT, 2004). Os lodos gerados nos decantadores

e filtros das ETAs apresentam características bastante variadas, dependendo principalmente das condições da água bruta, dos produtos químicos utilizados (coagulantes) e suas dosagens, além da forma de limpeza dos decantadores e filtros e tipo do processo de tratamento.

Nesse contexto, a ETA é parte fundamental do sistema de abastecimento de água, sendo o sistema convencional ou completo (coagulação, floculação, decantação e filtração) o mais utilizado. Tal sistema realiza a remoção de partículas finas em suspensão e em solução presentes na água bruta por meio do emprego de coagulantes. Geralmente, utilizam-se sais de ferro e/ou alumínio que formam flocos gerados pelos hidróxidos insolúveis, e que são majoritariamente removidos nos decantadores e, em menor parcela, nos filtros.

Segundo Achon, Barroso e Cordeiro (2013), existem no Brasil cerca de 7.500 ETAs que utilizam o tratamento de água convencional, que podem estar lançando seus resíduos diretamente em cursos d'água. Além dos problemas ambientais gerados, as unidades de saneamento a partir de 1997 passaram a ter uma preocupação legal devido à instituição da Política Nacional de Recursos Hídricos, que definiu a outorga de lançamento de efluente como um instrumento de gerenciamento de recursos hídricos (Andreoli, 2001).

O lodo proveniente dos decantadores está na faixa de 60 a 95% do total de lodo gerado, enquanto a água de lavagem dos filtros varia de 5,0 a 40%, sendo essas quantidades dependentes exclusivamente da qualidade da água bruta, do tipo e dosagem do coagulante, do projeto das unidades e da operação da ETA. Esse resíduo gerado nos decantadores pode ter concentração de sólidos variável (0,1 a 4,0%), sendo que a água de lavagem de filtros possui concentração de sólidos menor, entre 0,01 e 0,10% (Di Bernardo; Dantas; Voltan, 2012). Ressalta-se que o lodo de ETA é classificado como material não perigoso e

não inerte pertencente à Classe II A, conforme a norma NBR 10.004/2004 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 2004).

A presença de metais nos lodos da ETAs, tais como zinco, níquel, cobre chumbo, cádmio, cromo e magnésio, estão diretamente relacionados à água bruta, no entanto, a existência de ferro e/ou alumínio em maior quantidade é devida aos coagulantes utilizados nas ETAs. No caso, o cuidado principal deve ser dado ao alumínio, que possui ação tóxica e pode acarretar efeitos negativos na disposição final e, até, na possível reutilização desses resíduos (Barroso; Cordeiro, 2002).

Alternativas para o destino final do lodo de ETAs têm sido propostas, como a disposição em aterros sanitários, aterros exclusivos, gerenciamento conjunto com lodo de tratamento de esgoto e co-disposição com biossólido, aplicação controlada em certos tipos de solo, em matriz de concreto e aplicações industriais diversas (Smiderle, 2016). Por outro lado, o lançamento do lodo de ETAs nos cursos d'água vem sendo drasticamente reduzido em função das legislações mais rigorosas de controle da poluição e das consequências do descarte sistemático desses resíduos (Di Bernardo; Dantas; Voltan, 2012). Portanto, há uma necessidade crescente de desenvolver práticas de gestão de lodo de ETA mais sustentáveis (Ippolito; Barbarick; Elliott, 2011), sendo esta uma clara oportunidade para que esse resíduo seja considerado um recurso e reutilizado, bem como reciclado seguindo os princípios da economia circular.

A proposta do trabalho tem como base a aplicação de unidade de secagem (*spray-dryer*) em bases racionais e otimizadas para lodos gerados em ETA convencional, bem como a premissa de minimização dos impactos ambientais dos lodos de ETAs pela melhor adequação do resíduo em pó para disposição final. Ressalta-se que o desenvolvimento e uso dessa tecnologia já estabelecida na área industrial podem implicar na sua empre-

gabilidade nas ETAs que utilizam processos de coagulação, floculação, decantação e filtração, bem como poderá fornecer fundamentos para a melhoria dos sistemas de desidratação de lodo e de logística de descarte.

2 METODOLOGIA

2.1 Aparato experimental

A unidade de secagem em escala de laboratório foi confeccionada em vidro borossilicato (câmara de secagem de 1,0 m de altura) e em aço inox 316 L (interligações e ciclone), sendo controlada via CLP

(Comando Lógico Programável) para os parâmetros específicos de vazão de líquido a ser secado ($0,0$ a $0,50 \text{ L.h}^{-1}$), temperatura (0 a $250 \text{ }^{\circ}\text{C}$) e vazão de ar de secagem ($0,0$ a $85 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$) e agitação do líquido de alimentação. O equipamento possui bico atomizador pneumático com pressão de operação mantida em torno de $4,0 \text{ bar}$ e a vazão de ar comprimido de 40 a 45 L.min^{-1} . Na Figura 1 são apresentados detalhes do *spray-dryer* (marca MGK Equipamentos) e a balança de umidade. Ressalta-se que a utilização do vidro borossilicato foi crucial para a visualização do processo de atomização e secagem do lodo.



Figura 1 – (a) *Spray-dryer* ($0,5 \text{ L/h}$) com detalhe do ciclone e receptor do pó final; (b) Controlador lógico programável (CLP); (c) Bico atomizador pneumático (orifício = $1,2 \text{ mm}$); (d) Bomba peristáltica (alimentação de produto úmido no bico atomizador); (e) Compressor de ar de 170 L min^{-1} e válvula reguladora de pressão do bico atomizador; e (f) Balança de umidade (marca BEL).

2.2 Planejamento Experimental

As técnicas estatísticas de planejamento de experimentos foram utilizadas visando avaliar a influência de três fatores (variáveis independentes), bem como definir as melhores condições dessas variáveis a serem aplicadas em um sistema de secagem em escala de bancada de lodo de ETA convencional de cidade do interior do Estado de São Paulo, a qual usa como floculante principal o sulfato de alumínio ferroso. Para tanto foram selecionadas as variáveis (independentes) que apresentam maior interferência no processo de secagem por *spray-dryer* (vazão de ar entrada, teor de sólidos e temperatura de secagem), sendo mantida constante a vazão de alimentação em $0,5 \text{ L h}^{-1}$ e a temperatura do líquido (lodo) a ser secado mantido entre $25 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$, durante todos os ensaios experimentais. O equipamento de secagem foi mantido em sala climatizada com ar-condicionado nos ensaios.

O planejamento fatorial de experimentos (2^3) foi do tipo delineamento composto central rotacional (DCCR) seguido de metodologia de superfície de resposta (RSM), a qual foi empregada para desenvolver um modelo matemático ajustado aos dados experimentais obtidos. O software *Statistica*® (versão 9.0) foi utilizado para a análise dos dados da variável de resposta (umidade) obtidos nas condições programadas pelo DCCR, incluindo o desenvolvimento de modelo matemático associado ao planejamento.

As três variáveis avaliadas (entrada) em cinco níveis (+1,68; 1; 0; -1; -1,68) foram a temperatura ($^\circ\text{C}$) do ar de secagem, vazão de ar ($\text{m}^3 \text{ h}^{-1}$) e teor de sólidos (%) do lodo da ETA com três repetições no ponto central, totalizando 18 experimentos e realizados de maneira aleatória. Foram feitas duas repetições para cada ensaio e quatro para o ponto central, sendo este também com ensaios em duplicata. Vale ressaltar que para cada ensaio, o tempo de duração foi de 1 hora e o volume das amostras de lodo para secagem foi de 500 ml.

2.3 Preparo das amostras e análises físico-químicas realizadas (ensaios de secagem)

Antes da realização dos experimentos de secagem, a caracterização do teor de sólidos (%) presente no lodo foi avaliada após coleta de amostra realizada em ETA convencional ($\sim 50 \text{ L}$). O lodo coletado foi uma amostra (composta) de dois decantadores. Essa amostra de lodo foi mantida sem agitação por uma semana para a sedimentação da fase sólida. A seguir todo o sobrenadante (água) foi removido e então se realizou a análise de sólidos totais (ST) ou teor de sólidos de acordo com metodologia de APHA (2005).

Após análise em triplicata da amostra, foi obtido o valor médio de 3,50% ($35.000 \text{ mgST.L}^{-1}$) e esse dado foi considerado como o valor máximo de concentração de sólidos totais presentes no lodo coletado na ETA. Especificamente o lodo gerado nos decantadores pode ter concentração de sólidos variável (0,1% a 4,0%). Portanto, esse teor de sólidos totais pode variar entre 1.000 e $40.000 \text{ mgST.L}^{-1}$ (Richter, 2001).

A partir dessa concentração máxima de sólidos, definiu-se os valores médio (2,50% ou $25.000 \text{ mgST.L}^{-1}$) e mínimo (1,5% ou $15.000 \text{ mgST.L}^{-1}$). Todas essas informações de sólidos foram utilizadas para o planejamento experimental. Obviamente o ponto central corresponde em termos de sólidos ao valor médio (2,50%). Portanto, a partir do valor máximo de concentração de 3,50% em termos de sólidos totais fez-se as diluições necessárias para se obter o valor mínimo de concentração de 1,5% e 1,2%, bem com a centrifugação (15 min, 5.000 rpm) e posterior diluição para a geração de lodo na condição de concentrações de sólidos totais de 4,20% (ponto de máximo no planejamento experimental).

O lodo coletado também foi analisado em termos de pH, DQO (demanda química de oxigênio) e metais seguindo metodologia de APHA (2005). Para o produto obtido após secagem (pó), anali-

sou-se a umidade final na balança de umidade, bem como análise de metais conforme metodologia já citada.

2.4 Parâmetros de secagem (spray-dryer)

A vazão de ar de alimentação na câmara de secagem e a temperatura de secagem são parâmetros importantes no processo. A definição do valor máximo utilizado nos experimentos para a vazão de ar foi de $85 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$, sabendo-se que o equipamento atinge $95 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ (condição excepcional), mas optou-se pelo menor valor para não forçar o equipamento (soprador de ar) na vazão máxima. Já para a temperatura do ar de secagem adotou-se os valores mínimos de 133°C e 150°C e acima da temperatura de ebulição da água. O valor médio dado pelo equipamento que pode atingir 250°C foi de 175°C (ponto central), mas com valores máximos de 200°C e 217°C nos ensaios experimentais.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 1 são apresentados os resultados das análises de metais para a concentração em termos de sólidos de 1% do lodo coletado na ETA. O pH do lodo teve seu valor próximo de 7,32 e a DQO de $193 \text{ mgO}_2 \text{ l}^{-1}$. Portanto, uma baixa concentração de matéria orgânica presente no lodo e pH próximo a neutralidade.

Como podem ser notadas na Tabela 1, as concentrações de metais presentes no lodo mais elevadas são para o alumínio, ferro, cálcio, magnésio e manganês. Em especial o alumínio, este exerce papel de destaque em detrimento às suas potenciais ações tóxicas, além de possíveis efeitos positivos ou negativos nas técnicas de tratamento, disposição e reutilização desse lodo em geral. Ressalta-se ainda que os metais podem estar concentrados por complexantes, principalmente orgânicos, presentes na fase líquida do lodo

(Maruf *et al.*, 2009). Sabe-se também que a água bruta que chega para tratamento nas ETAs convencionais, provavelmente, pode estar composta por ferro e manganês/magnésio, sendo esses metais precipitados pela adição de cal, realizada para acerto de pH na etapa de coagulação. Tal fato explica a maior presença de ferro, manganês/magnésio e cálcio no lodo coletado da ETA.

Tabela 1 – Análise de metais no lodo (líquido) com 1% (teor de sólidos).

Parâmetros	Valores (mgL ⁻¹)	Limite Detecção*	Método** de Referência
Alumínio	789	0,010	SMWW 3111 D
Antimônio	0,34	0,005	SMWW 3111 B
Bário	0,46	0,050	SMWW 3111 D
Cádmio	0,09	0,0006	SMWW 3111 B
Cálcio	53,8	0,001	SMWW 3111 D
Chumbo	0,45	0,010	SMWW 3111 B
Cobalto	0,18	0,007	SMWW 3111 B
Cobre	0,44	0,003	SMWW 3111 B
Cromo	0,34	0,005	SMWW 3111 B
Ferro Total	754	0,005	SMWW 3111 B
Magnésio	12,5	0,001	SMWW 3111 B
Manganês	12,2	0,003	SMWW 3111 B
Níquel	0,40	0,008	SMWW 3111 B
Potássio	2,90	0,100	SMWW 3500 KB
Prata	< LD	0,001	SMWW 3111 B
Sódio	2,60	0,100	SMWW 3500 NaB
Zinco	0,70	0,002	SMWW 3111 B

Legenda: **APHA (2005), LD = limite de detecção.

Pela definição dos valores das variáveis de processo, foi realizado no *software Statistica*® o Planejamento fatorial de experimentos do tipo delineamento composto central rotacional (DCCR) para início da realização dos ensaios. Na Tabela 2 estão apresentados os dados referentes ao planejamento fatorial e os resultados experimentais obtidos da variável de resposta (umidade) na secagem do lodo em cada ensaio programado. Como pode ser observado na Tabela 2, em todos os ensaios notou-se a formação de um produto de baixa umidade final, e um pó realmente fino (Figura 2), o que pode viabilizar uma destinação mais adequada e facilitada em termos de logística pelo menor volume gerado.

Tabela 2 –Valores de umidade final do pó (seco) obtidos após secagem do lodo de ETA em cada condição experimental programada no planejamento fatorial.

Ensaio	Variáveis de Entrada e níveis (real e codificado)						Resposta
	Temperatura (°C)		Vazão de ar (m³/h)		Teor de sólidos (%)		Umidade (%)
	Real	Codificado	Real	Codificado	Real	Codificado	
1	150	-1,00	45	-1,00	1,50	-1,00	10,67
2	150	-1,00	45	-1,00	3,50	1,00	10,72
3	150	-1,00	75	1,00	1,50	-1,00	7,51
4	150	-1,00	75	1,00	3,50	1,00	6,07
5	200	1,00	45	-1,00	1,50	-1,00	8,27
6	200	1,00	45	-1,00	3,50	1,00	10,0
7	200	1,00	75	1,00	1,50	-1,00	6,44
8	200	1,00	75	1,00	3,50	1,00	5,75
9	133	-1,68	60	0,00	2,50	0,00	8,69
10	217	1,68	60	0,00	2,50	0,00	6,18
11	175	0,00	35	-1,68	2,50	0,00	18,89
12	175	0,00	85	1,68	2,50	0,00	6,74
13	175	0,00	60	0,00	0,80	-1,68	5,20
14	175	0,00	60	0,00	4,20	1,68	8,15
15	175	0,00	60	0,00	2,50	0,00	8,28
16	175	0,00	60	0,00	2,50	0,00	8,14
17	175	0,00	60	0,00	2,50	0,00	8,69
18	175	0,00	60	0,00	2,50	0,00	8,09

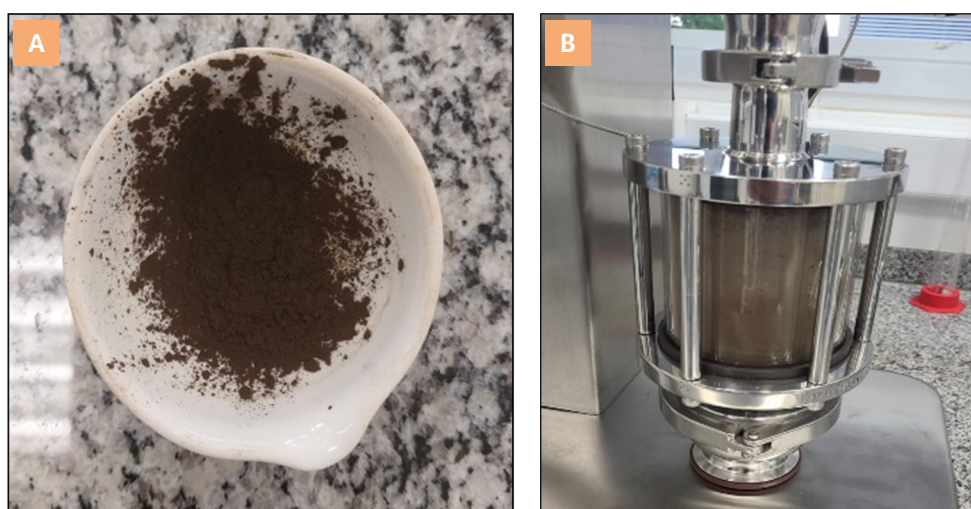


Figura 2 – (a) Produto gerado após secagem (pó); e (b) Receptor do produto seco após ciclone.

Em função dos dados experimentais da variável de resposta (umidade) obtidos em cada ensaio programado do DCCR (Tabela 2) e utilizando-se o software *Statistica*[®] foi possível ajustar um modelo matemático de 2ª ordem para descrever a umidade final do lodo (U) em função da temperatura ($T^{\circ}\text{C}$) e da vazão do ar de secagem (Q_{AR}), bem como em função do teor de sólidos na alimen-

$$U = b_0 + b_1X_1 + b_1X_1^2 + b_2X_2 + b_2X_2^2 + b_3X_3 + b_3X_3^2 + b_2(X_1 * X_2) + b_3(X_1 * X_3) + b_3(X_2 * X_3) \quad (1)$$

Para a codificação das variáveis independentes (entrada) utilizou-se a equação dada a seguir (Equação 2), sendo X_i e Z_i os valores codificados e reais das variáveis, respectivamente:

$$X_i = \frac{Z_i - Z_{med,i}}{\left(\frac{Z_{max,i} - Z_{min,i}}{2}\right)}; \quad i = 1, 2, 3 \dots \quad (2)$$

Em seguida, considerando-se um nível de confiança de 95%, avaliou-se não só a significância estatística de cada termo do modelo, mas também se testou uma possível falta de ajuste do modelo aos dados experimentais. Segundo a Tabela 3, foram estatisticamente significantes os efeitos (linear e quadrático), tanto da temperatura, quanto da vazão de ar, pois os respectivos valores de p foram inferiores a 0,05.

No processo de secagem do lodo, a variável temperatura do ar de secagem foi significativa, inclusive com os sinais de ambos os efeitos linear e quadrático negativos, o que corrobora com a fenomenologia do processo, pois quanto maior é a

tação de lodo (W_s), conforme a seguinte equação, em que X_1 , X_2 e X_3 são as variáveis codificadas de temperatura, vazão de ar e teor de sólidos, respectivamente; b_0 é o valor predito da umidade (U) no ponto central; e b_1 , b_2 , b_3 , b_{11} , b_{12} , b_{13} e b_{23} são os coeficientes do modelo (Equação 1), os quais correspondem à metade do valor do respectivo efeito:

temperatura do ar de secagem maior é a remoção de umidade do lodo.

Com relação ao teor de sólidos, o efeito linear dessa variável não foi estatisticamente significativo, mas o efeito quadrático está presente. Nesse caso, quando se objetiva a otimização do processo, é necessário matematicamente que o modelo contenha os termos linear e quadrático na variável, mesmo que apenas um desses efeitos seja significativo (Calado; Montgomery, 2003).

Para os efeitos combinados, tem-se que o efeito de interação binária entre vazão de ar e teor de sólidos mostrou-se bastante significativo ($p \cong 0,015$), enquanto que entre temperatura e teor de sólidos, o efeito mostrou-se marginalmente não significativo ($p \cong 0,052$), o qual poderia ter sido incluído no modelo, mas não utilizado por não ser um termo essencial. Assim, com base nas considerações acima, o modelo matemático do processo de secagem de lodo de ETA estudado será dado pela Equação 3, sendo os valores dos coeficientes dessa equação os seguintes:

$$b_0 = 8,29; b_1 = -0,64; b_{11} = -0,24; b_2 = -1,73; b_{22} = 0,53; b_3 = 0,34; b_{33} = -0,51; b_{23} = -0,49. \quad (3)$$

$$U = b_0 + b_1X_1 + b_1X_1^2 + b_2X_2 + b_2X_2^2 + b_3X_3 + b_3X_3^2 + b_2X_2X_3$$

De acordo com os dados apresentados na Tabela 4, o teste de falta de ajuste do modelo foi negativo ($p = 0,051 > 0,05$), além de o ajuste do modelo ter apresentado um elevado valor para o coeficiente

de explicação ($R^2 = 0,945$), resultados esses que atestam a adequação estatística do modelo proposto para a previsão do comportamento do processo de secagem em *spray-dryer* do lodo em estudo.

Na Figura 3, estão apresentadas as superfícies de resposta referentes ao processo de secagem em *spray-dryer* do lodo, mostrando o comportamento

da umidade final do lodo em função das variáveis significativas do processo, duas a duas, tendo o valor da 3ª variável fixada em seu respectivo ponto central.

Tabela 3 – Efeitos e coeficientes do modelo calculados para o DCCR tendo como variável resposta à umidade final do lodo.

Efeitos e Coeficientes Estimados								
Fator	Efeito	DPe	t (3)	p	Estimativa por intervalo (95%)			
					Limite Inferior	Limite Superior	Coefficiente	DPC
Média	8,28	0,14	60,98	0,000	7,85	8,72	8,29	0,140
T (°C) (L)	-1,28	0,15	-8,67	0,003	-1,75	-0,81	-0,64	0,074
T (°C) (Q)	-0,49	0,15	-3,17	0,050	-0,97	0,00	-0,24	0,076
Q _{AR} (m ³ .h ⁻¹) (L)	-3,45	0,15	-23,45	0,000	-3,92	-2,98	-1,73	0,074
Q _{AR} (m ³ .h ⁻¹) (Q)	1,06	0,15	6,93	0,006	0,57	1,55	0,53	0,076
W _s (%) (L)	0,68	0,15	4,60	0,019	0,21	1,15	0,34	0,074
W _s (%) (Q)	-1,03	0,15	-6,68	0,007	-1,51	-0,54	-0,51	0,076
T ^o Q _{ar}	0,44	0,19	2,26	0,109	-0,18	1,05	0,22	0,096
T ^o W _s	0,60	0,19	3,14	0,051	-0,01	1,22	0,30	0,096
Q _{ar} ^o W _s	-0,98	0,19	-5,07	0,015	-1,59	-0,36	-0,49	0,096

DPe = desvio padrão do efeito; DPC = desvio padrão do coeficiente; t(3) = estatística t de Student obtida utilizando-se 3 graus de liberdade para a estimativa da variância do erro puro; p = valor-p de probabilidade de significância; 95% = nível de confiança; L = Linear; Q = quadrático.

Tabela 4 –Análise de variância (ANOVA) para o ajuste do modelo do processo de secagem em *spray-dryer* do lodo.

Variável resposta: Umidade final do lodo (%)					
-Fator	SQ	GL	MQ	-F	p
T (°C)(L)	5,57	1	5,57	75,18	0,0032
T (°C) (Q)	0,74	1	0,75	10,05	0,0505
Q _{AR} (m ³ .h ⁻¹)(L)	40,74	1	40,74	550,02	0,0002
Q _{AR} (m ³ .h ⁻¹)(Q)	3,55	1	3,55	47,96	0,0062
W _s (%) (L)	1,56	1	1,56	21,11	0,0194
W _s (%) (Q)	3,31	1	3,31	44,66	0,0068
T ^o Q _{ar}	0,39	1	0,38	5,11	0,1089
T ^o W _s	0,73	1	0,74	9,88	0,0515
Q _{ar} ^o W _s	1,90	1	1,91	25,67	0,0148
Falta de ajuste	3,30	5	0,66	8,91	0,0508
Erro puro	0,22	3	0,07		
Total SQ	63,90	17			
R² = 0,945					

SQ = soma quadrática; GL = graus de liberdade; MQ = média quadrática; F = estatística de Fisher; p = valor-p De probabilidade de significância.

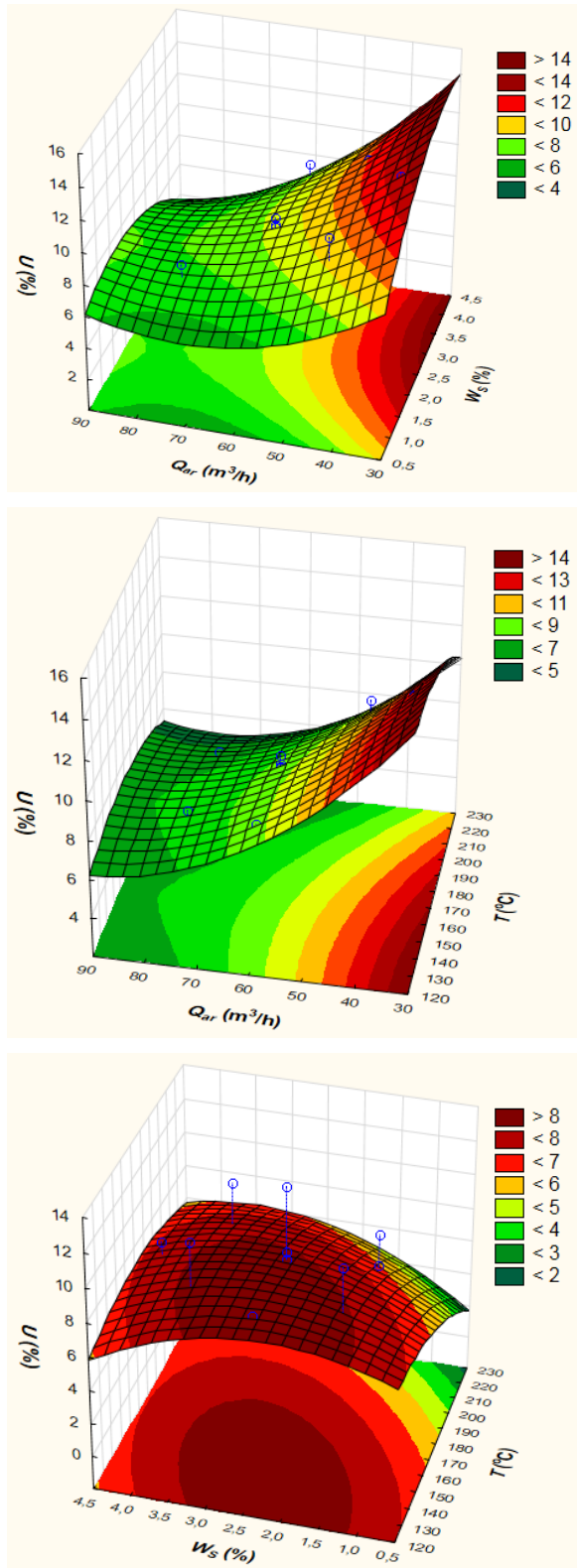


Figura 3 – Superfícies de resposta do processo de secagem em *spray-dryer* do lodo de ETA.

Nesse caso, para a otimização do processo de secagem, cujo objetivo consiste em determinar as condições operacionais que minimizam a umidade final do lodo (seco em pó), partiu-se do modelo representativo do processo, no caso a Equação 3, derivando-a parcialmente com relação às variáveis X_1, X_2 e X_3 e igualando a zero essas derivadas para obter as Equações 4, 5 e 6:

$$\frac{\partial U}{\partial X_1} = b_1 + 2b_1X_1 = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial U}{\partial X_2} = b_2 + 2b_2X_2 + b_2X_3 = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial U}{\partial X_3} = b_3 + 2b_3X_3 + b_2X_2 = 0 \quad (6)$$

Resolvendo-se o sistema de equações lineares constituído pelas Equações 4, 5 e 6, obtêm-se os valores ótimos das variáveis codificadas como sendo $X_1 = -1,33$; $X_2 = 1,46$; e $X_3 = -0,37$, os quais quando decodificados fornecem os seguintes valores reais de temperatura (T), vazão de ar (Q_{AR}) e teor de sólidos (W_s):

$$T = 142 \text{ }^\circ\text{C}; Q_{AR} = 82 \text{ m}^3/\text{h}; W_s = 2,13 \text{ } \%. \quad (7)$$

Em se conhecendo os valores dos coeficientes da Equação 6 como é o caso, é possível estimar a umidade final (U) do lodo após secagem nas condições otimizadas como sendo $U = 7,39\%$. Para confirmação experimental dessa estimativa foram realizados ensaios de secagem (duplicata) nas condições ótimas, obtendo-se um valor médio de umidade (U) de 6,74%, o qual representa um desvio relativo de 8,8% em relação ao valor estimado pelo modelo.

Finalmente, pelas análises no produto seco (pó) realizadas em termos de metais (Tabela 5), a partir do lodo de ETA também secado no *spray-dryer* com teor de sólidos de 1% foi observado elevadas concentrações de metais para os mesmos elementos (alumínio, ferro, cálcio e manganês magnésio).

Tabela 12 – Análise de metais no produto seco (pó) a partir do lodo com 1% (teor de sólidos).

Parâmetros	Valores (mg/kg)	Limite Detecção	Método de referência*
Alumínio	86.936	1,00	SMWW 3111 D
Antimônio	31,8	0,50	SMWW 3111 B
Bário	60,6	5,00	SMWW 3111 D
Cádmio	6,53	0,06	SMWW 3111 B
Cálcio	4.582	0,10	SMWW 3111 D
Chumbo	49,4	1,00	SMWW 3111 B
Cobalto	30,5	0,70	SMWW 3111 B
Cobre	53,4	0,30	SMWW 3111 B
Cromo	37,5	0,50	SMWW 3111 B
Ferro Total	84.113	0,50	SMWW 3111 B
Magnésio	1.016	0,10	SMWW 3111 B
Manganês	1.635	0,30	SMWW 3111 B
Níquel	37,9	0,80	SMWW 3111 B
Potássio	253	10,0	SMWW 3500 KB
Prata	< LD	0,10	SMWW 3111 B
Sódio	229	10,0	SMWW 3500 NaB
Zinco	132,8	0,20	SMWW 3111 B

* APHA (2005).

Vários estudos já foram realizados e entre as soluções propostas para minimizar os impactos causados pelo lodo das ETAs convencionais é a destinação em aterros sanitários, uso em solos agrícolas, recomposição de solos, cultivo de grama comercial, reflorestamento, compostagem, construção civil (fabricação de materiais cerâmicos e concretagem) ou até o lançamento em Estação de Tratamento de Esgoto (ETE). Na verdade, o mais preocupante é a presença de alumínio no produto seco em alta concentração (Tabela 12) que pode implicar na restrição de várias dessas propostas de destinação final do material em pó.

Uma alternativa mais racional e sustentável, pela presença do alumínio, seria utilizar o lodo seco produzido pelo *spray-dryer* como matéria-prima na produção de materiais cerâmicos para construção civil (tijolos, telhas, azulejos e pisos). Na literatura, há vários trabalhos que analisaram a adição de lodo seco de ETA em produtos cerâmicos como forma de disposição final do resíduo após secagem para incorporação (Benlalla *et al.*, 2015; Cremades; Cusidó; Arteaga, 2018; Kizinievič *et al.*, 2013).

4 CONCLUSÃO

A partir dos resultados obtidos da secagem de lodo de ETA convencional pela aplicação de metodologia de planejamento fatorial de experimentos, essa opção de tecnologia via *spray-dryer* permitiu reduzir a umidade com elevada eficiência para valores de até 5,20% (94,80% – teor de sólidos totais) no produto em pó, sendo a umidade do lodo inicial nos experimentos mantida entre 99,2% e 95,8%, com valores correspondentes de 0,80 a 4,20% para sólidos totais. Os parâmetros otimizados para secagem do lodo (variáveis de entrada) foram em termos de temperatura e vazão do ar de secagem de 142°C e de 82 m³.h⁻¹, respectivamente, bem como o teor de sólidos de 2,13%. A umidade (variável de saída) obtida em função dos parâmetros otimizados foi de 7,39%, sendo que posteriormente a aplicação das condições otimizadas dos parâmetros em testes no *spray-dryer* proporcionou o valor médio de umidade de 6,74%, o que representa um baixo desvio relativo (8,8%) em relação ao valor estimado (7,39%). Nesse sentido, a ideia principal do estudo proposto foi realmente verificada transformando o lodo em pó, em condições otimizadas para propiciar a redução de volume para adequação final e posterior destinação.

5 FINANCIAMENTO

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP/Proc. n° 2021/06961-9) pelo apoio financeiro na execução da pesquisa.

6 CONTRIBUIÇÃO DOS AUTORES

Conceitualização: Sarti A; **Metodologia:** Sarti A, Mello BSe Oliveira SC. **Investigação:** Sarti A, Mello BS e Muci MRNN. **Redação – Primeira versão:** Sarti A; **Redação – Revisão & Edição:** Sarti A, Mello BS, Oliveira SC e Moruzzi RB; **Aquisição de Financiamento:** Sarti A; **Supervisão:** Sarti A.

7 REFERÊNCIAS

- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 10.004: **Resíduos sólidos: classificação**. Rio de Janeiro. [S.l.: s.n.], 2004.
- ACHON, C. L.; BARROSO, M. M.; CORDEIRO, J. S. Resíduos de estações de tratamento de água e a ISO 24512: desafio do saneamento brasileiro. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 18, n. 2, p. 115-122, 2013.
- AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION – APHA. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 21. ed. Washington, DC: American Public Health Association, 2005.
- ANDREOLI, C. V. (Coord.). **Resíduos sólidos do saneamento: Processamento, reciclagem e disposição final**. Rio de Janeiro: ABES, 2001.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 10004: resíduos sólidos – classificação**. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.
- BARROSO, M.M.; CORDEIRO, J.S. Problemática dos metais nos resíduos gerados em estações de tratamento de águas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 21., 2002, João Pessoa. **Anais [...]**João Pessoa: ABES, 2002.
- BENLALLA, A.; ELMOUSSAOUITI, M.; DAHHOU, M.; ASSAFI, M. Utilization of water treatment plant sludge in structural ceramics bricks. **Applied Clay Science**, Amsterdã, v. 118, p. 171-177, 2015.
- CALADO, V.; MONTGOMERY, D. **Planejamento de experimentos usando o “Statistica”**. [S. l.]: Editora E-papers, 2003.
- ÇELIK, M.; MUTTIL, P.; BINZET, G.; WENDELL, S. C. **Spray Drying and Pharmaceutical Applications: Handbook of Pharmaceutical Granulation Technology**. 4.ed. Boca Raton: CRC Press, 2021.
- CREMADES, L.V.; CUSIDÓ, J.A.; ARTEAGA, F. Recycling of sludge from drinking water treatment as ceramic material for the manufacture of tiles. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdã, v. 201, p. 1071-1080, 2018.
- DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. D. B.; VOLTAN, P. E. N. **Métodos e técnicas de tratamento e disposição dos resíduos gerados em estações de tratamento de água**. São Carlos: LDiBe Editora, 2012.
- IPPOLITO, J. A.; BARBARICK, K. A.; ELLIOTT, H. A. Drinking water treatment residuals: A review of recent uses. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v. 40, n. 1, p. 1-12, 2011.
- KESHANI, S.; DAUD, W. R. W.; NOUROUZI, M. M.; NAMVAR, F.; GHASEMI, M. Spray drying: An overview on wall deposition, process and modeling. **Journal of Food Engineering**, Amsterdã, v. 146, p. 152-162, 2015.
- KIZINIEVIČ, O.; ŽURAIŠKIENĖ, R.; KIZINIEVIČ, V.; ŽURAIŠKAS, R. Utilisation of sludge waste from water treatment for ceramic products. **Construction and Building Materials**, Amsterdã, v. 41, p. 464-473, 2013.
- MARUF, M.; BARD, S. M.; WALSH, M. E.; GAGNON, G. A. Aluminum toxicity and ecological risk assessment of dried alum residual into surface water disposal. **Canadian Journal of Civil Engineering**, v. 36, n.6, p. 127-136, 2009.
- MASTERS, K. **Spray drying in practice**. Copenhagen: Spray Dry Consult, 2002.
- MCCABE, W. L.; SMITH, J. C.; HARRIOTT, P. **Unit operations of chemical engineering**. 5. ed. Nova Iorque: McGraw-Hill, 1993.
- NATH, S.; SATPATHY, G. R. A systematic approach for investigation of spray drying processes. **Drying Technology**, Londres, v. 16, n. 6, p. 1173-1193, 1998.
- POLITIS, S. N.; COLOMBO, P.; COLOMBO, G.; REKKAS, D. M. Design of experiments (DoE) in pharmaceutical development. **Drug Development and Industrial Pharmacy**, Londres, v. 43, n. 6, p. 889-901, 2017.
- RICHTER, C.A. **Tratamento de lodo de estações de tratamento de água**. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda, 2001.
- SMIDERLE, J. J. **Estudo de viabilidade para destinação final do lodo da ETA Laranjal/RJ**. 2016. Projeto de Graduação (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.